

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа: Инженерная школа новых производственных технологий
Направление подготовки: 12.04.02 «Оптотехника»
Отделение: Отделение материаловедения

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка светодиодного облучательного прибора для растениеводства

УДК 628.978.04:633/635

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ91	Былков Денис Васильевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент Ом	Туранов Сергей Борисович	к.ф.-м.н.		

Со-руководитель (по разделу «Концепция стартап-проекта»)

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Шаповалова Наталья Владимировна	-		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Скачкова Лариса Александровна	-		

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор Ом	Полисадова Елена Фёдоровна	д.ф.-м.н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код	Результат освоения ООП
Универсальные компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий.
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла.
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели.
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия.
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия.
УК(У)-6	Способен определить и реализовать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки.
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен представлять современную картину мира научную картину мира, выявлять естественнонаучную сущность проблемы, формулировать задачи, определять пути их решения и оценивать эффективность выбора и методов правовой защиты результатов интеллектуальной деятельности с учетом специфики исследований для разработки оптической техники, оптических материалов и технологий оптического производства.
ОПК(У)-2	Способен организовать проведение научного исследования и разработку, представлять и аргументированно защищать полученные результаты интеллектуальной деятельности, связанные с научными исследованиями в области оптической техники, оптико-электронных приборов и систем.
ОПК(У)-3	Способен приобретать и использовать новые знания в своей предметной области на основе информационных систем и технологий, предлагать новые идеи и подходы к решению инженерных задач.
Профессиональные компетенции	
ПК(У)-1	Способность к анализу состояния научно-технической проблемы, формированию технического задания и постановке цели и задач в сфере проектирования оптических и оптико-электронных приборов, систем и комплексов, в области исследования оптических материалов и технологий на основе подбора и изучения литературных и патентных источников.
ПК(У)-2	Способность к моделированию работы оптико-электронных приборов и светотехнических устройств на основе физических процессов и явлений, выбору численного метода их моделирования, разработке нового или выбор готового алгоритма решения задачи.
ПК(У)-3	Способность к выбору оптимального метода и разработке программ экспериментальных исследований, проведению оптических, фотометрических и электрических измерений с выбором технических средств и обработкой экспериментальных данных.
ПК(У)-4	Способность к разработке и внедрению фотонных и оптических технологий, к разработке методов контроля качества материалов и изделий, составлению программ испытаний современных светотехнических и оптических приборов и устройств, фотонных материалов.
ПК(У)-5	Способность конструировать и проектировать отдельные узлы и блоки для осветительной, облучательной, оптико-электронной, лазерной техники, оптоволоконных, оптических, оптико-электронных, лазерных систем и комплексов, осветительных и облучательных установок различного назначения.
ПК(У)-6	Способность применять современную элементную базу электротехники, электроники и микропроцессорной техники при разработке и проектировании оптических и светотехнических систем, приборов деталей и узлов оплотехники.
ПК(У)-7	Способность проводить научные исследования и опытно-конструкторские работы в области оптического приборостроения, оптических материалов и технологий.
Профессиональные компетенции университета	
ДПК (У)-1	Способен проектировать и организовывать учебный процесс по образовательным программам с использованием современных образовательных технологий.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа новых производственных технологий
 Направление подготовки 12.04.02 «Оптотехника»

Отделение школы (НОЦ) _____ Отделение
материаловедения

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП _____ Е.Ф.
Полисадова
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ
 на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации (бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)
--

Студенту:

Группа	ФИО
4ВМ91	Былкову Денису Васильевичу

Тема работы:

Разработка светодиодного облучательного прибора для растениеводства	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	07.06.2021
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе</p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Исследование отечественной зарубежной литературы в данном направлении.</p> <p>Объект исследования – тепличные растения, светодиодный излучатель.</p> <p>Предмет исследования – рост и развитие растений при светодиодном облучении (микрорезель), влияние коротковолновой и длинноволновой области ФАР на величину потока излучения.</p> <p>Аппаратура – исследовательская установка со светодиодными облучателями, двухкоординатный гониофотометр, спектрорадиометр.</p>
---	--

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обзор литературы по данной тематике. 2. Проектирование конструкции и сборка экспериментальной установки для исследований 3. Разработка методики эксперимента. 4. Исследование влияния параметров излучения на морфогенез растений. 5. Исследование влияния коротковолновой и длинноволновой области ФАР на величину потока излучения. 6. Разработка облучательного прибора на основе исследований
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Результаты экспериментов. 2. Схема экспериментальной установки. 3. Снимки образцов растений. 4. Конструкция облучательного прибора 5. Протоколы измерений
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Скачкова Лариса Александровна</p>
<p>«Концепция стартап-проекта»)</p>	<p>Шаповалова Наталья Владимировна</p>
<p>Раздел на иностранном языке</p>	<p>Стрельникова Анна Борисовна, канд. филол. наук</p>
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p>Methods of irradiation of plants</p>	

<p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p>	<p>10.09.2020</p>
--	-------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
<p>Доцент ОМ</p>	<p>Туранов Сергей Борисович</p>	<p>к.ф. – м. н</p>		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
<p>4ВМ91</p>	<p>Былков Денис Васильевич</p>		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«КОНЦЕПЦИЯ СТАРТАП-ПРОЕКТА»**

Студенту:

Группа	ФИО
4ВМ91	Былкову Денису Васильевичу

Школа	ИШНПТ	Направление	12.04.02 «Оптотехника»
Уровень образования	Магистратура		

Перечень вопросов, подлежащих разработке:	
<i>Проблема конечного потребителя, которую решает продукт, который создается в результате выполнения НИОКР (функциональное назначение, основные потребительские качества)</i>	Непосредственное круглогодичное производство продуктов питания, такие как микрозелень и овощи в домашних условиях
<i>Способы защиты интеллектуальной собственности</i>	Создание полезной модели
<i>Объем и емкость рынка</i>	Порядка 11 тыс. единиц продукта для г. Томск
<i>Современное состояние и перспективы отрасли, к которой принадлежит представленный в ВКР продукт</i>	Отрасль активно развивается
<i>Себестоимость продукта</i>	13724 руб.
<i>Конкурентные преимущества создаваемого продукта</i>	Дизайнерский подход в изготовлении, встраиваемость в мебель
<i>Сравнение технико-экономических характеристик продукта с отечественными и мировыми аналогами</i>	Сравнивается потребляемая мощность аппарата, а также наличие различных функций автоматизации
<i>Целевые сегменты потребителей создаваемого продукта</i>	Городские жители (семьи) в возрасте от 35 до 45 лет
<i>Бизнес-модель проекта</i>	B2C
<i>Производственный план</i>	
<i>План продаж</i>	
Перечень графического материала:	
<i>При необходимости представить эскизные графические материалы (например, бизнес-модель)</i>	Диаграмма бизнес-модели

	по Остервальдеру
--	---------------------

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	15.03.2021
---	------------

Задание выдал консультант по разделу «Концепция стартап-проекта» (со-руководитель ВКР):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Шаповалова Наталья Владимировна	-		15.03.2021

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ91	Былков Денис Васильевич		15.03.2021

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
4ВМ91	Былкову Денису Васильевичу

Школа	ИШНПТ	Отделение (НОЦ)	Материаловедения
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	12.04.02 «Оптотехника»

Тема ВКР:

Разработка светодиодного облучательного прибора для растениеводства	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Характеристика работы: проведение измерительных работ на оборудовании. Объекты исследования: растения, светотехнические приборы. Области применения: светотехническая инженерия.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: - специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; - организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	- Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 20.04.2021) - ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения - СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания - СП52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные и опасные факторы: недостаточная освещенность на рабочей поверхности, превышение уровня шума, отклонение показателей микроклимата, повышенное значение напряжения в электрической цепи, психологическая нагрузка.
3. Экологическая безопасность:	Изготовление и утилизация объектов исследования не влияет на окружающую среду.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Возможные ЧС: землетрясения, сильные морозы, диверсия, аварии на коммунально-энергетических сетях. Типичная ЧС: пожар в здании.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.02.2021
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Скачкова Л. А.	-		08.02.2021

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
4ВМ91	Былков Денис Васильевич		08.02.2021

Оглавление

Введение	12
1 Обзор литературы по способам облучения растений	16
1.1 Механизм фотосинтеза	17
1.2 Физиологическая роль различных хлоропластов в организме растения ..	19
1.2.1 Хлорофиллы.....	19
1.2.2 Каротиноиды и их функция в организме растения	21
1.3 Физиологическая роль различных участков спектра актиничного света .	23
1.4 Влияние уровня облученности на процессы жизнедеятельности растений	38
2 Патентный обзор.....	41
• Светодиодный светильник для растений H05B 33/00 (2019.02).....	42
• Светодиодный фитооблучатель для выращивания томата F21K 99/00 (2019.02).....	44
3 Методы исследования и проектирования	46
3.1 Устройство исследовательской гидропонной установки.....	46
3.2 Исследование влияния коротковолновой и длинноволновой составляющей спектра ФАР, а также уровня облученности на морфометрические показатели растений.....	48
3.3 Разработка светодиодного светильника для растениеводства.....	53
3.3.1 Расчет необходимого потока излучения	53
3.3.2 Выбор светодиодов	55
3.3.3 Фотометрические измерения излучателя.....	60
3.3.4. Устройство излучательного прибора	68
Заключение	73
4 Раздел ВКР «Концепция стартап-проекта»	75
4.1 Описание услуги как результата ВКР	75
4.2 Основные качества продукта, решаемая продуктом проблема	77
4.3 Целевые сегменты потребителей создаваемого продукта	80
4.4 Объем и ёмкость рынка.....	80

4.5 Анализ современного состояния и перспектив отрасли	81
4.6 Расчет стоимости продукта.....	82
4.7 Конкурентные преимущества продукта и обзор технико-экономических характеристик аналогов	86
4.8 Бизнес-модель проекта.....	90
4.9 Стратегия продвижения продукта на рынок.....	93
5 Социальная ответственность	94
5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	94
5.2. Производственная безопасность	97
5.2.1 Идентификация опасных и вредных факторов	97
5.2.2. Анализ вредных и опасных факторов, возникших на рабочем месте при проведении исследований.....	99
5.3 Экологическая безопасность	102
5.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	103
5.5. Выводы по главе.....	105
Список литературы	106
1 Review of the literature on methods of irradiation of plants	112
1.1 The mechanism of photosynthesis	112
1.2 The physiological role of various chloroplasts in the plant	113
1.2.1 Chlorophylls.....	114
1.2.2 Carotenoids	115
1.3 The physiological role of different parts of the light spectrum.....	116
1.4 Influence radiation intensity on growth of plant	122

РЕФЕРАТ

Научно-исследовательская работа 124 с., 49 рис., 18 табл., 53 источника.

Ключевые слова: фотосинтетически активная радиация, морфогенез растений, поток излучения, спектральный состав, светодиод, фотосинтез, хлорофилл.

Объектом исследования является влияние спектрального состава и интенсивности облучения на морфометрические параметры салата и микрозелени.

Цель работы — является разработка эффективного светодиодного светового прибора для освещения растений.

В процессе исследования проводились сбор, обработка и анализ литературных данных о методиках исследования влияния спектрального состава и интенсивности облучения на морфометрические характеристики растений. Рассмотрены существующие облучательные установки, применяемые для изучения влияния светодиодного излучения на растения. А также производилась разработка исследовательской установки, методики эксперимента по изучению влияния режимов облучения на растения и анализ результатов, полученных с помощью исследовательской установки.

В результате исследования получены

Степень внедрения: Результаты данной работы будут применяться светотехническими компаниями в производстве облучательных установок для растений.

Область применения: оптимизация режимов облучения для тепличных комплексов, домашние установки для растениеводства.

Экономическая значимость работы обусловлена оптимизацией облучательных установок в тепличных комплексах, что позволит существенно снизить энергозатраты на выращивание сельскохозяйственных культур, а также повысить продуктивность их выращивания.

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

ФАР – фотосинтетически активная радиация

PPFD – Photosynthetic Photon Flux Density

УФ – ультрафиолетовый

ИФ – инфракрасный

ФСА – фотосинтетический аппарат

ИИ – источник излучения

ФС I и ФС II – первая и вторая фотосистемы.

РЦ – реакционные центры.

Введение

На данный момент очень активно идет развитие тепличных комплексов, а также облучательных систем, которыми оснащаются современные теплицы. Одной из самых **актуальных** задач современной светотехники является оптимизация существующих и разработка новых облучательных установок и режимов облучения. С каждым годом вопросам круглогодичного обеспечения населения свежими овощами и фруктами уделяется все больше внимания. Особенно остро эта проблема стоит в городах, а также в северных районах страны по причине экстремальных погодных условий, непригодных для выращивания в открытом грунте. Согласно статистике, доля ввозимых из-за границы продуктов сельского хозяйства составляет 60 процентов [1]. Создание эффективных режимов облучения и внедрение систем для выращивания растений в закрытом грунте и в непосредственной близости к потребителю значительно сократят затраты на логистику и транспортировку продуктов, тем самым поможет обеспечению населения свежими овощами и зеленью.

В настоящее время существует большое количество различных ресурсоэффективных систем. Особенно перспективны системы со светодиодным освещением. Светодиоды очень удобны в работе, благодаря простой настройке и регулировке энергетического потока излучения, а также светодиоды позволяют подобрать буквально любой спектральный состав излучения для растений. Этот факт дает большие возможности в проектировании данных систем. Но способ облучения светодиодным излучением еще мало изучен из-за чего существующие облучательные установки не столь эффективны какими бы могли быть и в сравнении с традиционными источниками проигрывают в экономическом плане.

Наибольший вклад в развитие организма растения вносит свет. Эффективность фотосинтеза тесно связана с интенсивностью света и его спектральным составом. А от того насколько эффективна реакция фотосинтеза зависит урожайность растения. Оптическое излучение, в видимом диапазоне

от 350 до 800 нм., способствует активации фотосинтетической реакции. Такое излучение называют актиничным. Максимум поглощения актиничного света растением приходится на синюю (430 – 460 нм.) и красную (650 – 700 нм.) область спектра [2]. Зелёная, ультрафиолетовая и инфракрасная составляющие также влияют на фотосинтез и выполняют регуляторные функции, но при проектировании тепличных светодиодных световых приборов ими пренебрегают и предпочитают использовать красные и синие светодиоды в соотношениях 7:1, 5:1 и др., что не позволяет в полной мере раскрыть потенциал светодиодного освещения. Но несмотря на все преимущества светодиодных систем освещения тепличных комплексов, они не могут быть намного более эффективные чем люминесцентные или газоразрядные аналоги. Это вызвано тем, что большинство светодиодных облучательных установок не обладают полноценным спектральным составом. Проведено множество исследований, где не учитывались регуляторные функции отдельных линий спектра фотосинтетически активной радиации, в данных исследованиях применялись длины волн лишь для возбуждения фотосинтеза, но не его контроля. Необходимо разработать полноспектральный светодиодный излучатель с высокой квантовой эффективностью. Использование полноспектральных излучателей позволит создать световую среду близкую к естественной. Также, чтобы повысить эффективность использования светодиодных излучателей и раскрыть их потенциал в полной мере, необходимо разрабатывать светотехнические проекты тепличных комплексов специально под использование излучателей на основе светодиодов. Таким образом возможен значительный прирост эффективности использования светодиодных систем освещения растений, что повысит эффективность тепличных комплексов и их производных для выращивания растений в искусственных условиях.

Для разработки эффективных облучательных установок, необходимо изучить реакции организма растения на параметры излучения и выявить зависимость. Для изучения процессов, протекающих в растениях на всем

периоде вегетации, применяется специальная установка фитотрон - исследовательская установка способная воспроизвести условия схожие с естественными. Данная установка применяется для лабораторных исследований процессов вегетации различных растений. С помощью этой установки можно управлять поливом и такими параметрами как уровень облученности, спектральный состав излучения, температура и влажность воздуха, количество CO₂. Данные параметры являются ключевыми для роста и развития растения.

Таким образом выявив зависимость тех или иных реакций растения от параметров излучения появится возможность разработки излучателей с необходимыми режимами облучения.

Целью данной работы является разработка эффективного светодиодного светового прибора для освещения растений. В работе будут проведены исследования влияния параметров излучения на ростовые процессы растений.

Также будет изучена зависимость квантовой эффективности излучателя от составляющих спектра излучения и будет выявлена наиболее эффективная комбинация светодиодов.

Данные исследования позволят оптимизировать облучательные установки для растений в тепличных комплексах.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить ряд **задач**:

1. Проанализировать отечественную и зарубежную литературу по исследованиям влияния светодиодного излучения на состояние растений.
2. На основе полученной информации разработать методику эксперимента.
3. Сконструировать установку для исследований и провести ряд экспериментов.

4. На основе полученных результатов выявить закономерность влияния параметров облучения на морфометрические параметры растений.
5. Рассчитать необходимые значения параметров оптического излучения (спектральный состав, поток излучения, КСС), которым должен обладать световой прибор, для эффективной культивации растений.
6. Исследовать влияние длинноволновых и коротковолновых составляющих спектра на квантовую эффективность светового прибора.
7. Разработать конструкцию и излучатель светового прибора.

Практическая значимость заключается в постановке облучательного прибора в производство и продвижение в реальный сектор экономики.

Личный вклад автора заключается в постановке задач исследования, планировании и проведении экспериментов, обработке и интерпретации полученных результатов, проектировании излучательных установок. Обсуждение поставленных задач, методов решений и результатов исследований проводилось с научным руководителем.

Реализация и апробация работы заключается в применении разработанного излучательного прибора при проектировании фитошкафа – устройства позволяющего выращивать микрозелень и овощные культуры в домашних условиях круглогодично. Данное устройство было представлено в рамках защиты ВКР в виде стартапа, а также будет представлено на конференции достижений сельского хозяйства 24 июня.

Научная новизна работы заключается в исследовании влияния длинноволновой и коротковолновой составляющей ФАР на эффективность фитооблучателей.

1 Обзор литературы по способам облучения растений

С каждым годом все больше внимания уделяется освещению тепличных комплексов. Свет является важнейшим звеном, участвующем в развитии растения. Количество и качество света напрямую влияет на урожайность растения и содержание питательных веществ в нём.

Повсеместно идет переоборудование традиционных облучательных установок для растений на светодиодные. Облучательные установки на основе светодиодных источников излучения более компактные и более эффективные, а также удобнее в плане настройки спектрального состава облучения и регулировки уровня облученности. Однако на сегодняшний день светодиодные излучатели менее популярны, чем газоразрядные и люминесцентные. Это связано с дороговизной и сравнительно низкой эффективностью светодиодных излучателей. Низкое соотношение мкмоль/с/доллар, делает их экономически неоправданными. Однако светодиодные излучатели можно располагать намного ближе к растению в силу их низкого тепловыделения.

Таким образом переоборудование существующих теплиц с газоразрядных излучателей на светодиодные должно иметь комплексный подход. А именно разработка светотехнических проектов непосредственно с соблюдением технологических особенностей светодиодных излучателей.

Разрабатываемый излучатель должен иметь спектральный состав с наличием в нём всех длин волн из области ФАР при этом должна быть высокая квантовая эффективность, не ниже 2 мкмоль/Дж [3]. Для разработки излучателя необходимо изучить литературу по данной тематике.

Так, в данном разделе рассматриваются методики проведения экспериментов по исследованию влияния светодиодного излучения и его параметров на растения, а также объясняется, механизм взаимодействия растения со светом и процесс фотосинтеза. При этом будут рассмотрены различные режимы облучения и методы расчёта параметров излучателя.

1.1 Механизм фотосинтеза

Фотосинтез — это процесс преобразования неорганических соединений в органические вещества под действием солнечной энергии. Процесс фотосинтеза уникален по своей природе. Это биологическое явление протекает с накоплением и увеличением свободной энергии. Процесс преобразования солнечной энергии осуществляется посредством пластид — хлоропластов [4].

Реакцию фотосинтеза можно разделить на три основных этапа которые включают в себя фотофизические и фотохимические процессы. *На первом этапе* световая энергия поглощается растением с помощью светособирающих антенных комплексов и переходит в энергию электронного возбуждения молекул пигментов растения. Затем энергия передается в реакционный центр растения. *На втором этапе* энергия электронного возбуждения тратится на разделение зарядов в реакционных центрах растения. В РЦ энергия возбуждения поступает посредством улавливания световой энергии светособирающими антеннами, которые эффективно поглощают световую энергию. Затем эта энергия поступает в фотосистемы ФС I и ФС II, каждая из которых, возбуждаясь передает энергию все ближе к РЦ резонансным способом [2, 4].

Данный процесс описывается так называемой Z - схемой нециклического и циклического транспорта электронов при фотосинтезе.

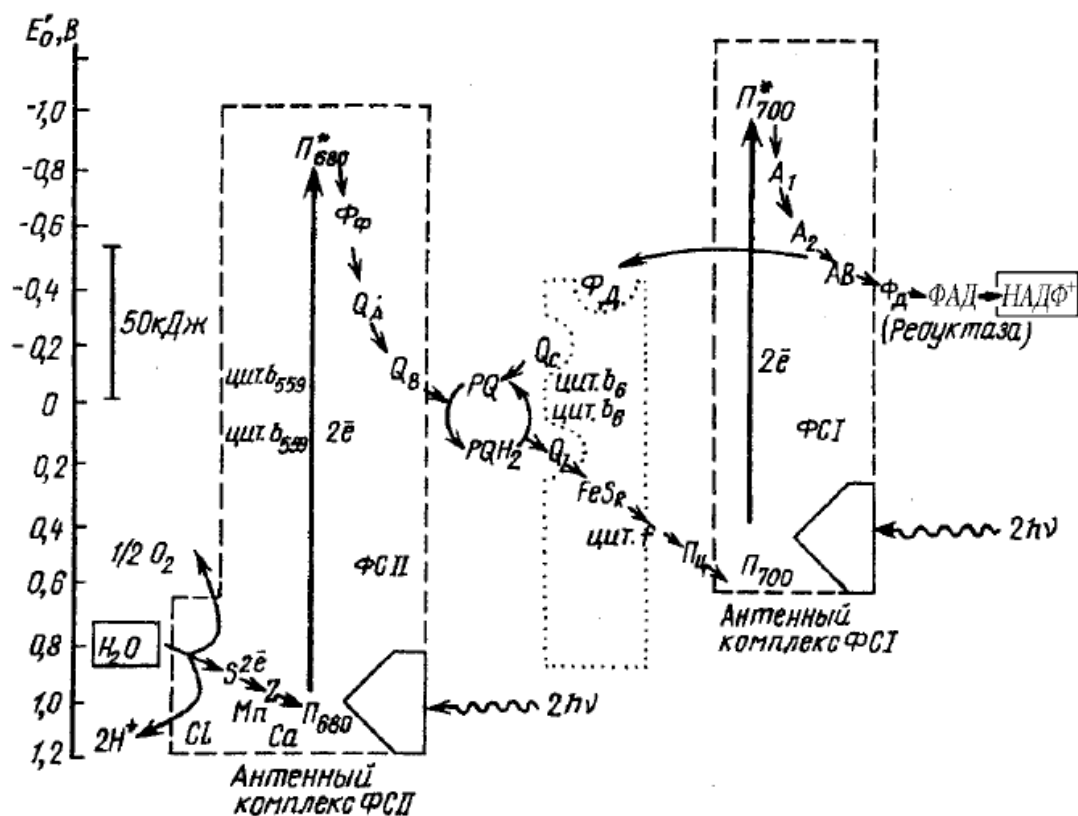


Рисунок 1 - Схема транспорта электронов (Z – схема) [4].

В основе теории транспорта электронов лежит несколько принципов. Первый из которых гласит, что каждый из двух РЦ имеет свою собственную ССА. Следующий принцип объясняет механизм передачи энергии от антенн к РЦ. В нем говорится, что каждая ФС конкурирует с соседней и энергия переливается к открытой ФС, таким образом двигаясь все ближе к РЦ [4].

Эта энергия используется для окисления пигментов. На этом этапе световая энергия переходит в химическую. На третьем этапе в силу вступают биохимические процессы происходит образование энергетических единиц организма растения АТФ, образуются белки и углеводы и как побочный продукт выделяется кислород [2, 4].

Хлоропласт содержит внутри себя сложную систему мембран. Такое строение позволяет упорядочить работу реакционного центра и разделить быстрые фотофизические процессы, протекающие со скоростями ($10^{-9} - 10^{-12}$ с.) от более медленных химических процессов ($10^{-4} - 10^{-2}$ с.), а также отделить восстановленные и окисленные продукты фотосинтеза. Хлоропласты

большинства растений способны перемещаться в клетке в зависимости от интенсивности освещения и его направления. Сильный свет вызывает движение хлоропластов, обуславливая их перемещение к боковым стенкам клеток. При ослаблении светового потока хлоропласты распределяются по клетке равномерно [4]. Хлоропласт имеет способность поглощать и преобразовывать световое излучение благодаря наличию пигмента хлорофилла. Существует два вида хлорофилла – хлорофилл *a* и хлорофилл *b*, которые одновременно участвуют в процессе поглощения и преобразования световой энергии [4].

Молекула хлорофилла является оптическим сенсбилизатором, то есть способна возбуждаться квантами света [2, 4]. Хлорофилл принимает энергию света и становится донором энергии, передавая ее акцепторным молекулам – приемникам энергии. Таким образом хлорофилл может участвовать в окислительно-восстановительных реакциях, то есть может принимать или отдавать электроны.

Молекула хлорофилла получая энергию от кванта света приобретает возбужденный вид. Этот процесс уже можно рассматривать как преобразование энергии и ее запасание.

1.2 Физиологическая роль различных хлоропластов в организме растения

Растительные организмы содержат несколько видов пигментов, каждый из которых выполняет определенные функции. В пластидах высших растений и водорослей встречаются пигменты трех основных классов — хлорофиллы, каротиноиды и фикобилины. В свою очередь каждый из пигментов имеет свой спектр поглощения актиничного света.

1.2.1 Хлорофиллы

В 1903 году русский учёный М. С. Цвет разработал метод разделения пигментов. Он выделил *хлорофилл a* и *хлорофилл b*, а также получил три фракции желтых пигментов. Из большого числа фотосинтетических

пигментов только два — *хлорофилл a* и *бактериохлорофилл a* прекрасно приспособлены не только для поглощения, но также и для преобразования энергии света [4]. Все остальные пигменты участвуют только в процессах поглощения и миграции энергии. Поэтому все фотосинтезирующие организмы (включая водоросли и цианобактерии) содержат *хлорофилл a*. *Хлорофилл a* имеет голубовато-зеленый цвет, *хлорофилл b*-желтовато-зеленый.

Хлорофиллы имеют два максимума поглощения света – в синей (430 – 460 нм.) и в красной (650 – 700 нм.) областях спектра ФАР.

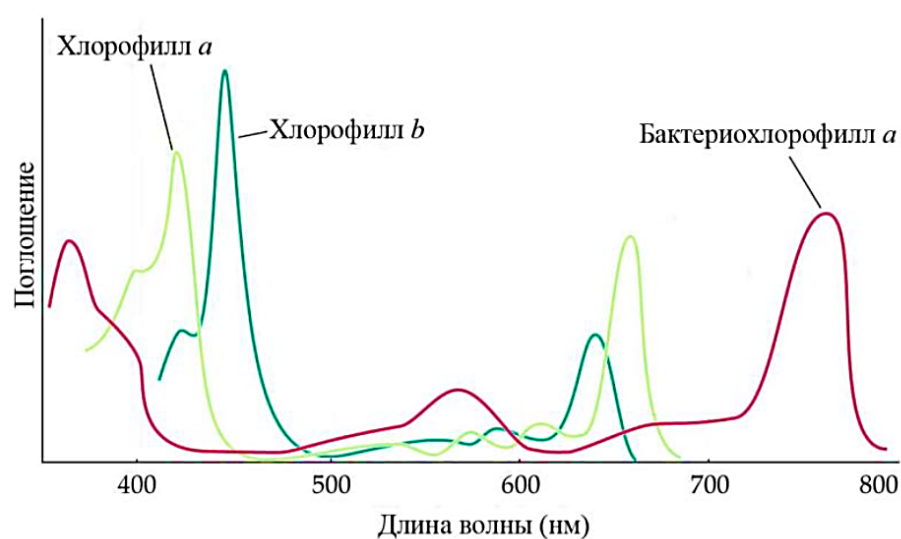


Рисунок 2 – Спектры поглощения хлорофиллов [4].

Поглощение в красной области обусловлено наличием атома магния в составе молекулы хлорофилла [4], сине-фиолетовый максимум поглощения обеспечивается резонансной структурой молекулы хлорофилла [4].

Таким образом согласно строению молекул хлорофиллов, обусловлена их поглощательная способность. Хлорофилл имеет максимумы поглощения в красной и синей области. И чтобы обеспечивать процессы фотосинтеза, достаточно облучения в данных областях спектра. Однако зеленая и желтая составляющая спектра также играет огромную роль и выполняет функцию регулирования в организме растения.

1.2.2 Каротиноиды и их функция в организме растения

Следующим основным пигментом является каротиноиды – это желтые, оранжевые или красные пигменты. Именно они придают красные и оранжевые оттенки листьям осенью. Каротиноиды необходимы для обеспечения оптимальных условий жизнедеятельности растений. Они могут выполнять функцию фотопротектора, рассеивая часть энергии. Или же выступать в качестве дополнительного светособирающего пигмента, которые более эффективно поглощают свет в той области ФАР, где хлорофилл менее эффективен, затем эта энергия передается в реакционные центры для обеспечения процесса фотосинтеза [4].

Спектр поглощения каротиноидов находится в диапазоне от 400 до 500 нм.

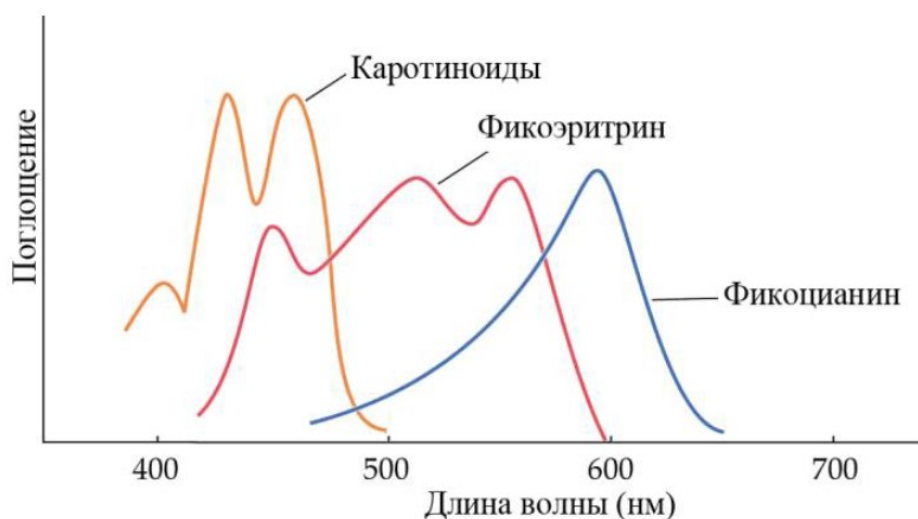


Рисунок 3 – Спектры поглощения каротиноидов и фикобиблипротеинов [4].

Каротиноиды разделяют на два основных класса по содержанию в их составе кислорода. Пигменты, которые не содержат кислорода (α , β и γ -каротины) и содержащие кислород пигменты – ксантофиллы. Наиболее распространенными каротиноидами растений являются β -каротин и ксантофиллы: лютеин, виолаксантин и неоксантин. На ярком свете в хлоропластах накапливаются *антероксантин* и *зеаксантин*. Интересно отметить, что *витамин А* представляет собой половину молекулы β -каротина.

Каротиноиды являются посредниками в передаче энергии при фотосинтезе. Различают три основных функции каротиноидов: антенная, антиоксидантная и фотопротекторная [4, 5].

Антенная функция проявляется в светособирающих комплексах и обусловлена возможностью каротиноидов под действием света переходить в синглетное возбужденное состояние. Затем энергия возбуждения каротиноидов резонансным путем передается на близлежащую молекулу хлорофилла. Каротиноиды способны играть роль дополнительных *светособирающих пигментов* в той части солнечного спектра (450 - 570 нм), где слабо поглощают хлорофиллы. Эффективность переноса энергии от возбужденных каротиноидов к хлорофиллу достигает 85% [4].

Фотопротекторная и антиоксидантная функции заключаются в защите фотосинтетического аппарата растения на ярком свете. Известно, что при больших интенсивностях облучения, растение может повреждаться, такой процесс называется фотодеструкция. Это происходит из-за фотоокисления активными формами кислорода. Механизм защитного действия каротиноидов заключается в том, что энергия возбуждения триплетного хлорофилла и синглетного кислорода резонансным путем передается на каротиноиды, а затем рассеивается в виде тепла. На сильном свете виолаксантин превращается вначале в антраксантин, а затем в зеаксантин. Именно зеаксантин способен рассеивать излишек световой энергии в форме тепла [4, 5].

Так, разные клеточные пластиды выполняют свою функцию. Хлорофиллы участвуют в обеспечении растения энергией, способствуют росту и развитию растения. Каротиноиды являются дополнительными приемниками излучения и выполняют регуляторную и защитную функцию, а также являются накопителями витаминов. При этом каждая группа пластидов имеет свои спектры поглощения актиничного света, из этого следует, что каждый участок спектра из области ФАР выполняет свою функцию в жизнедеятельности растительного организма на всем периоде вегетации.

Таким образом с помощью параметров облучения можно управлять морфогенезом растения и задавать растению необходимые параметры, такие как витаминно-минеральный состав, форма и габариты.

1.3 Физиологическая роль различных участков спектра актиничного света

Излучение, участвующее в процессах фотосинтеза растения, называют фотосинтетически активной радиацией (ФАР) или же актиничным светом. Область ФАР лежит в пределах длин волн от 350 нм. до 800 нм. В процессе жизнедеятельности растение получает световую энергию и преобразует ее в химическую, которая перераспределяется и расходуется растением.

Помимо энергетического обеспечения свет выполняет еще и регуляторную функцию. Можно предположить, что растение использует каждую область спектра актиничного света по-разному. То есть каждый участок спектра выполняет свою функцию в процессе вегетации растения.

В исследовании Н. Н. Протасовой «Светокультура как способ выявления потенциальной продуктивности растений» (1990г.) [6] показано влияние спектрального состава на фотосинтез и продуктивность растений. В качестве подопытных растений был выбран перец сорта *Вини-пух* 80-ти дневного возраста. В опыте использовались люминесцентные лампы, имеющие максимумы интенсивности излучения в красной, зеленой и синей областях ФАР. Поток излучения всех ламп был выровнен по числу падающих квантов и равнялся $19,7 \cdot 10^{15}$ квант \cdot см⁻² \cdot с⁻¹[6]. В результате эксперимента было выявлено, что у растений на синем свете наблюдался заторможенный рост листьев и осевых органов. Под зеленым излучением растения вырастали с низким содержанием хлорофилла, вытянутыми и с маленькой площадью листьев, также урожайность была низкой. При облучении красным светом наблюдался сильный рост осевых органов и площади листьев, масса растения была больше, чем при облучении зеленым и

синим светом. На красном свете наблюдался самый сильный ростовой эффект, в ущерб росту репродуктивных органов.

Также в данном исследовании показывается, что взятые по отдельности области ФАР малопригодны для выращивания полноценных растений. Так, при различных пропорциях основных областей ФАР были достигнуты максимальные показатели по продуктивности растений и эффективности фотосинтеза. При использовании красного света и добавлении к нему 25% синей оставляющей была достигнута максимальная масса плодов [6].

В статье Нутönen, Т., Pinho, Р., Rantanen, М., Kariluoto, S., Lampi, А., Edelmann, М., Elomaа, Р. (2017) [7] по исследованию влияния спектров светодиодного излучения сравнивались несколько источников светодиодного излучения с натриевой лампой высокого давления. В этой работе было использовано пять видов ИИ со следующим спектральным составом:

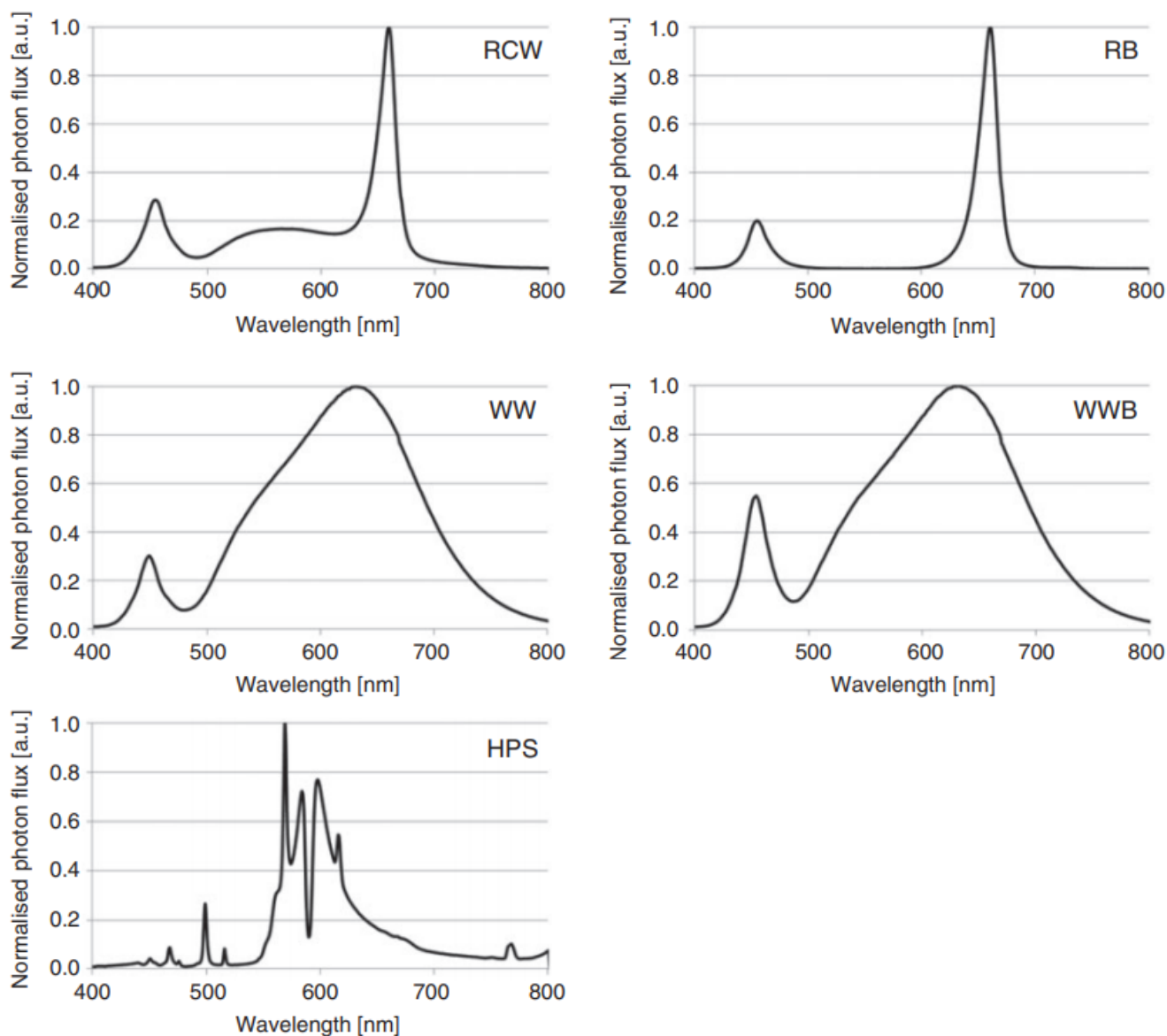


Рисунок 3 – Спектры источников излучения. RCW – красный + холодный белый; RB – красный + синий; WW – тёплый белый; WWB – теплый белый + синий; HPS – натриевая лампа высокого давления [7].

В качестве модельного растения использовался салат. Салат был высажен в лотки по 20 штук, и разделен между собой непрозрачной отражающей плёнкой. Оценка урожая растений производилась по нескольким параметрам, а именно сухая масса растений, витаминный состав, площадь листьев, количество листьев, масса растения.

В результате исследований было установлено, что полнота спектра в значительной мере влияет на параметры растений. Так, растения выращенный

под красным и синим светом, а также под красным и холодным белым были на 40% меньше по массе и габаритам, чем растения, выращенные под теплым белым и синем, теплым белым, а также натриевой лампой. При этом уровень облученности во всех ячейках имел значения 200 мкмоль/с·м² [7].

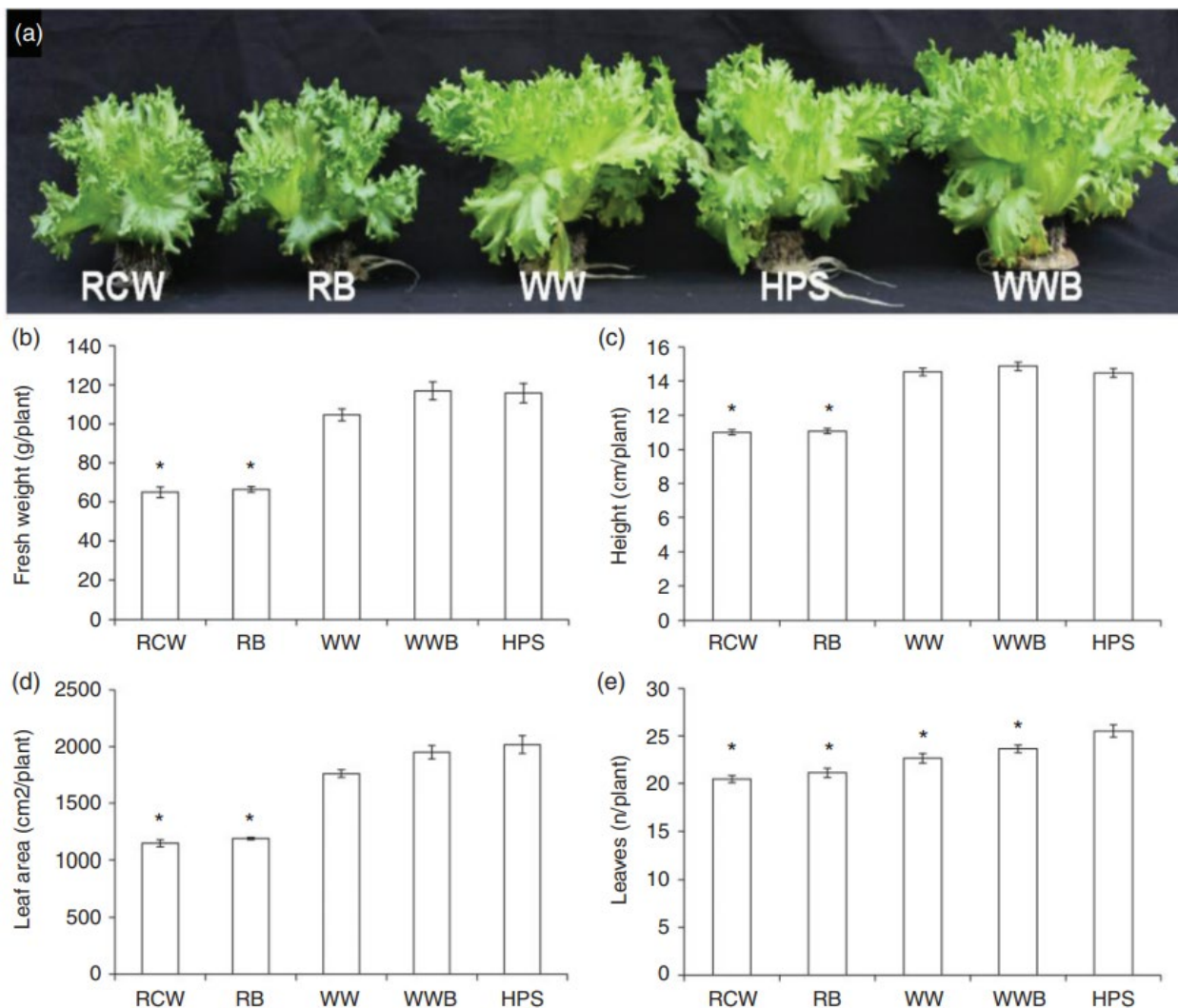


Рисунок 4 – Результат действия светодиодного излучения с различным спектральным составом [7].

Таким образом согласно данному исследованию при прочих равных условиях растение будет лучше развиваться, если спектральный состав будет полным по всей области ФАР.

Также у хлорофилла еще есть так называемый отклик на ту или иную область спектра. Так, например, существует график показывающий отклик

хлорофилла на области ФАР и для наглядности сравнивается с кривой видности человеческого глаза.

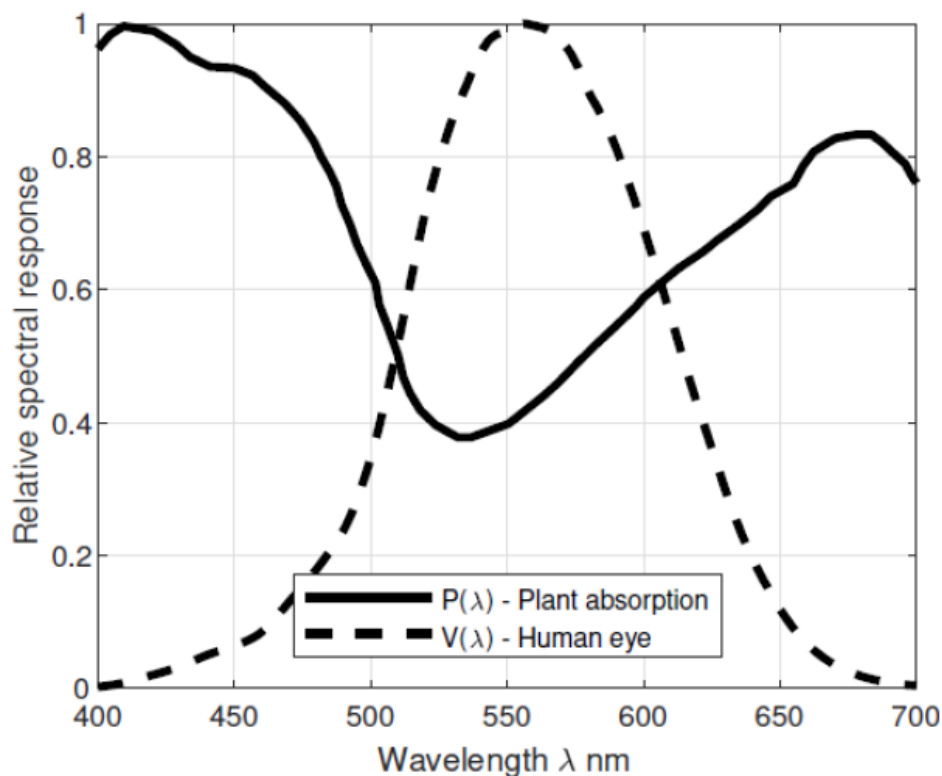


Рисунок 5 - Относительный спектральный отклик растений $P(\lambda)$ в сравнении с человеческим $V(\lambda)$ [8].

Этот отклик растения связан со спектром поглощения хлорофилла косвенно может характеризовать влияние на эффективность фотосинтеза от спектрального состава излучения.

Есть параметр, характеризующий оказываемое влияние на эффективность фотосинтеза квантов света с той или иной длиной волны. Этот показатель носит название «PAF - photosynthesis action factor» [8], который показывает вклад той или иной длины волны в эффективность фотосинтетической реакции, относительно своего энергетического потока. Другими словами, это кривая, которая показывает, как сильно влияет та или иная длина волны облучателя на эффективность фотосинтеза с учетом его общего энергетического потока. Графики из статьи Shailesh K R «Energy

efficient LED lighting design for horticulture» 2019г [8], наглядно показывают закономерности тех или иных параметров.

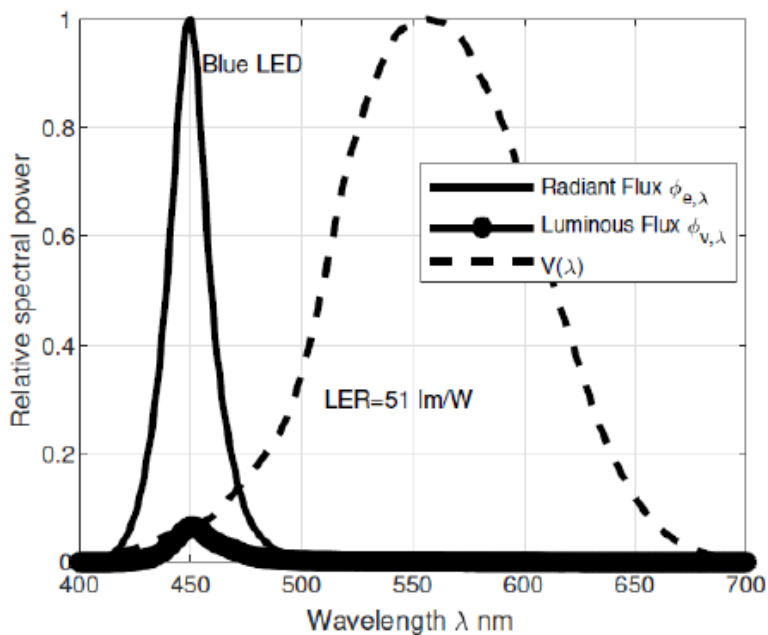


Рисунок 6 – «LER - Luminous Efficacy of Radiation» Относительное спектральное распределение мощности синего светодиода и его взвешенная по длине волны эквивалентная сила света [8].

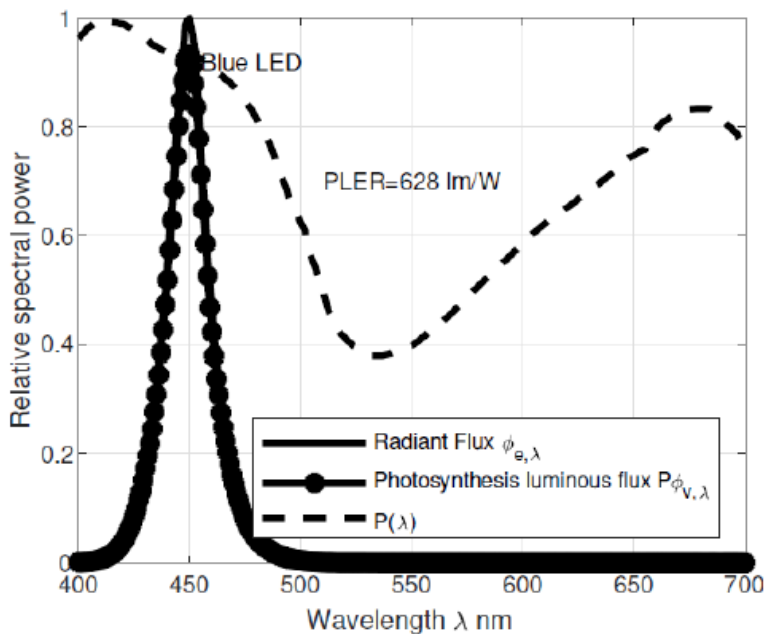


Рисунок 7 – «PLER – Photosynthetic Luminous Efficacy of Radiation» Относительное спектральное распределение мощности фотосинтетически

активного излучения и его взвешенная по длине волны эквивалентная сила света [8].

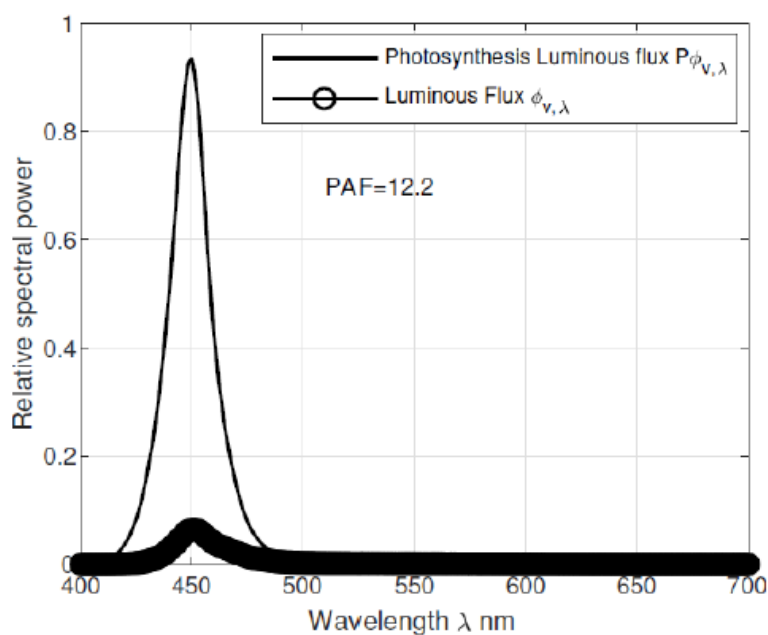


Рисунок 8 – «PAF - Photosynthesis Action Factor» световой поток из области ФАР и его фотосинтетический эквивалент [8].

К примеру, возьмем длину волны 450 нм., которая соответствует излучению синего цвета. Кванты света с такой длиной волны вносят малый вклад в световой поток излучателя, но имеют высокую эффективность в образовании фотосинтеза. Параметр PAF [8] определяется как отношение светового потока к фотосинтетическому. С помощью этого параметра можно оценивать эффективность фито излучателей.

Для наглядности рассмотрим, как меняется этот параметр при различном спектральном составе.

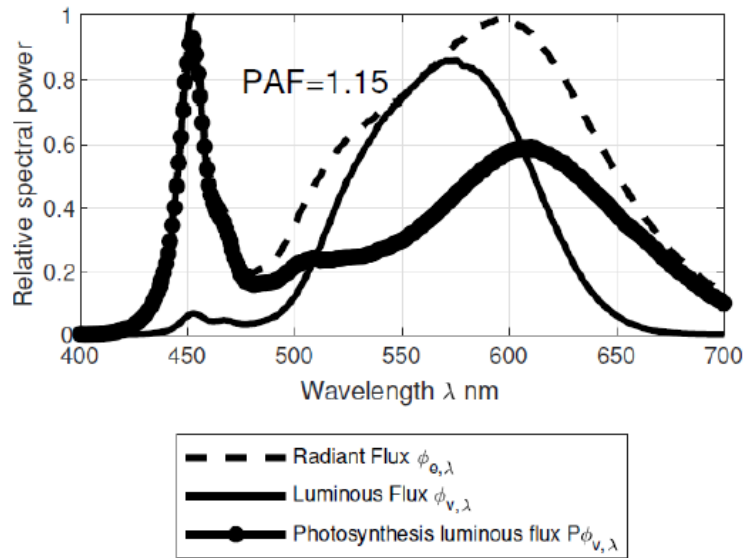


Рисунок 9 – Белый светодиод [8].

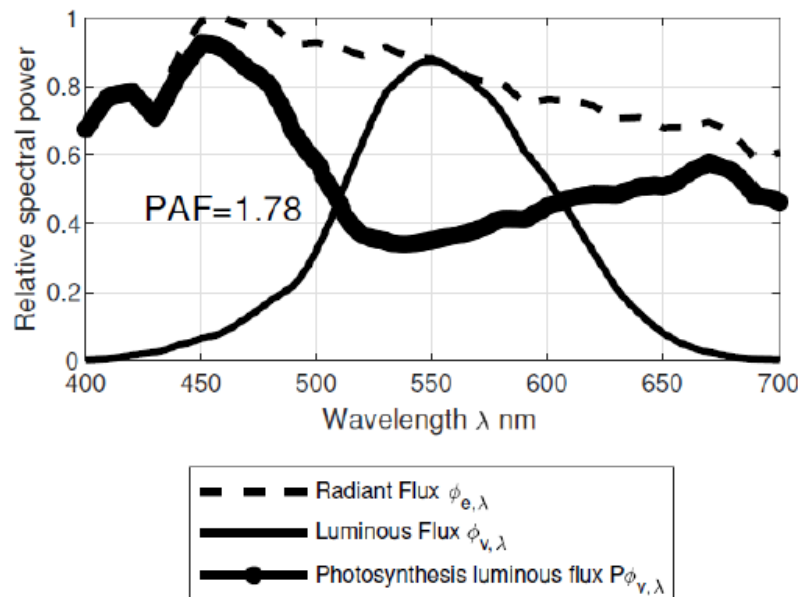


Рисунок 10 – Дневной свет [8].

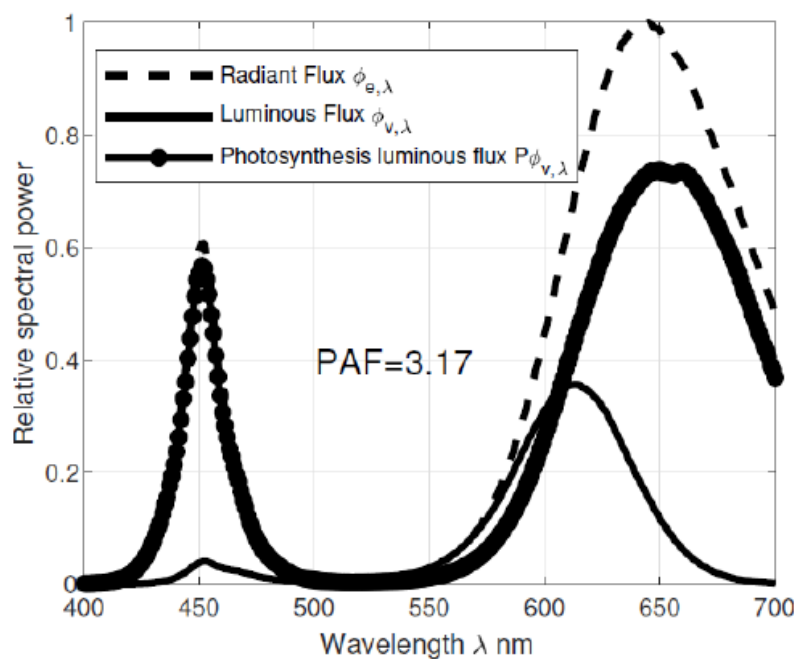


Рисунок 11 - Квазимонохроматический спектр (пурпурный) красного и синего светодиодов [8].

Видно, что квазимонохроматический спектр имеет большую фотосинтетическую эффективность по сравнению с белым светом, в котором присутствует зелёная и оранжевые области, которые не участвуют в возбуждении молекул хлорофилла. При этом синяя и красная составляющие спектра ФАР отличаются по степени вклада в эффективность фотосинтетической реакции.

В данном исследовании также были проведены измерения фотосинтетического отклика на разные спектры излучения.

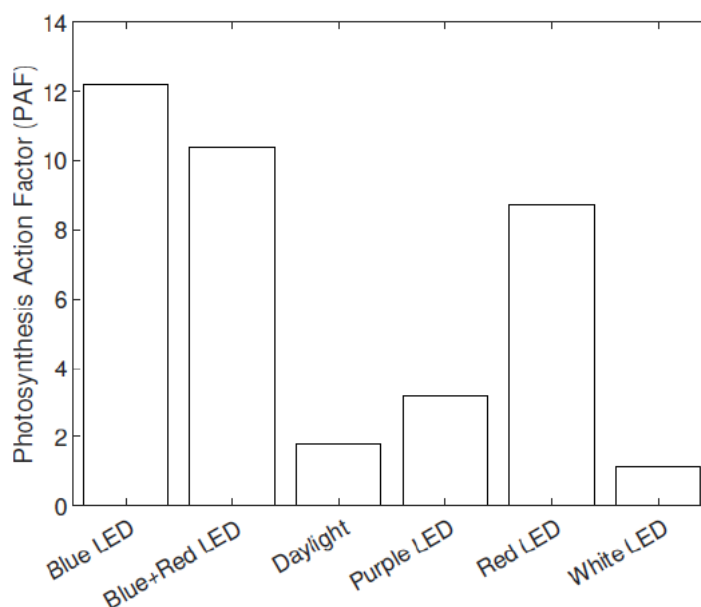


Рисунок 12 – вклад различных источников излучения в эффективность фотосинтетической реакции [8].

Видно, что синее излучение обладает наибольшим вкладом в фотосинтетическую реакцию растения. Данное исследование позволяет оценивать фотосинтетический вклад того или иного спектра излучения с пересчетом энергопотребления излучателя. Другими словами, при проектировании облучательных установок видно какую область ФАР необходимо увеличить или уменьшить в спектральном составе излучателя для повышения фотосинтетического эффекта или же для повышения энергоэффективности. Таким образом можно оценивать энергоэффективность тех или иных излучателей и создавать максимально энергоэффективные системы облучения. Важно отметить, что приведенные в исследовании параметры не применимы для расчета оптимальных спектральных характеристик излучателей, а лишь показывает, какой вклад в эффективность фотосинтеза дает та или иная длина волны из области ФАР при минимальных энергетических затратах. Данное исследование поможет проектировать излучатели с минимальным энергопотреблением.

Однако несмотря на то, что синяя и красная области имеют максимальный фотосинтетический эффект, зеленая, дальняя красная и

ультрафиолетовая также необходимы для развития и эффективного роста растений.

Так в исследовании G. Samuoliene 2012 г. [9] было продемонстрировано влияние зеленых длин волн (505 и 535 нм) на образование витамина С, общего фенола и токоферола в листьях салата [9]. В исследовании для облучения образцов салата были использованы газоразрядные натриевые лампы. К основному излучению от газоразрядных ламп было добавлено излучение светодиодов в синей (455 и 470 нм) и зелёной (505 и 535 нм) областях спектра ФАР. Уровень облучённости от газоразрядных ламп составлял $170 \text{ мкмоль/с}\cdot\text{м}^2$, а от светодиодов $30 \text{ мкмоль/с}\cdot\text{м}^2$ [9]. Результаты исследования показали повышенную эффективность зеленого светодиодного освещения (505, 535 нм) для увеличения содержания витамина С, общего фенола и токоферола по сравнению с синим светом (455, 470 нм) для листового салата. Авторы заявили, что такой прирост витамина С и токоферолов вызван большей проникающей способностью зелёных длин волн вглубь листьев. Зелёное излучение проникает глубже в крону листьев и задействует больше светособирающих комплексов растения [9].

Также данный эффект был описан в статье Samsung [10], где продемонстрировано различие проникающей способности различных областей спектра ФАР.

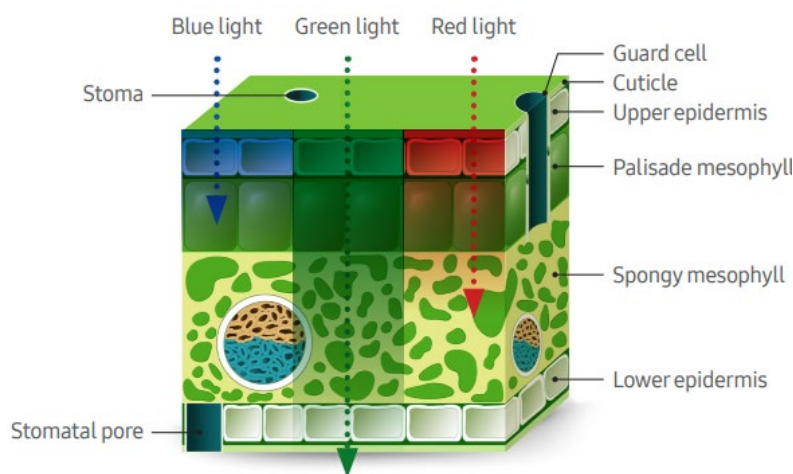


Рисунок 13 – схематического отображение проникающей способности различных участков ФАР спектра [10].

Таким образом несмотря на то, что зелёное излучение имеет низкую фотосинтетическую активность, оно может задействовать большее количество светособирающих комплексов растения и тем самым повысить эффективность фотосинтеза. При этом зелёное излучение повышает содержание витаминов и антиоксидантов в растительных организмах.

Так же в исследовании, проведённом научной командой Samsung [11], демонстрируется положительное влияние полного спектра излучения на морфогенез базилика и салата. Так в эксперименте использовали четыре вида излучения, три из которых были полными спектрами с различным соотношением красного, зеленого и синей областей спектра ФАР, и квазимонохроматическое излучение. Уровень облучённости составлял $160 \text{ мкмоль/с}\cdot\text{м}^2$ [11]. Соотношение составляющих спектра ФАР представлено в таблице 1.

Таблица 1 – относительное соотношение красной, зелёной и синей областей ФАР в результирующих спектральных составах [11].

Спектральный состав	Соотношение плотности потока фотонов из разных областей ФАР		
	Синяя область	Зелёная область	Красная область
Полный спектр №1	1	4	4
Полный спектр №2	1	2	2
Полный спектр №3	1	2	12
Квазимонохроматический спектр	1	0	4

В результате исследования было установлено, что образцы салата и базилика, выращенные под действием полного спектра излучения, имели большую общую массу. Результаты представлены в виде диаграммы на рисунке 14.

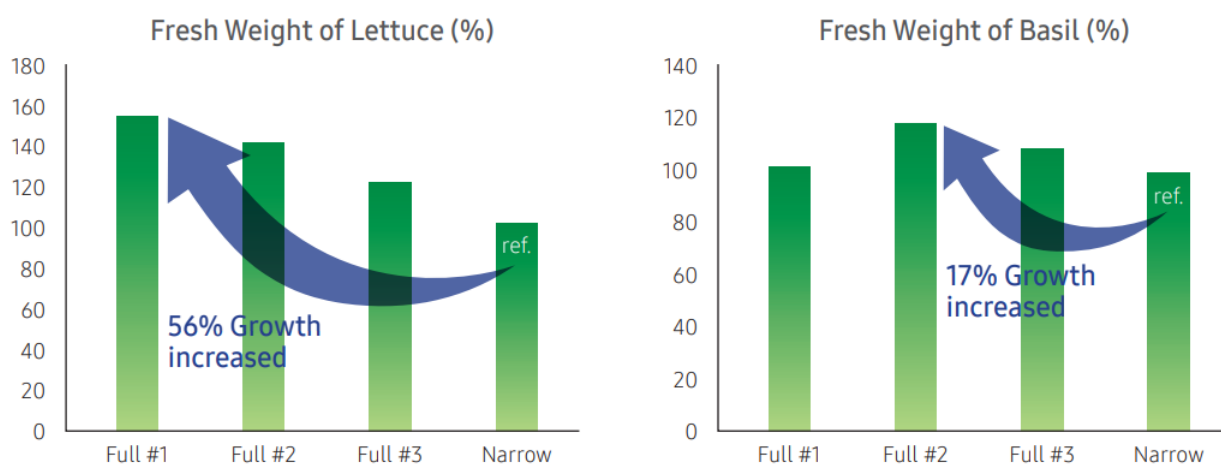


Рисунок 14 – общая масса образцов, выращенных под излучением различного спектрального состава [11].

Салат, выращенный под полноспектральным излучением, имел массу урожая на 54% большую чем под квазимонохроматическим излучением. Базилик при этом имел на 17% большую массу урожая под полноспектральным излучением чем под квазимонохроматическим излучением [11]. При этом прирост урожая салата больше, чем прирост базилика, это связано с различным пигментным составом. Можно сделать вывод, что базилику требуется спектральный состав, содержащий большее количество синего излучения, это еще раз подтверждает, что разным видам растений требуется разный спектральный состав излучения.

Таким образом, несмотря на то, что синее и красное излучение оказывает больший фотосинтетический эффект, в отсутствии зелёной и оранжевой области ФАР развитие растения протекает менее эффективно. Зелёная и оранжевая области ФАР необходимы для эффективного фотосинтеза растений. Однако при том же потреблении электроэнергии квазимонохроматические источники красного излучения являются более энергоэффективными, так согласно закону, Планка красное излучение имеет более высокую квантовую эффективность за счёт большего количества квантов, испускаемых излучателем [12]. Соотношение между светом и энергией, которую он может нести, описано в Законе Планка [13]. Этот закон

объясняет нам, почему при одинаковом количестве энергии фотоны в красном спектре оказывают более сильное влияние на фотосинтез растений, чем, например, синий фотон. Это вызвано тем, что при том же энергетическом потоке излучения, квантов красного излучения потребуется больше, чем квантов синего излучения. Количество квантов и количество энергии, переносимой этими квантами обратно пропорционально длине волны. А, согласно различным исследованиям, интенсивность фотосинтеза обусловлена не энергией квантов, а их количеством [14].

Было проведено несколько исследований по влиянию красного и дальнего красного излучения на рост растений. Дальнее красное излучение способствует усиленному росту растений в высоту и увеличению площади листьев. Так исследование Zhen, S., & Bugbee, B. (2020) [15] показало, что излучение из дальнего красного диапазона (700 – 750 нм) оказывает фотосинтетический эффект. Так в исследовании основными источниками излучения служили натриевые лампы высокого давления. К основному излучению добавлялось несколько видов излучения в количестве от 10% до 35% от основного, при этом уровень облучённости всегда составлял 400 мкмоль/с·м² [15]. Так добавление дальнего красного излучения (700 - 750 нм) к основному уровню облучённости привело к увеличению массы урожая на 6% - 21% соответственно [15]. При этом добавление более коротковолнового излучения (400 – 700 нм) также приводило к увеличению массы урожая на 6% – 21% соответственно [15]. Однако количество поглощенных коротковолновых фотонов составляло в среднем 95,9%, а поглощение длинноволновых фотонов составляло лишь 34,2% [15]. Это говорит о большей эффективности квантов красного излучения при активации фотосинтеза. При этом данный прирост происходил только при наличии коротковолновых квантов и белого света. Ранее Маккри [16] изучал влияние коротковолновых и длинноволновых квантов на эффективность фотосинтеза, он пришел к выводу, что кванты с длинами волн больше 700нм не оказывают фотосинтетического эффекта [16]. Однако в своих исследованиях Маккри облучал растения разным

излучением по отдельности. Таким образом было доказано, что длинноволновые кванты красного излучения оказывают больший фотосинтетический эффект в пересчёте на количество поглощенных растением квантов, чем коротковолновое излучение.

Также дальнейшее красное излучение способствует более раннему образованию плодов и цветению. Исследователи Yamada, A., Tanigawa, T., Suyama, T., Matsuno, T., & Kunitake, T. (2009) [17]. провели изучение влияния красного (630нм) и дальнего красного излучения (730нм) на скорость образования почки у цветка «Эустомы Горечавковых» [17]. В эксперименте цветы в течении дополнительно подсвечивались источниками красного и дальнего красного излучения с разным соотношением. Исследование показало, что у подсвечиваемых образцов растений, сроки образования бутонов сократились на 20 дней по сравнению с образцами, которые не подсвечивались [17].

Для разработки эффективного излучателя необходимо учитывать вышеперечисленные факторы. Так коротковолновая составляющая спектра ФАР необходима для поддержания высокого уровня фотосинтеза и для образования веществ, отвечающих за вкусовые качества. Зелёная часть спектра необходима для накопления витаминов и антиоксидантов растения, а также повышает эффективность фотосинтеза за счёт высокой проникающей способности излучения. Длинноволновая область ФАР является основным источником энергии, а также способствует ускорению роста растения и созреванию плодов. Для создания энергоэффективного излучателя необходимо соблюдать баланс тех или иных составляющих излучения ФАР. Так необходимо обеспечить такой спектральный состав, в котором будет высокое значение параметра PAF [8] – фотосинтетического отклика, при этом в спектре должна присутствовать и зеленая составляющая ФАР. Вместе с этим необходимо обеспечить высокую эффективность квантов, соответственно в излучении должна присутствовать доля длинноволновой составляющей ФАР, которая обеспечит высокий поток излучения, разрабатываемого излучателя.

1.4 Влияние уровня облученности на процессы жизнедеятельности растений

Уровень облученности или интенсивность света, падающего на растения, играет важную роль в вегетации растений. Наравне с полноценным спектральным составом растению требуется и оптимальный уровень облученности. Свет является основным источником энергии для растений, а также выполняет регуляторные функции в процессе жизнедеятельности растений. Для растения очень важен спектральный состав облучения, но в отсутствие оптимальной интенсивности света растение не будет нормально развиваться.

Так при слишком низкой интенсивности падающего света, недостаточной для нормального развития, растения вырастают слишком высокими и тонкими, при этом в них содержится мало хлорофилла [6]. Так например в исследовании P Pinho DSc^a, T Hytonen PhD^b, M Rantanen MSc^b, P Elomaa PhD^b and L Halonen PhD^a «Dynamic control of supplemental lighting intensity in a greenhouse environment» 2012 г. [18] говорится, что для большинства культур прирост зеленой массы растения на 1% достигается путем увеличения интенсивности света на 1% [18]. Этот прирост будет наблюдаться вплоть до значений близких к точке насыщения фотосинтеза. И наоборот слишком высокие уровни облученности приводят световой деструкции тканей листьев растений, т.е. ожогам. Так, например, в статье Н. Н. Протасовой «Светокультура как способ выявления потенциальной продуктивности растений» 1990 г. [6] описывался процесс фотоингибирования, или проще говоря замедление роста осевых органов растения при высоких интенсивностях ФАР. Было выявлено, что при интенсивностях, превышающих 250 Вт/м² ФАР, тормозится рост площади листьев и подавляется рост стебля (рис. 14) [6]. При этом свет высоких интенсивностей (свыше 400 Вт/м² ФАР) настолько подавляет рост растений, что в этих условиях вырастают растения карликовой формы. В отличие от генетических карликов мы их назвали «световые карлики» [6]. Эти световые,

или физиологические, карлики имели значительно меньшую биомассу по сравнению с растениями, выращенными при оптимальных интенсивностях света [6].

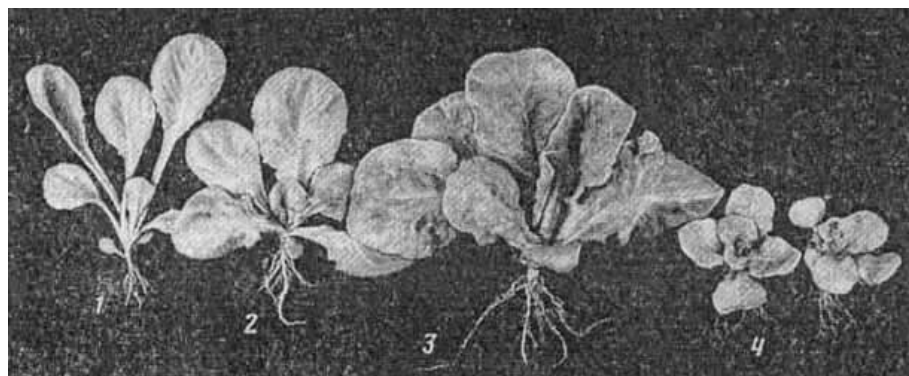


Рисунок 15 - Растения салата, выращенные при интенсивностях света ($\text{Вт}/\text{м}^2$ ФАР): 30 (1), 80 (2), 200 (3) и 420 (4) [6].

Торможение ростовых процессов светом высоких интенсивностей наблюдалось как у светолюбивых (подсолнечник, редис и др.) так и у тенелюбивых растений (салат Московский парниковый). Световое насыщение фотосинтеза у светолюбивых растений при длительном выращивании на высокоинтенсивном свету наступало при интенсивности ФАР свыше $420 \text{ Вт}/\text{м}^2$. У теневыносливых растений ингибирование фотосинтеза наблюдалось при уровнях облучённости около $400 \text{ Вт}/\text{м}^2$, оно являлось следствием разрушения хлорофилла, а при интенсивностях свыше $420 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ФАР - также и деструкции пластид [6].

Уровень облучённости влияет не только на габариты растения, он также оказывает влияние на витаминно-минеральный состав растительных организмов. При этом изменяя уровень облучённости можно добиться наилучшего соотношения содержания хлорофиллов, витаминов и антиоксидантов вместе с показателями роста и урожая. Так в исследовании Samuolienė, G., Brazaitytė, A., Jankauskienė, J., Viršilė, A., Sirtautas, R., Noviškovas, A., Duchovskis, P. (2013). [19], было проведено несколько экспериментов, в которых изучались эффекты, оказываемые разными уровнями облучённости на морфометрические и физиологические параметры

микрозелени. Так образцы растений были выращены под различными уровнями облучённости: 110, 220, 330, 440 и 545 мкмоль/с·м². В результате проведения экспериментов было обнаружено, что при наибольшем уровне облучённости - 545 мкмоль/с·м² растения были низкорослыми, при 110 мкмоль/с·м² растения выросли наиболее вытянутыми и с наименьшей площадью листьев. Также при облучённости 440 мкмоль/с·м² было получено наибольшее количество биомассы. При облучённости от 330 до 440 мкмоль/с·м² была зафиксирована наибольшая площадь листьев у образцов. Вместе с влиянием уровня облучённости на морфометрию растений, было выявлено существенное влияние и на биохимический состав образцов растений. Так содержание питательных веществ варьировалось в зависимости от уровня облучённости. Индекс хлорофилла листьев увеличивался при более высоких уровнях облучённости: 545-440 мкмоль/с·м². Также уровень облучённости повлиял и на содержание сахарозы. При наименьшем уровне PPFD наблюдалось наиболее низкое содержание сахарозы. При PPFD равном 440 мкмоль/с·м² содержание сахарозы увеличилось в 10 раз по сравнению с PPFD равном 220 мкмоль/с·м². Также уровень облучённости сильно влияет на содержание нитратов в растении. Так при наименьшем PPFD наблюдалось наивысшее содержание нитратов, а с повышением уровня облучённости содержание нитратов уменьшалось вплоть до 545 мкмоль/с·м² [19].

Таким образом уровень ФАР очень сильно влияет на морфометрические и физиологические параметры растений. При этом для эффективной культивации, несомненно, нужен оптимальный уровень облучённости. Так необходимо учитывать, что при повышении уровня облучённости повышается индекс хлорофилла и фотосинтетическая реакция усиливается, однако при этом повышается риск фотоингибирования и фотодеструкции листьев. Так же нужно подобрать необходимый уровень облучённости, при котором будет достигаться необходимый уровень питательных и минеральных веществ в растении.

2 Патентный обзор

В настоящее время достаточно широко распространены излучательные приборы для культивации растений. На сегодняшний день наиболее распространённые облучательные установки на основе газоразрядных ламп. Они применяются в крупных тепличных комплексах. Данные излучатели получили свою популярность за достаточно высокий срок службы и высокую эффективность, при этом данные излучатели имеют невысокую стоимость по сравнению со светодиодными.

В теплицах чаще всего применяются натриевые лампы для дополнительного облучения культурных растений. Данные лампы отличаются высокой квантовой эффективностью до 2 мкмоль/Дж при этом они имеют световую отдачу до 150 лм/Вт.



Рисунок 16 – натриевая лампа высокого давления.

Однако ДНат имеют ряд недостатков в сравнении с светодиодными облучателями. Основным недостатком ДНат является спектральный состав излучения. Эти лампы излучают в желтом и оранжевом участке оптического

спектра, такой спектральный состав излучения является недостаточным для нормального развития растений.

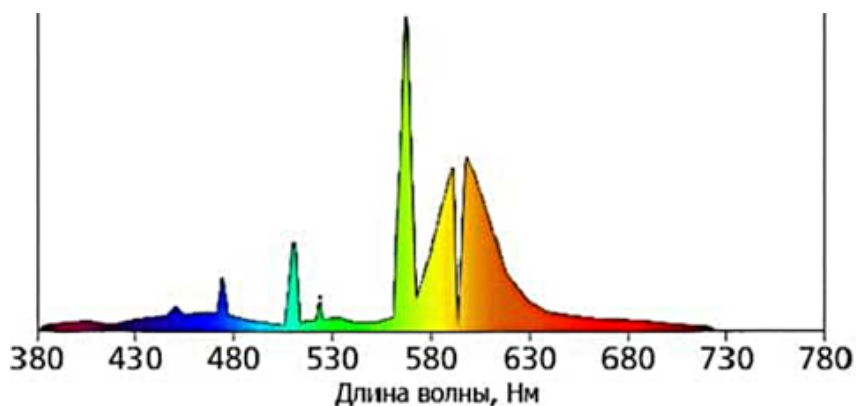


Рисунок 17 – спектральный состав излучения лампы ДНаТ [20].

Так же из-за особенности принципа свечения данных ламп, их поток практически невозможно изменять. Еще одним серьезным недостатком ДНаТ, в частности для растениеводства, является высокая температура лампы, что отрицательно сказывается на растениях. Из-за этого приходится располагать лампы на достаточном расстоянии, от растений, что приводит к уменьшению уровня облученности на поверхности произрастания растений.

С развитием технологий и светотехники, в частности, появились новые источники света – светодиоды. Это весьма технологичные источники света, обладающие рядом особенностей, которые делают этот источник света незаменимым по сравнению с другими во многих задачах.

В рамках патентного анализа было рассмотрено несколько технических решений на основе светодиодов для облучения и культивирования растений.

- **Светодиодный светильник для растений Н05В 33/00 (2019.02)** (действ.). Авторы: Мансуров Владимир Александрович, Харитонов Игорь Владимирович [21].

Сущность полезной модели заключается в том, что используется 2 независимых канала, каждый из которых состоит из источников питания,

каждый из которых питает собственную светодиодную нагрузку, при этом в каждом канале спектр излучения светодиодной нагрузки собственный. В одном канале нагрузкой является набор красных светодиодов с пиком излучения в диапазоне 580-720 нм (красный спектр), а во втором нагрузка это набор светодиодов спектральный состав излучения которых воспринимается как белое излучение, но содержащий один из пиков излучения в диапазоне 420-470 нм. Сами источники питания имеют электрические контакты для внешнего подключения, изменяя электрический потенциал на этих контактах друг относительно друга можно регулировать выходную мощность источника питания, изменяя выходной ток источника питания. Тем самым изменяя соотношение спектров каждого канала в общем спектре полезной модели [21].

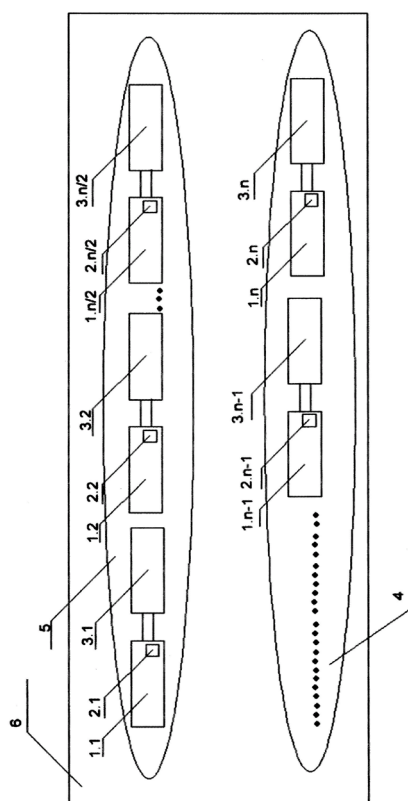


Рисунок 18 – Схема расположения основных частей светильника [21].

1.1 1.n - источник питания, где $2 < n < 20$;

1.1 2.n - электрические контакты управления источником питания, где $2 < n < 20$ включительно;

2. $3 \cdot n$ - светодиодная нагрузка, где $2 < n < 20$ включительно;
3. канал со светодиодами красного спектра свечения;
4. канал со светодиодами белого спектра свечения;
5. светодиодный светильник.

• **Светодиодный фитооблучатель для выращивания томата F21K 99/00 (2019.02) (действ.).** Автор: Смирнов Александр Анатольевич [22]

Облучатель включает в себя пять типов светодиодов с максимумами полос излучения в пределах диапазонов синий 434-450 нм, красный 630-632 нм, глубокий красный 660-670 нм и дальний красный 730-735 нм, причем часть синих светодиодов сочетается с люминофором с максимумом переизлучения в зеленой области спектра 500-600 нм, а распределение мощности излучения по областям спектра составляет синий 15-20%, зеленый 15-20%, красный 50-55%, дальний красный 10-15% [22].

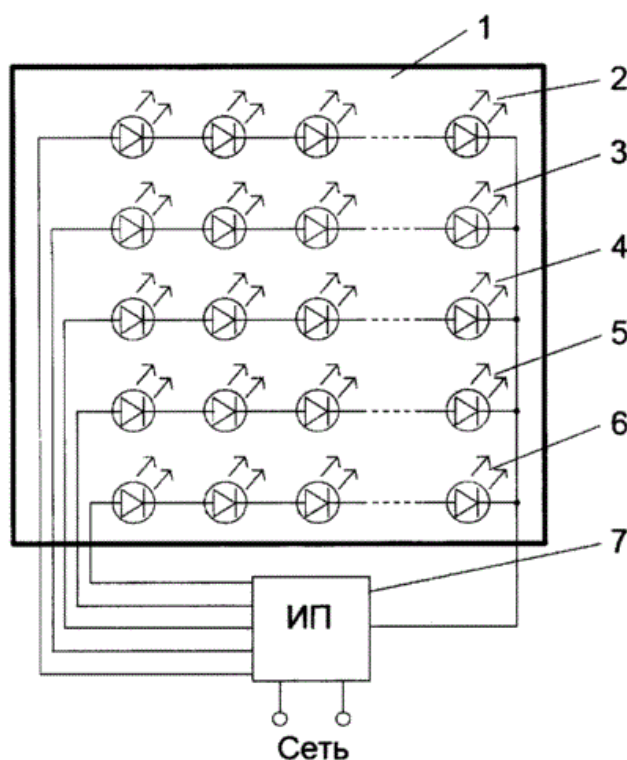


Рисунок 19 – Схема светодиодного модуля фитооблучателя [22].

Фитооблучатель, состоящий из корпуса 1 со светоизлучающими элементами, которые содержат группы светодиодов 2, 3, 4, 5 и 6 питается стабилизированным током от источника питания 7. Пики излучения и соответствующие им интенсивности подобраны так, чтобы они были сбалансированы и согласованы с интенсивностью поглощения и ролью в фотосинтезе ключевых пигментов фотосинтетического аппарата растения [22].

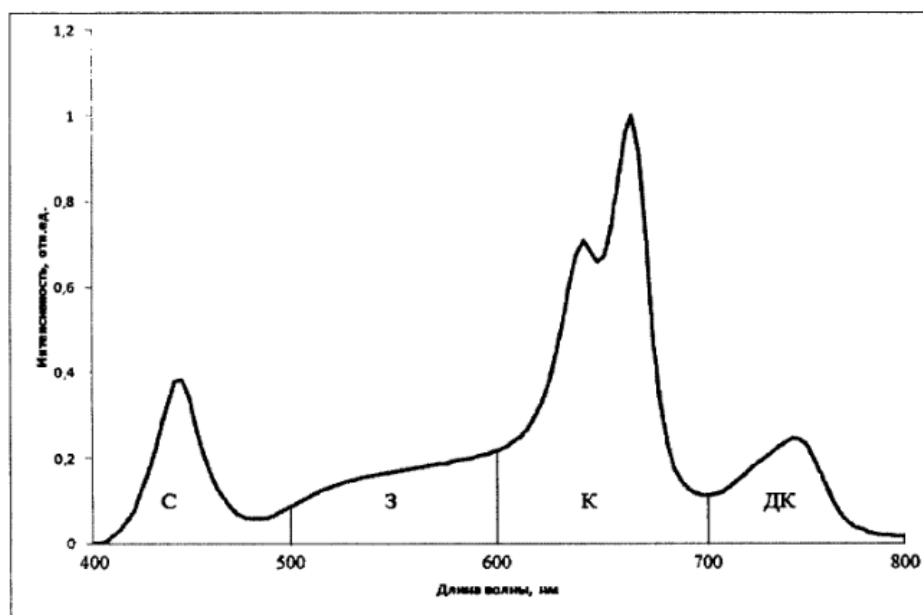


Рисунок 20 – Спектральный состав излучения [22].

Рассмотренные светильники являются отличным вариантом для вегетационного облучения растений. Они имеют такие решения как использование двухканальной системы подключения светодиодов, что повышает удобство регулировки спектра излучения. Так же, во втором патенте используется часть зеленой области ФАР, что повышает эффективность культивации растений, нежели при использовании квазимонохроматического спектра. Однако в данных светильниках нет линз для формирования КСС светильника, отсутствие линз и правильно подобранной КСС снижает эффективность использования энергетического потока, а также негативно влияет на комфорт при использовании в помещении.

3 Методы исследования и проектирования

Для экспериментов была сконструирована исследовательская гидропонная установка. ИУ позволяет моделировать различные параметры микроклимата, такие как влажность, температура, уровень облученности и спектральный состав излучения, а также менять фотопериод.

Было проведено несколько экспериментов, в которых исследовалось влияние коротковолновой и длинноволновой области спектра ФАР на фотосинтетический аппарат растений и процессы культивации. А также были проведены эксперименты по изучению влияния уровня облученности на организм растений.

Затем по результатам исследований были определены оптимальные оптические параметры разрабатываемого светодиодного светильника для растениеводства.

Для достижения максимальной эффективности светильника было опробовано несколько видов светодиодов разных производителей. Опытные образцы светильника с разными конфигурациями источника излучения прошли фотометрические измерения на двухкоординатном гониофотометре.

3.1 Устройство исследовательской гидропонной установки

Данная установка стеллажного типа построена на основе конструкционных стальных профилей, соединенных между собой болтовым соединением и образующих каркас. Каркас ИУ обшит белыми пластиковыми «сэндвич – панелями». Установка имеет три яруса, на каждом установлено по два лотка. При этом на каждом ярусе соседние лотки разделены стенками, образуя независимые ячейки на каждом ярусе. Таким образом каждая ячейка обособлена, что позволяет вести исследования независимо в каждой ячейке.

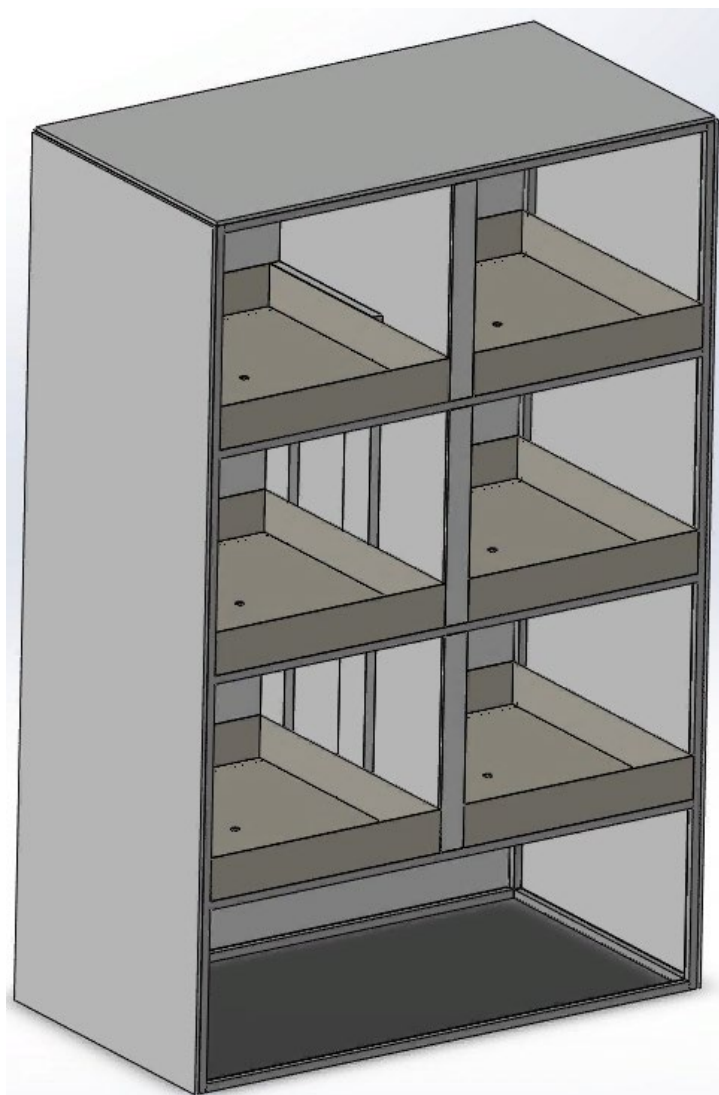


Рисунок 21 – Внешний вид исследовательской установки.

Гидропонная установка работает по приливно-отливному принципу. В нижней части установки имеется бак на 90 литров, в который опущен погружной насос. Насос подключен через разделитель к двум шлангам. В шлангах имеются ответвления под каждый лоток, по три ответвления на шланг соответственно. В каждом лотке имеется отверстие по центру для подачи питательного раствора. Каждое ответвление имеет вентиль для настройки количества поступающего питательного раствора, так можно настроить количество поступающего питательного раствора в каждый лоток, вплоть до подачи его только в один лоток. Концы шлангов погружены в бак, так лишняя вода обратно поступает в бак.

Насос нагнетает воду с питательными веществами в лоток, заполняя его до определенного значения, затем насос отключается и раствор, пропитав субстрат стекает обратно в бак через шланги подачи. Время работы насоса настраивается предварительно, для обеспечения субстрата необходимым количеством воды.

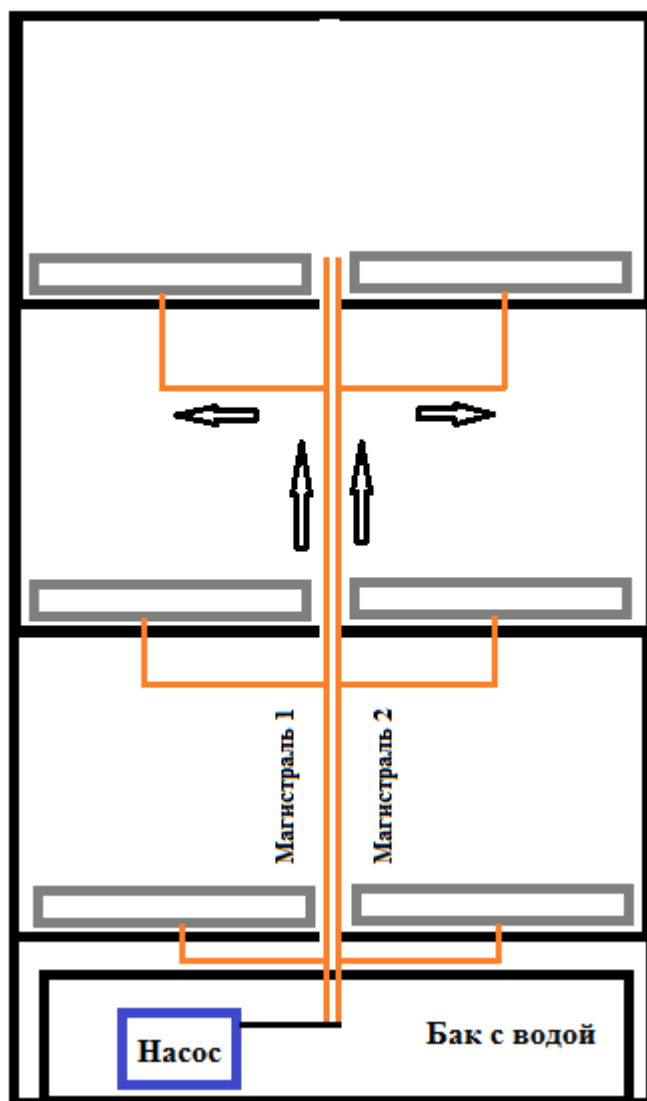


Рисунок 14 – Схема устройства гидропонной установки.

3.2 Исследование влияния коротковолновой и длинноволновой составляющей спектра ФАР, а также уровня облученности на морфометрические показатели растений

Объектом исследований служили растения салата гладколистого, базилик синий и горчицы. Семена растений были высажены в лотки с грунтовой смесью, по 10 семян каждого вида растений на один лоток. На

третий день, когда появились ростки, растения поместили в ИУ с искусственным климатом и освещением. В одной ячейке находилось 2 лотка каждого вида растений, всего в одну ячейку было помещено 6 лотков. Таким образом в ячейке находилось 20 растений одного вида, всего 60 образцов растений.

В данном эксперименте растения были помещены в ячейки № 1, 2, 3 и 4. В первой ячейке используется излучатель мощностью 80Вт, спектральный состав которого смещен в коротковолновую область спектра ФАР. Ячейка № 2 имеет излучатель той же мощности, что и ячейка №1, а спектральный состав имеет преобладание в длинноволновой части спектра и полосу излучения с длиной волны 660нм. В ячейке № 3 и 4 используется 50Вт светодиодный облучатель, спектральный состав которого имеет преобладание в длинноволновой части. В ячейке №4 спектральный состав имеет преобладание в коротковолновой части спектра ФАР. В ячейке № 1 и 2 уровень облученности равен примерно 130 мкмоль/с·м², а в ячейках № 3 и 4 равен 65 мкмоль/с·м².

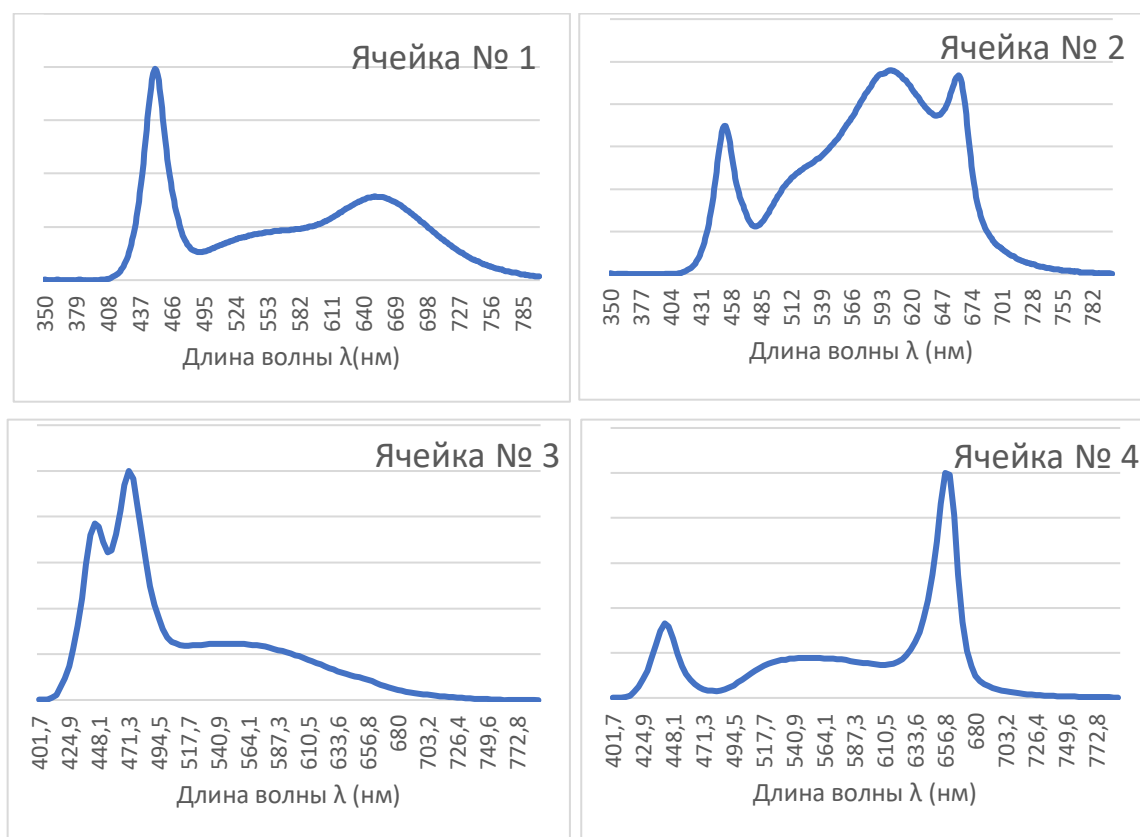


Рисунок 23 – спектральный состав излучения в ячейках.

Проводили замеры длины стебля и площади листьев. Замеряли по пять образцов растений, затем получали среднее арифметическое значение длины и площади листа. Данные заносили в таблицу. Замеры проводились каждые три дня на протяжении месяца. По данным из таблиц были сформированы аппроксимированы диаграммы роста.

Параллельно с исследованием влияния спектрального состава излучения на организм растений проводилось изучение реакции организма растений на разный уровень облученности. Так как ячейка № 1 и № 3 имеют преобладание коротковолновой составляющей спектра ФАР, а ячейка № 2 и № 4 преобладание длинноволновой составляющей, при этом уровень облученности в этих ячейках отличается в два раза, то различия в динамике развития растения будут обусловлены разным уровнем облученности. Таким образом в течении одного месяца проводилось сразу два наблюдения за реакцией организма растений на разный спектральный состав и уровень облученности.

Было выявлено, что образцы всех видов растений, участвовавших в эксперименте, лучше произрастали при более высоком уровне облучённости, а также при спектральном составе, в котором преобладает красная составляющая спектра ФАР. Так образцы из ячейки №2, выращиваемые при уровне облучённости $130 \text{ мкмоль/с}\cdot\text{м}^2$, были выше: кресс салат на 25%, руккола на 50%, горчица на 21%, редис на 28% чем в ячейке № 4 с уровнем облучённости $65 \text{ мкмоль/с}\cdot\text{м}^2$ с аналогичным спектральным составом излучения. При этом образцы из ячейки №2 были выше: кресс салат на 17%, руккола на 14%, горчица на 14%, редис на 17%, чем из ячейки №1 при одинаковых уровнях облучённости, но отличающемся спектральном составе.

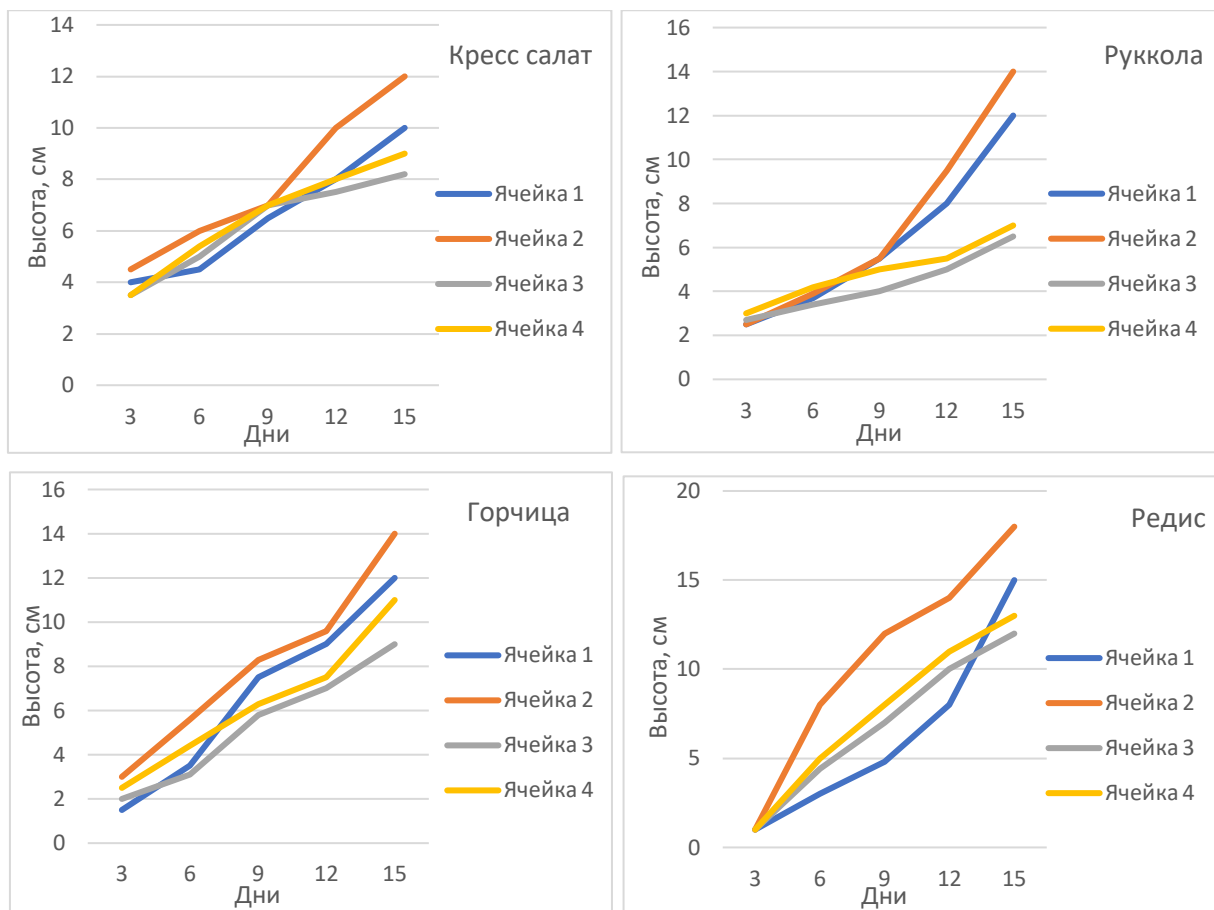


Рисунок 24 – диаграммы изменения длины стебля образцов растений.

Также образцы из ячейки №2 имели большую площадь листьев. Так при аналогичном спектральном составе, но в два раза превышающем уровне облучённости чем в ячейке №4 площадь листьев была больше: у кресс-салата на 51%, у горчицы на 25%, у редиса на 43%. При этом образцы из ячейки №2 также имели большую площадь листьев: кресс салат на 8%, горчица на 2%, редис на 24%, чем из ячейки №1 при одинаковых уровнях облучённости, но отличающемся спектральном составе. Конечная площадь листьев рукколы одинакова во всех ячейках. Это объясняется тем, что площадь листьев данного вида растений достигла максимальной площади к этому времени. Однако по графику также видно, что в ячейке №2 площадь увеличивалась быстрее.

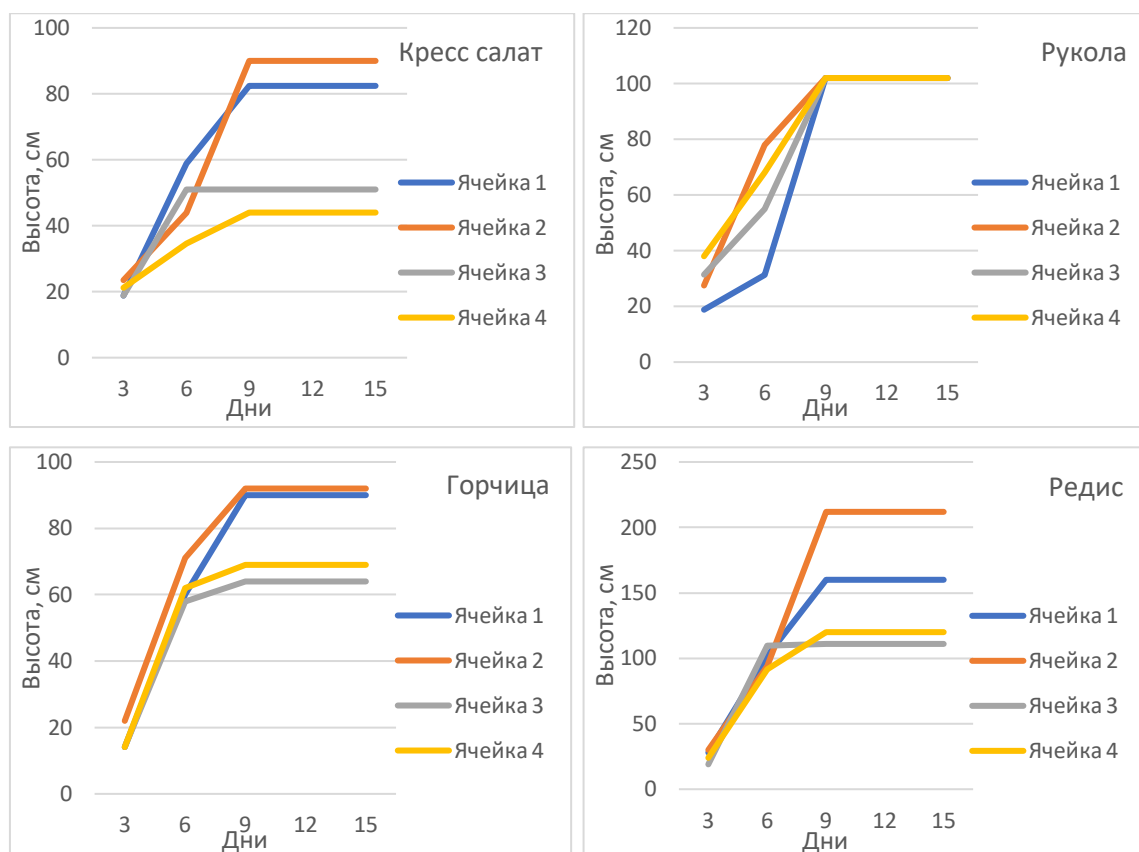


Рисунок 25 – Диаграммы увеличения площади листьев образцов растений.

По результатам исследований видно, что повышенный уровень облучённости способствует более активному росту, а также увеличению площади листьев и увеличению урожайности. При этом преобладание красной составляющей в спектре излучения также способствует усиленному росту.

Данное исследование отлично согласуется с уже проведёнными, здесь также было замечено положительное влияние красной составляющей спектра ФАР на ростовую активность. При этом стоит заметить, что излучение, использованное в эксперименте, является полноспектральным во всех случаях, как и говорилось ранее, по отдельности, составляющие спектра ФАР – неэффективны. Таким образом для разработки излучательного прибора необходимо использовать все участки ФАР. Для этого понадобятся белые светодиоды. Так как в белых светодиодах используется синее излучения для преобразования его в белый, то таким образом белые светодиоды послужат источником синего и зеленого излучения. Также в излучателе необходимо

применить красные светодиоды, так как согласно исследования красная составляющая спектра ФАР способствует активному росту растений. Из этого следует, что в излучателе будет применено два вида светодиодов – белые и красные в определенных пропорциях.

3.3 Разработка светодиодного светильника для растениеводства

По результатам исследований влияния параметров излучения были определены светодиоды по спектральному составу излучения. Затем был рассчитан энергетический поток ФАР для обеспечения оптимального уровня облучённости.

Разработка оптической части излучателя проводилась на базе существующего коммерческого светильника. За основу была взята платформа «Diora Quadro» [23]. После были проведены фотометрические измерения излучателя с различным соотношением светодиодов с разной цветовой температурой и длиной волны излучения. Затем с помощью фотометрических измерений подобрана конфигурация с максимальной квантовой эффективностью. На основе проведённых измерений была определена наиболее эффективная комбинация светодиодов. Таким образом точное количество и соотношение светодиодов, а также электрические параметры, определённые экспериментально, были применены в тепловом расчёте разрабатываемого излучательного прибора.

3.3.1 Расчет необходимого потока излучения

Согласно проведенным исследованиям, была выявлена тенденция усиленного роста при уровне облученности выше $65 \text{ мкмоль/с}\cdot\text{м}^2$. Так растения, которые развивались при уровне облученности $130 \text{ мкмоль/с}\cdot\text{м}^2$ имели большую площадь листьев и общую массу. Также согласно исследованиям влияния уровня облученности Протассовой 1993г [6] при повышении уровня облученности с $80 \text{ мкмоль/с}\cdot\text{м}^2$ до $200 \text{ мкмоль/с}\cdot\text{м}^2$ наблюдалась тенденция усиления роста осевых органов и площади листьев

растений [6]. Однако с 200 мкмоль/с·м² и до 400 мкмоль/с·м² изменений не наблюдалось, происходило приостановление эффекта усиления ростовых процессов, а свыше 400 мкмоль/с·м², наоборот, происходило угнетение роста и фотодиструкция листьев [6]. Таким образом для растений таких как салат, базилик помидоры и их рассада, а также большинство видов микрозелени оптимальным значением уровня облученности является 200 – 300 мкмоль/с·м².

Так как разрабатываемый облучательный прибор будет применяться для домашнего растениеводства, то предположительно он будет использоваться на подоконниках или отдельно стоящих столах. Так можно оценить площадь облучаемой поверхности и высоту подвеса. Площадь облучаемой поверхности равна примерно 0,5-1м². При этом расстояние от облучателя до поверхности равняется 0,7-1м.

В светильнике будет применена фокусирующая оптика. С помощью групповой линзы излучение будет эффективно сосредотачиваться на поверхности с растениями. Таким образом поток излучения светильника будет максимально эффективно использоваться растениями. В отличие от светильников, в которых отсутствует вторичная оптика, излучение в разрабатываемом светильнике будет направлено на облучение растений, минимизируя засветку помещения, что благотворно сказывается на комфорте использования данного светильника.

Имея исходные данные по условиям использования светильника перейдем к расчёту значения потока излучения, необходимого для обеспечения уровня облученности 200 мкмоль/с·м². Расчёт проведем для светильника с КСС Г90.

Рассчитывать поток излучения светильника будем методом коэффициента использования потока излучения.

$$\Phi = \frac{E \cdot S \cdot z}{\eta}$$

Где «Е» заданный уровень облученности, $E = 200$ мкмоль/с·м². Площадь $S = 0,75$ м². Коэффициент неравномерности z при использовании

светильника с КСС Г90 на поверхности с такой площадью примем 0,75. По таблице 5-19 из справочника по проектированию осветительных установок под редакцией Г. М. Кнорринга находим коэффициент использования потока излучения η . Для определения коэффициента использования необходимо найти индекс помещения i .

$$i = \frac{A \cdot B}{h \cdot (A + B)}, \text{ где}$$

A – длина помещения, м

B – ширина помещения, м

h – высота подвеса светильника над рабочей поверхностью, м; $h = 0,7$ -
1м, выберем среднюю высоту, тогда $h = 0,85$ м.

Так $i = \frac{0,75 \cdot 0,75}{0,85 \cdot (0,75 + 0,75)} = 0,44$. Тогда по таблице коэффициент использования потока излучения $\eta = 0,58$.

Необходимый поток излучения светильника:

$$\Phi = \frac{200 \cdot 0,75 \cdot 0,75}{0,58} = 194 \text{ мкмоль/с.}$$

3.3.2 Выбор светодиодов

Спектральный состав является важнейшим фактором в развитии растения. Важно соблюсти баланс между коротковолновой и длинноволновой составляющей спектра ФАР. Также немаловажным является наличие зеленых и оранжевых квантов в спектре. Так согласно исследованиям, Samsung наличие в спектре квантов с длиной волны 660 и 730 нм ускоряет образование бутонов у плодоносящих растений, а также усиливает рост в длину и массу растений. Зеленые кванты имеют высокую проникающую способность, что способствует увеличению эффективности фотосинтеза. Таким образом использование белых светодиодов обеспечит наличие средневолновой составляющей в спектре, а использование светодиодов с разной цветовой температурой позволит сформировать оптимальное соотношение между длинноволновыми и коротковолновыми составляющими спектра излучения.

Для обеспечения вышеуказанных характеристик, а именно спектрального состава и уровня облученности, в облучательном приборе должно быть два или три вида светодиодов. Так белые светодиоды с холодным спектром (6000К – 5000К) будут обеспечивать наличие коротковолновой составляющей в спектре прибора, а белые теплые светодиоды (3500К – 2700К) нужны для обеспечения длинноволновой составляющей. Также использование белых светодиодов позволит обеспечить средний диапазон спектра ФАР – это зеленое и оранжевое излучение. Еще в приборе необходим светодиод с глубоким или дальним красным излучением (650 – 730 нм.), так как кванты с такой длиной волны имеют ярко выраженное влияние на размеры и массу растений.

Так в разрабатываемом светильнике было применено три вида светодиодов. Были отобраны светодиоды от разных производителей.



Рисунок 26 - Samsung LM281B+ [24].

Данный светодиод был выбран с двумя цветовыми температурами: 5000К, 3500К и 3000К. Светодиод имеет формфактор типа 2835. Основные параметры светодиода указаны в таблице № 2.

Таблица №2 – Основные параметры светодиода Samsung LM281B+ при постоянном токе 0,15А [24].

Параметр	Тип светодиода		
	5000К	3500К	3000К
Потребляемая мощность, Вт	0.5	0.5	0.5
Прямое напряжение, В	3	3	3
Световой поток, лм	82.5	75	70
Светоотдача, лм/Вт	165	150	140



Рисунок 27 - Samsung LM301B [25].

Данный светодиод был выбран с двумя вариантами цветовой температуры: 5700К и 3000К. Светодиод имеет формфактор типа 3030. Основные параметры светодиода указаны в таблице № 3.

Таблица №3 – Основные параметры светодиода Samsung LM301B при постоянном токе 0,07А [25].

Параметр	Тип светодиода	
	5000К	3000К
Потребляемая мощность, Вт	0.2	0.2
Прямое напряжение, В	3	3
Световой поток, лм	44	40
Светоотдача, лм/Вт	220	200

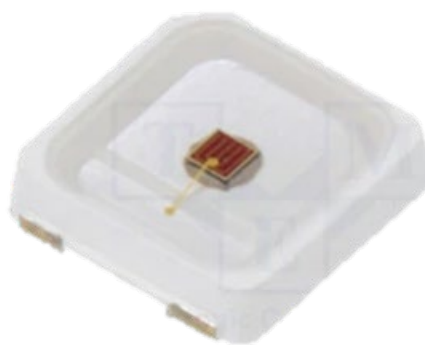


Рисунок 28 - ProLight PW2R-FFME-A [26].

Данный светодиод с излучением глубокого красного излучения с длиной волны 660нм. Светодиод имеет формфактор типа 2835. Основные параметры светодиода указаны в таблице № 4.

Таблица №4 – Основные параметры светодиода ProLight PW2R-FFME-A при постоянном токе 0,15А [26].

Параметр	
Потребляемая мощность, Вт	0.31
Прямое напряжение, В	2,1
PPF, мкмоль/с	0,75
PPE, мкмоль/Дж	2,38
Длина волны, нм.	660

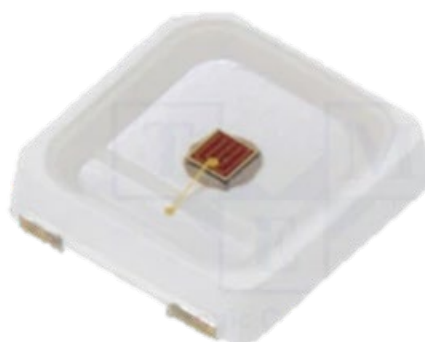


Рисунок 29 - 2835RCT-02V150 [27].

Данный светодиод с излучением глубокого красного излучения с длиной волны 650нм. Светодиод имеет формфактор типа 2835. Основные параметры светодиода указаны в таблице № 5.

Таблица №5 – Основные параметры светодиода 2835RСТ-02V150 при постоянном токе 0,15А [27].

Параметр	
Потребляемая мощность, Вт	0,31
Прямое напряжение, В	2,1
РРФ, мкмоль/с	0,6
РРЕ, мкмоль/Дж	2,1
Длина волны, нм.	660

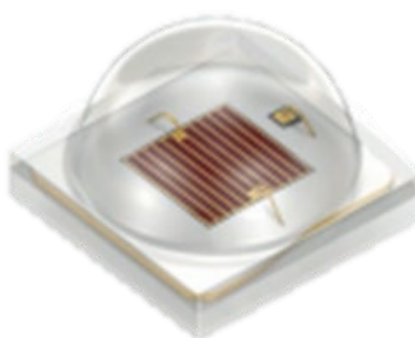


Рисунок 30 - OSLO Square Hyper Red GHSSRM4.24-V7V9-1-1-700-R3 [28].

Данный светодиод глубокого красного спектра (670нм.) имеет формфактор типа 3030. Основные параметры светодиода указаны в таблице № 6.

Таблица №6 – Основные параметры светодиода OSLO Square Hyper Red Red при постоянном токе 0,7А [28].

Параметр	
Потребляемая мощность, Вт	1,47
Прямое напряжение, В	2,1
РРФ, мкмоль/с	5,42
РРЕ, мкмоль/Дж	3,69
Длина волны, нм.	670

Сборка прототипов излучателя проводилась на основе трех типоразмеров корпуса светодиодов, это SMD 2835, SMD 3030, SMD 3535.

3.3.3 Фотометрические измерения излучателя

Для разработки оптической части светодиодного облучателя были проведены фотометрические измерения. По результатам измерений была выявлена наиболее эффективная конфигурация светодиодного излучателя.

Измерения проводились на двухкоординатном гониофотометрическом комплексе с фотометрической головкой ГФ-6-1. Полученные результаты светового потока в фотометрических единицах измерения перевели в энергетические. Перевод осуществляли в программе Matchad 14 по формуле [29]:

$$F_{\Phi AP} = \int_{350}^{800} \frac{E_{\lambda} \cdot \lambda}{h \cdot c \cdot N_A} d\lambda$$

(1)

где $F_{\Phi AP}$ – фотосинтетический поток фотонов, мкмоль/с;

E_{λ} - спектральная плотность распределения энергии излучения прибора, Дж/нм;

λ – длина волны, нм;

h – постоянная Планка;

c – скорость света;

N_A – число Авогадро;

Расчёт квантовой эффективности излучателей в области ФАР производился по формуле [30]:

$$\eta_{\phi} = \frac{F_{\Phi AP}}{P}$$

(2)

где η_{ϕ} – эффективность прибора в области ФАР, мкмоль/Дж;

$F_{\Phi AP}$ – фотосинтетический поток фотонов, мкмоль/с;

P – потребляемая прибором мощность, Вт.

Измерения спектрального состава излучения проводили с помощью спектрометра UPRtek (Тайвань).

Были произведены фотометрические измерения нескольких вариантов разрабатываемого светодиодного излучателя с разным соотношением светодиодов с теплой и холодной цветовой температурой, а также разным количеством красных светодиодов.

Для проведения фотометрических замеров было изготовлено несколько печатных плат. Всего на плате имелось 288 светодиодов.

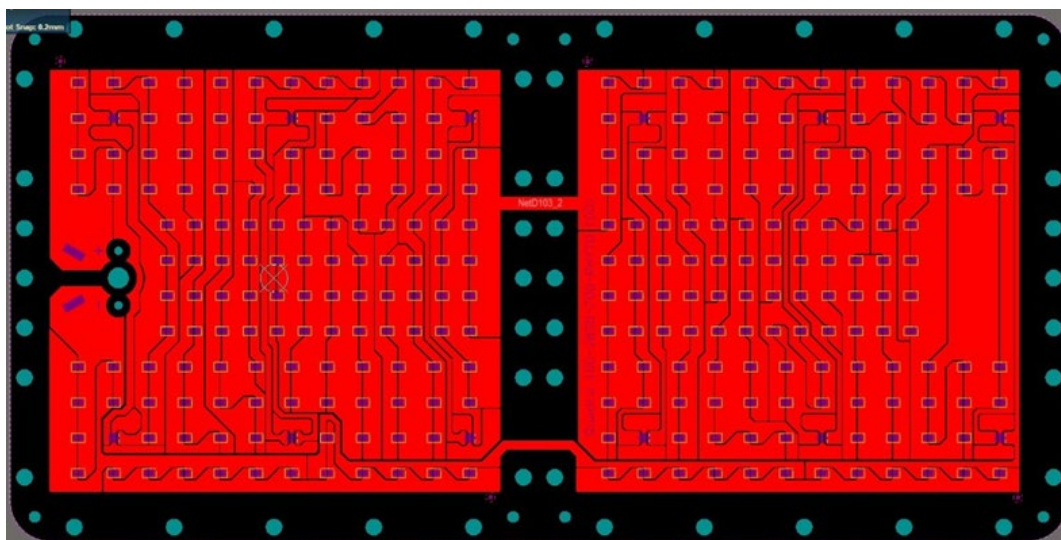


Рисунок 31 – разводка печатной платы.

В излучательном приборе была применена групповая линза НК К60 [31]. Она формировала поток излучения с углом расходимости 55 – 60 град. (см. рисунок 33).



Рисунок 32 – групповая линза НК К60.

Было проведено несколько замеров, с помощью которых был оценен вклад коротковолновой и длинноволновой составляющих спектра ФАР. Предполагалось, что светодиоды, имеющие более низкую цветовую температуру способны испускать большее количество квантов чем те у которых цветовая температура выше. Это связано с тем, что чем ниже цветовая температура, тем сильнее спектральный состав сдвинут в красную область ФАР, при этом снижается плотность синего излучения. Также предполагалось, что красные светодиоды будут служить источником квантов. Меняя их количество в излучательном приборе, можно изменять поток излучения.

Так сначала был собран излучатель на плате, имеющей два вида белых светодиодов (5700К и 3000К) в равных пропорциях и красные светодиоды. Затем были проведены замеры излучателя с такой же платой, но с большим количеством красных светодиодов, при этом уменьшив на такое же количество светодиодов с цветовой температурой 5700К. Далее был проведён замер излучателя с платой, имеющей светодиоды в другом исполнении (SMD2835), но с равным количеством белых светодиодов (5000К и 3500К). Следующий замер заключался в выявлении влияния спектра светодиодов с температурами 5000К и 3500К на величину потока ФАР. При этом на плате отключали те или иные группы светодиодов. Затем была собрана оптимальная

сборка на белых светодиодах 5000К LM281B+ [24] и красных OSLOON Square Hyper Red GHCSSRM4.24-V7V9-1-1-700-R3 [28]

Образец 1 имел светодиоды Samsung LM301B+ [25] с двумя цветовыми температурами 5700К и 3000К в равных пропорциях, в количестве 132 шт. каждой цветовой температуры. Красных светодиодов Prolight H2 650-660nm [26] в корпусе 3030 с длиной волны 660нм было установлено 24 штуки.

Образец 2 имел светодиоды Samsung LM301B+ [25] с двумя цветовыми температурами 5700К и 3000К. В данном прототипе было увеличено количество красных светодиодов. При этом на такое же количество светодиодов с цветовой температурой 5700К было меньше. В данном эксперименте исследовался вклад коротковолновой области ФАР в величину потока квантов. Так как по закону Планка красное излучение несёт большее количество квантов в расчёте на 1Дж, то предположительно ожидалось увеличение потока. Таким образом светодиодов Prolight H2 650-660nm [26] было 36шт., светодиодов с цветовой температурой 5700К было 120 шт., а с цветовой температурой 3000К было 132 шт.

Образец 3 имел более бюджетные светодиоды Samsung LM281B+ [24] с цветовой температурой 5000К и 3500К в равных пропорциях, в количестве 132 шт. каждой цветовой температуры и 24 красных светодиода 2835RST-02V150 [27] в корпусе 2835 с длиной волны 650-665нм.

Образец 4 имел плату со светодиодами LM281B+ [24] с цветовой температурой 5000К в количестве 138 штук, а также 24 красных светодиода OSLOON Square Hyper Red [28]. При этом мощность излучателя составила 58,6Вт, так как группы светодиодов с цветовой температурой 3500К были отключены.

Образец 5 имел плату со светодиодами LM281B+ [24] с цветовой температурой 3500К в количестве 138 штук, а также 24 красных светодиода OSLOON Square Hyper Red [28].

Образец 6 имел светодиоды Samsung LM281B+ [24] с одной цветовой температурой 5000К, в количестве 264 шт., а также красные светодиоды Osram

OSLON Square Hyper Red [28] в корпусе 3535 с длиной волны 665нм в количестве 12 шт.

Результаты измерений светодиодных излучателей были занесены в таблицу №3.

Таблица №7 Сравнение оптических и электрических параметров светодиодных излучателей.

Параметр	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4	Образец 5	Образец 6
Потребляемая мощность, Вт	96,19	95,14	98,85	58,6	58,98	103,5
Световой поток, лм	14806	14140	13771	8244	7578	14656
Световая отдача, лм/Вт	154	149	139	141	128	142
Энергетический поток, Вт	48,54	47,18	44,5	30,2	27,458	49,8
Поток фотосинтетически активной радиации (PPF), мкмоль/с	223,57	224	211	143,7	136,1	232,4
Квантовая эффективность, мкмоль/Дж	2,32	2,35	2,13	2,45	2,31	2,25

В результате фотометрических измерений были получены КСС излучателей и поток излучения излучателей.

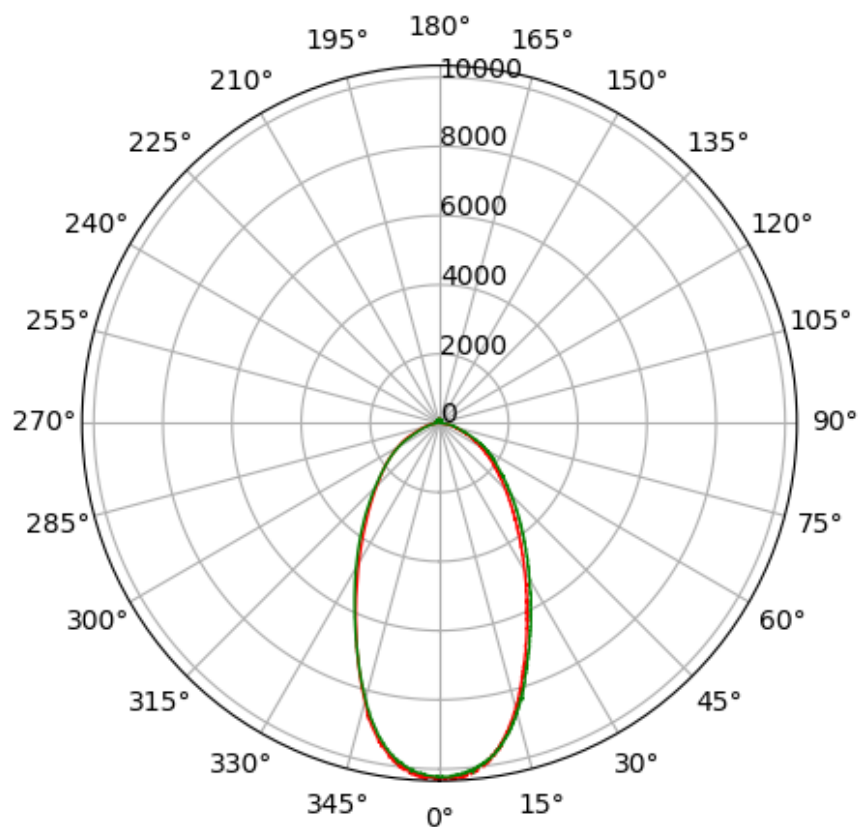


Рисунок 33 – пространственное распределение излучения при использовании линзы К60.

На рисунке 34 показан спектральный состав излучения светодиодных излучателей.

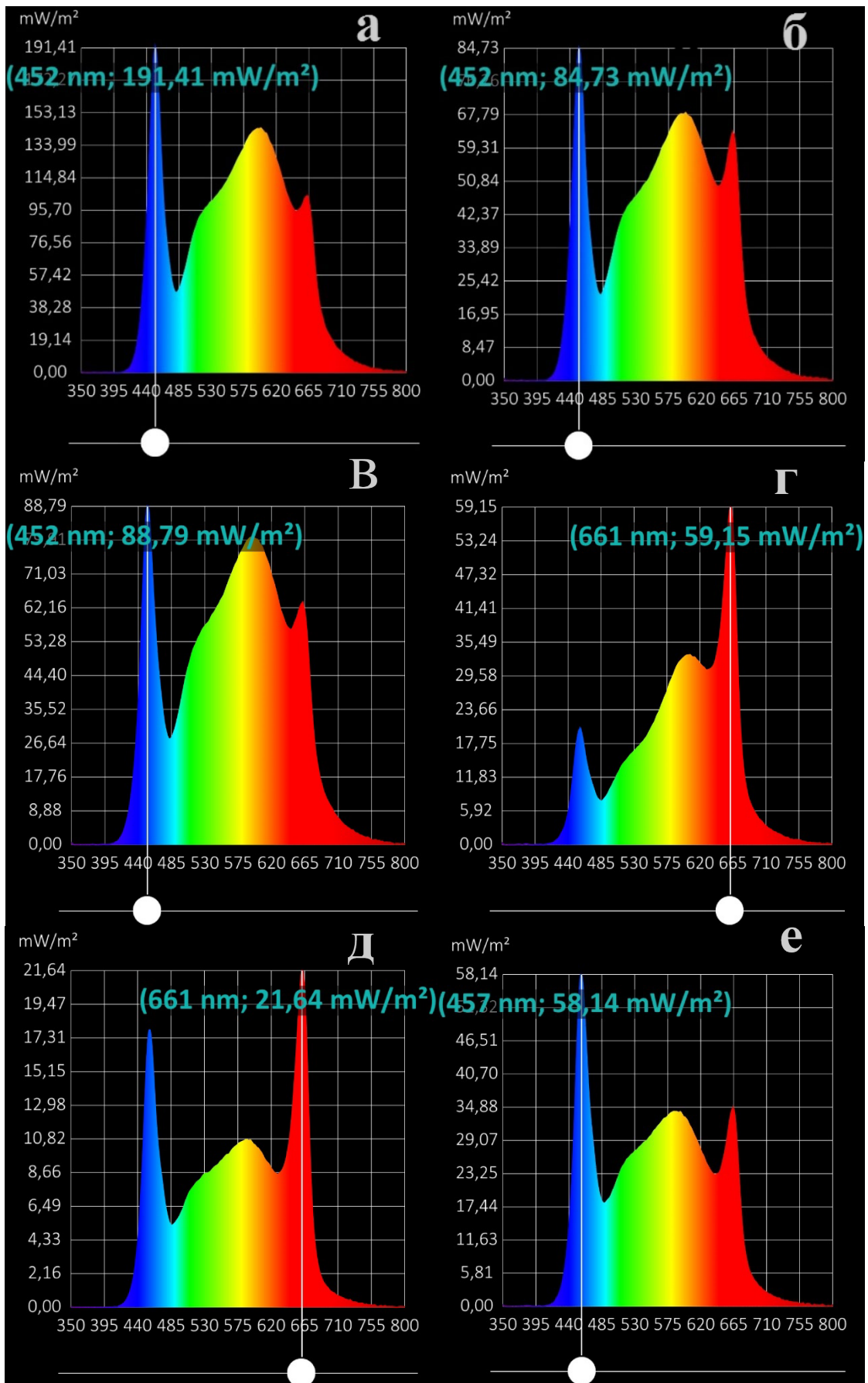


Рисунок 34 – спектральный состав излучателей. (а – образец №1, б - образец №2, в - образец №3, г - образец №4, д - образец №5, образец №6)

Видно изменение спектрального состава при различных комбинациях светодиодов и их соотношения.

В результате замеров было выявлено, что увеличение количества красных светодиодов повышает квантовую эффективность излучателя. Это связано с тем, что испускается большее количество квантов. Однако поток излучения увеличивается несущественно, это в свою очередь связано с тем, что белый светодиод имеет в основе синий кристалл, падение напряжения на котором составляет 3В, а красный кристалл потребляет всего 2,1 В, таким образом общая мощность ниже и соответственно поток излучения практически не изменяется. Так квантовая эффективность образца №1 равняется 2,32 мкмоль/Дж, а образца №2 2,35 мкмоль/Дж. Также в результате измерений было обнаружено, что белые светодиоды с цветовой температурой 5000К являются более эффективными, несмотря на спектр, смещённый в синюю область. Так образец №4 имеет квантовую эффективность 2,45 мкмоль/Дж, а образец № 5 2,31 мкмоль/Дж. Это объясняется тем, что светодиоды с более низкой цветовой температурой имеют большую концентрацию частиц люминофора, а это в свою очередь увеличивает потери. Также в результате измерений было выявлено, что светодиоды LM301В [25] являются более эффективные чем LM281В+ [24].

Далее были проведены измерения газоразрядной натриевой лампы ДНаЗ «Reflux» [32]. Результаты измерений натриевой лампы сравнивались с результатами светодиодного излучателя, который имеет наибольший поток излучения. Результаты представлены в таблице №4 для сравнения. Так как светодиодный излучатель имеет модульную конструкцию, то его можно собирать в сборки с необходимой мощностью.

Таблица №8 – сравнение параметров светодиодного излучателя и ДНаЗ с пересчётом мощности.

Параметр	Образец 6	Пересчёт	ДНаЗ «Reflux»
Потребляемая мощность, Вт	103,5	724,5	745
Световой поток, лм	14656	102592	83916
Световая отдача, лм/Вт	142	142	113
Энергетический поток, Вт	49,8	348,6	273,92
Поток ФАР, мкмоль/с	232,4	1626,8	1414
Квантовая эффективность, мкмоль/Дж	2,25	2,25	1,9
Угол раскрытия потока излучения, град.	58x56°	58x56°	145x99°
Цветовая температура, К	5006	50006	2064
Индекс цветопередачи	90,2	90,2	50,3

Светодиодный излучательный прибор имеет эффективность выше на 16%, чем ДНаЗ. Но при этом соотношение потока ФАР и энергетического потока у ДНаЗ выше, это говорит о том, что большая часть излучения участвует в процессе фотосинтеза. Это связано с тем, что у ДНаЗ основная часть спектра находится в красной области. Таким образом светодиодный излучатель является более эффективным, однако при этом не вся часть этого излучения способствует увеличению количества квантов в потоке. Такой же эффект наблюдался при сравнении образца №1 и №2, когда у второго образца энергетический поток снизился при этом поток ФАР увеличился.

Таким образом сдвигая спектральный состав в красную область, можно добиться большего соотношения энергетического потока и потока ФАР, однако необходимо соблюдать баланс как в энергетическом плане, так и в экономическом, так как красные светодиоды имеют меньшую мощность и прибор может получиться маломощным при этом имея сравнительно большие габариты, а также красные светодиоды более дорогие.

3.3.4. Устройство излучательного прибора

Излучатель был выполнен на основе платы с максимальным потоком ФАР.

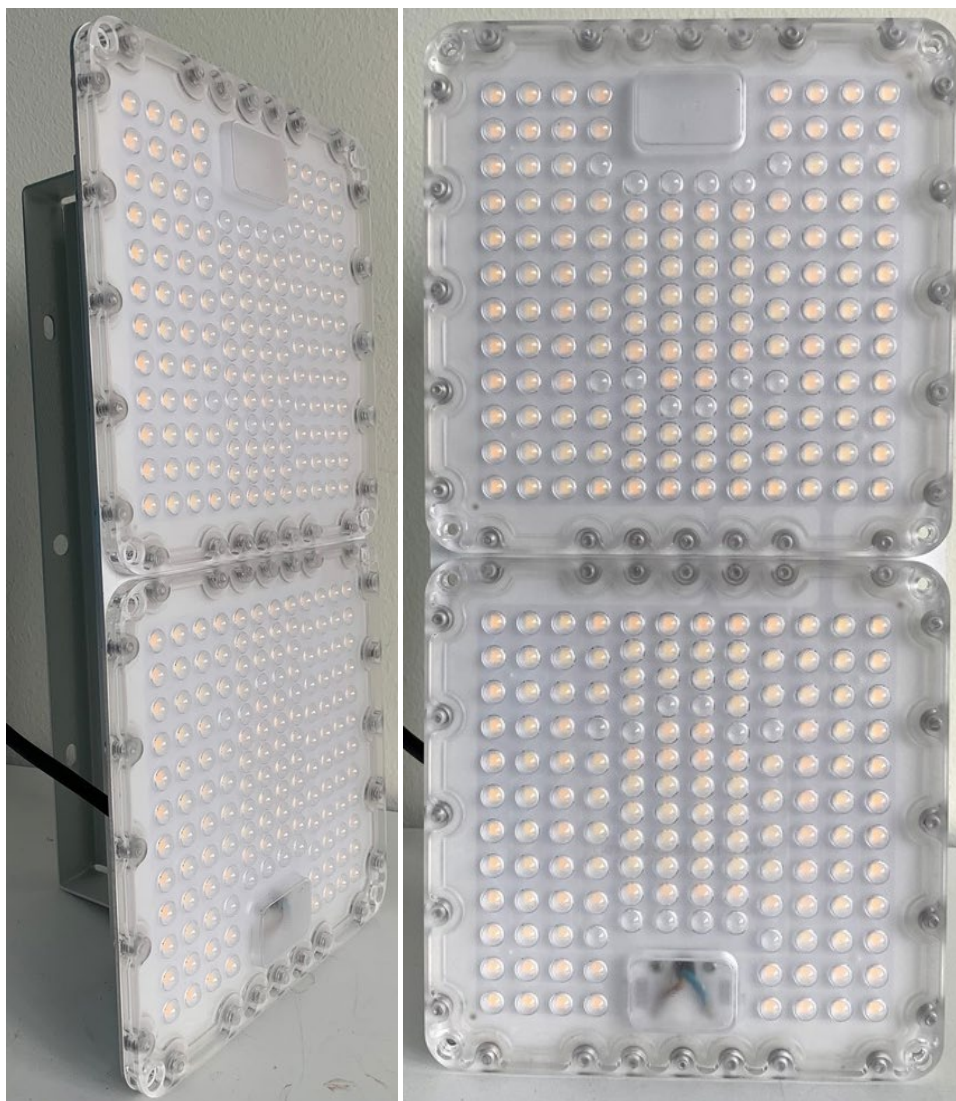


Рисунок 35 – Внешний вид реального прототипа разработанного светильника для растениеводства.

Излучательный прибор имеет алюминиевую плату с толщиной 3мм. За счёт своей площади и толщины, плата одновременно является корпусом и радиатором излучателя. Габаритные размеры прибора ДхШхВ: 390x195x70мм. Излучатель имеет кронштейн для монтажа, к которому присоединен драйвер.

Излучатель имеет 46 групп белых светодиодов с цветовой температурой 5000К. В одной группе 6 светодиодов соединённых параллельно. Между собой группы соединяются последовательно. Также излучатель имеет 6 групп красных светодиодов (660нм.), в группе по два

светодиода, которые соединены параллельно. Схема подключения светодиодов представлена на рисунке 36.

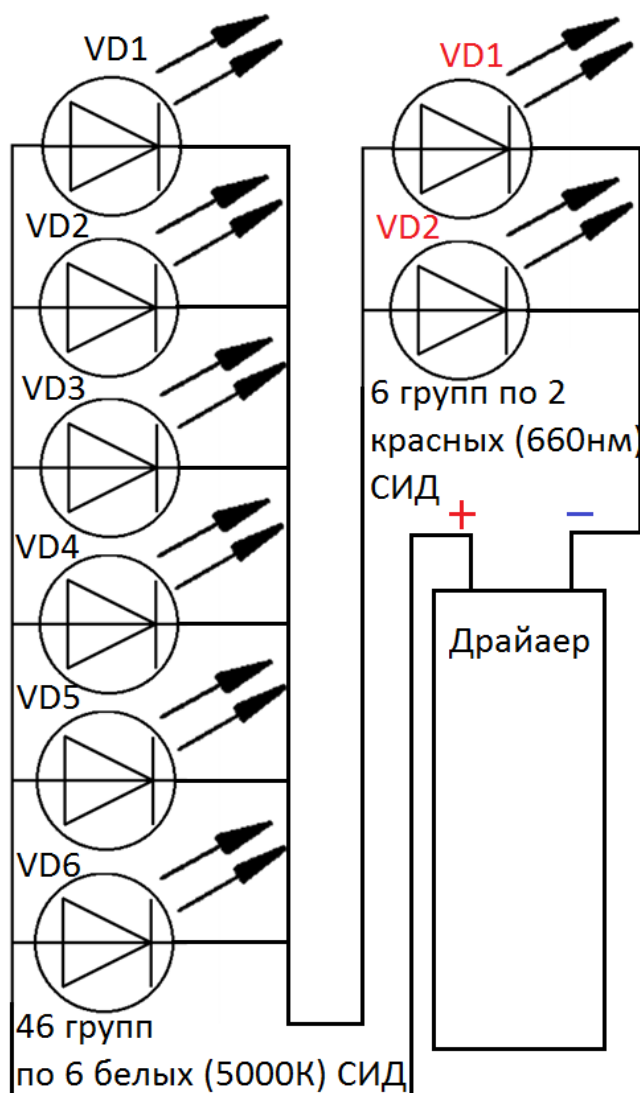


Рисунок 36 – схема подключения светодиодов.

Общее прямое напряжение равняется 150В. Сила тока питания всей платы равняется 700мА.

Исходя из электрических параметров питания был подобран драйвер. В излучателе применялся драйвер Philips Xitanium [33] см. параметры в таблице №5.



Рисунок 36 – корпус драйвера [33].

Таблица №9 – основные параметры драйвера.

Параметр	Паспортное значение
Мощность макс, Вт	150
Ток макс, мА	700
Напряжение вых, В	96-214
КПД, %	92

Были отобраны светодиоды для обеспечения необходимого спектрального состава, а также определено их соотношение для обеспечения наибольшей эффективности. Комбинации светодиодов были апробированы на базе существующего коммерческого светильника. Была выбрана наиболее эффективная комбинация. Таким образом были определены оптические и электрические параметры разрабатываемого излучателя, которые представлены в таблице №6.

Таблица №10 – электрические и фото-радиометрические параметры излучателя.

	Образец 1	
Электрические параметры	Напряжение сети, В. F= 50 Гц	230
	Потребляемая мощность, Вт	103,5
	Пусковой ток, А	0,7
	Потребляемый ток, А	0,454
	Коэффициент мощности, Pf	0,989
	Время выхода на рабочий режим, мин.	60
	Температура корпуса (max), °C	62
	Температура источника питания (max), °C	49
	Коэффициент пульсаций, %	3
Световые параметры	Световой поток, лм	14656
	Световая отдача, лм/Вт	142
	Энергетический поток, Вт	49,8
	Поток фотосинтетически активной радиации (PPF), мкмоль/с	232,4
	Квантовая эффективность, мкмоль/Дж	2,246
	Плотность фотосинтетического потока фотонов на расстоянии 1м (PPFD), мкмоль/с·м ²	-
	Максимальная сила света, кд (угол, град) , (плоскость)	11013 (0°) (Для всех)
	Угол раскрытия потока излучения, град.	54x53°
	Цветовая температура, К плоскость.	5004
	Индекс цветопередачи	90,2
Прочее		

Заключение

В данной работе были проведены исследования, позволяющие разработать облучательный прибор. Было выявлено, что сдвиг в красную область в спектре ФАР способствует увеличению площади листьев и длины побега растения. Прирост длины составил в среднем 15%, а прирост площади листьев в среднем 11%. Также увеличение уровня облучённости способствует увеличению длины побега в среднем на 30% и увеличению площади листьев в среднем на 40%.

Согласно исследованиям, были подобраны светодиоды разных корпусов и от разных производителей. Необходимо было провести фотометрические исследования излучательной части прибора, для определения максимально эффективной конфигурации. Так в результате исследований было выявлено, что красные светодиоды способствуют увеличению эффективности, однако за счёт меньшей мощности излучательный прибор испускает меньше квантов в пересчёте на габариты прибора. Так при добавлении красных светодиодов эффективность выросла с 2,32 до 2,35 мкмоль/Дж, при этом поток излучения практически не увеличился. Также были проведены исследования о влиянии коротковолновой и длинноволновой области ФАР на величину потока ФАР. Так в результате измерений было выявлено, что белые светодиоды с цветовой температурой ниже 5000К испускают меньшее количество квантов, несмотря на их спектральный состав, который смещен в красную область. Так образец излучателя, имеющий только белые светодиоды с цветовой температурой 5000К обладал эффективностью 2,45 мкмоль/Дж, а образец с цветовой температурой 3000К всего 2,31 мкмоль/Дж. Это связано с тем, что чем ниже цветовая температура, тем больше светопреобразующих частиц в люминофоре светодиода, а также толще слой люминофора, что приводит к потере оптического излучения.

В итоге была выбрана оптимальная конфигурация излучателя. Она имела максимальный поток ФАР при этом имея высокую эффективность. В разработанном излучателе соблюден баланс между величиной потока излучения и эффективностью.

4 Раздел ВКР «Концепция стартап-проекта»

4.1 Описание услуги как результата ВКР

Плотность населения городов России растет с каждым годом, что приводит к нехватке продуктов питания и их удорожанию. В городских условиях выращивание культурных растений усложняется ограниченным количеством посадочных площадей, а также их стоимостью. Не каждый может позволить себе аграрные участки в городской черте. В тоже время невозможность выращивания растений в зимнее время или же в регионах с холодным климатом приводит к подорожанию продуктов. Согласно структуре рынка 60 процентов продуктов ввозится из-за границы, а цена этих продуктов сильно завышается за счет затрат на логистику.

Из-за нехватки свежих овощей и фруктов в рационе население страдает от дефицита полезных микроэлементов и витаминов. Согласно исследованиям РАН, человек в среднем должен потреблять от 300 до 800 грамм овощей и зелени каждый день. Однако среднестатистический россиянин не съедает и половины от рекомендованного количества овощей и зелени.

Домашние эргономичные фитошкафы (гроубоксы) позволяют выращивать зеленый лук, базилик, салат и множество других видов микрозелени и даже некоторых овощей у себя дома круглый год.

Благодаря встроенным светильникам с необходимыми оптическими параметрами, а также гидропонной установке можно воссоздать необходимые условия для выращивания тех или иных растений. Использование данных установок позволяет выращивать овощные культуры в закрытом грунте круглый год и непосредственно рядом с потребителем. Выращивание микрозелени и некоторых овощей у себя дома позволит в значительной мере снизить ущерб от недостатка витаминов и полезных микроэлементов у населения.

Результатом ВКР является светодиодный светильник для растениеводства. По результатам исследований в рамках ВКР были рассчитаны необходимые параметры излучения для эффективной

культивации растений. Затем была разработана оптическая часть, которая была интегрирована в коммерческий светильник Quadro [23] совместно с компанией АО «Физтех-Энерго» [34] г. Томск.

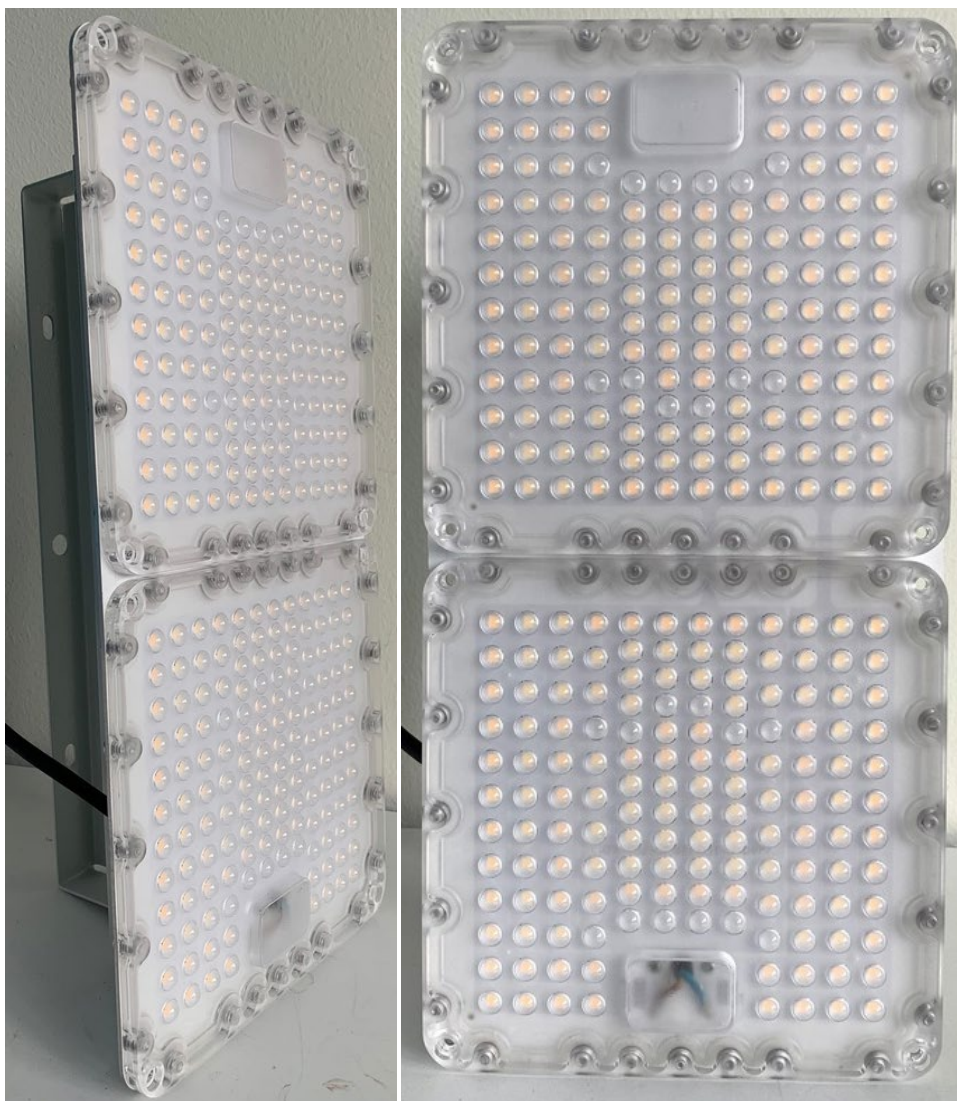


Рисунок 37 – Реальный прототип разработанного светильника для растениеводства.

Данный светильник подходит для применения в фитотронных установках, гроубоксах, теплицах, а также для домашнего использования. Планируется применить разработанный светильник в конструировании домашнего фитошкафа.

4.2 Основные качества продукта, решаемая продуктом проблема

Овощи и свежая зелень очень важная часть рациона человека. Для нормального функционирования пищеварительной системы необходимо не только соблюдать баланс белков, жиров и углеводов, но и потреблять достаточное количество клетчатки. Источником клетчатки в рационе служат овощи и различная зелень. В журнале «ЗОЖНИК» диетолог Вероника Порсина приводит примеры овощей, которые помогают пищеварительной системе справляться с процессами пищеварения. Так для поддержания нормальной работы желудка и кишечника необходимо иметь в рационе такие растения как базилик, петрушка, фенхель, листья пажитника и зелень укропа [35].

Многие овощи не всегда доступны в магазинах, например, свежие листья базилика или редкие сорта салата. При этом рентабельность выращивания базилика и салата в домашних условиях может составлять от 30% и выше [36]. А также с ростом цен среднестатистический россиянин все реже позволяет себе покупать свежую зелень, хотя согласно рекомендациям союза диетологов РФ, зелень должна присутствовать в рационе каждый день [37].

Чтобы проработать данную концепцию стартап-проекта и полностью понять «боль» клиента был проведен опрос по методу Customer Development. Были заданы вопросы, позволяющие понять: как часто люди покупают себе зелень в магазинах, испытывают ли они недостаток свежей зелени в рационе и вообще хотели бы они иметь свежую зелень круглый год. В опросе приняло участие более 100 человек.

По результатам опроса было выявлено, что более 38% опрошенных испытывают нехватку зелени в рационе. При этом более 48% людей не испытывают недостатка. Можно предположить, что эти люди либо имеют достаточно средств для каждодневной покупки необходимого количества

зелени или же не следят за питанием. Таким образом можно считать, что достаточно большому числу людей не хватает зелени в рационе.

Испытываете ли Вы нехватку свежей зелени в своем рационе питания?
104 ответа

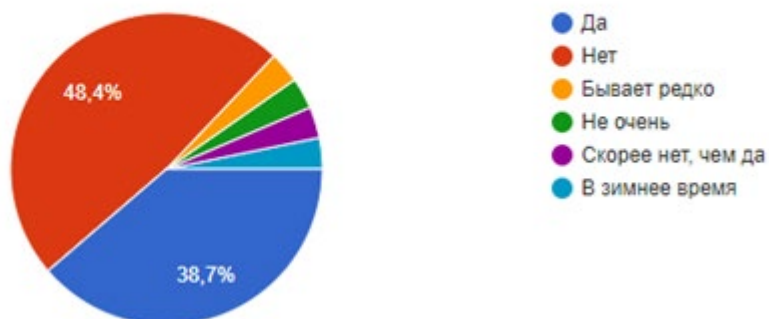


Рисунок 38 – Процентное соотношение людей, испытывающих нехватку свежей зелени в рационе

Также по результатам опроса было выявлено, что более 87% людей хотели бы иметь круглый год свежую зелень в рационе, а 71% людей хотели бы отказаться от покупной зелени. При этом более 56% людей покупают зелень еженедельно.

Хотели бы иметь свежую зелень (укроп, петрушку, салат) круглый год?
104 ответа

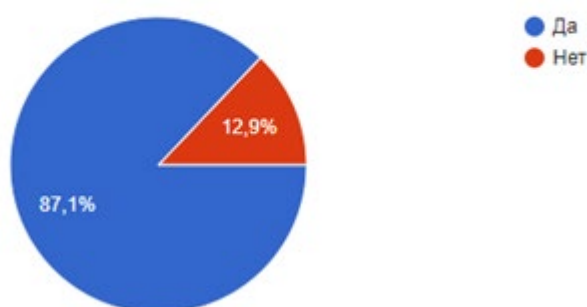


Рисунок 39 – Доля людей, желающих иметь свежую зелень круглый год

Готовы ли Вы отказаться от покупной зелени?

104 ответа

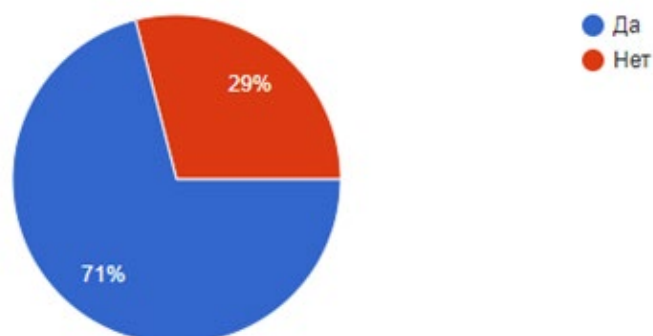


Рисунок 40 – Доля людей, готовых отказаться от покупной зелени

Как часто покупаете свежую зелень (укроп, петрушку, салат) в магазине:

104 ответа

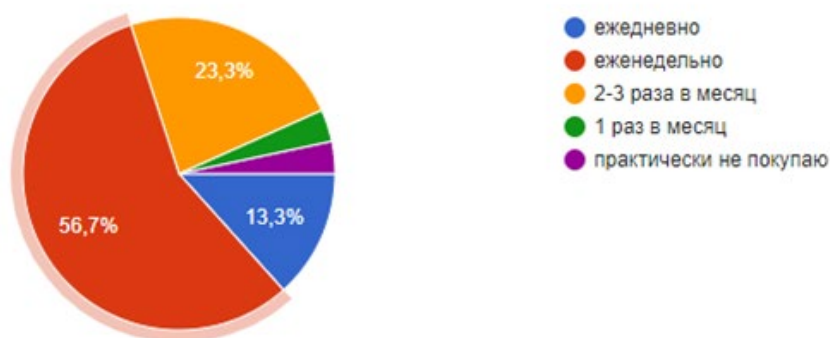


Рисунок 41 – Распределение людей по частоте закупки зелени

Исходя из полученных данных, можно определить, что разрабатываемый фитошкаф позволит обеспечить людей свежей зеленью на целый год.

С учетом того, что большинство опрошенных людей покупают зелень раз в неделю, то разрабатываемый фитошкаф с полезной площадью 1 м^2 обладает достаточной производительностью, чтобы обеспечивать четырёх людей свежей зеленью раз в неделю. Таким образом, данный фитошкаф может удовлетворить потребность в зелени среднестатистического человека.

4.3 Целевые сегменты потребителей создаваемого продукта

Принимая во внимание проведённый опрос, а также проблему, которая решается разрабатываемым продуктом, можно определить, что рынок, на который направлен разрабатываемый продукт, является рынок В2С.

Основным сегментов данного рынка будут граждане в возрасте от 30 до 45 лет. Это обусловлено тем, что, как правило, граждане в возрасте от 30 до 45 лет уже имеют собственное жилье или же постоянное место жительства на срок не менее 5-10 лет. Также граждане в таком возрастном диапазоне имеют достаточную заработную плату, чтобы позволить себе приобрести фитошкаф или подобное техническое устройство стоимостью от 20 до 45 тыс. руб. При этом данные граждане имеют семью в среднем от двух до четырех человек.

Таким образом портрет потребителя — это городской житель в возрасте от 30 до 45 лет, имеющий семью и работу.

Также данное устройство будет интересно преимущественно тем людям, кто следит за здоровьем и своим питанием, придерживается правильного питания или придерживается типа питания «Вегетарианство», где в рационе в большинстве своем растительная пища.

4.4 Объем и ёмкость рынка

Расчёт ёмкости рынка проводился по методу «снизу – вверх». Для анализа и на первом этапе выхода на рынок был взят рынок города Томска.

Численность потенциальной аудитории складывается из людей в возрасте от 30 до 45 лет. Эти граждане имеют семью от двух до четырех человек, будем считать, что в семье в среднем три человека. По данным РОСТСТА в г. Томске в данном возрастном диапазоне проживает 212164 человека, это 70721 семья или соответствующее количество единиц продукции [38].

Для расчёта численности фактической аудитории был проведен опрос людей в возрасте от 30 до 45 лет. Согласно опросу 50% людей испытывают

нехватку зелени в своем рационе, таким образом можно предположить, что фактическая аудитория будет составлять 35360 единиц продукта.

Для расчёта достижимого объёма рынка был также проведен опрос. Беря во внимание ответы опрошенных людей, можно предположить, что 32% людей готовы купить данный продукт. Таким образом достижимый объём рынка в г. Томск насчитывает 11315 единиц продукта.

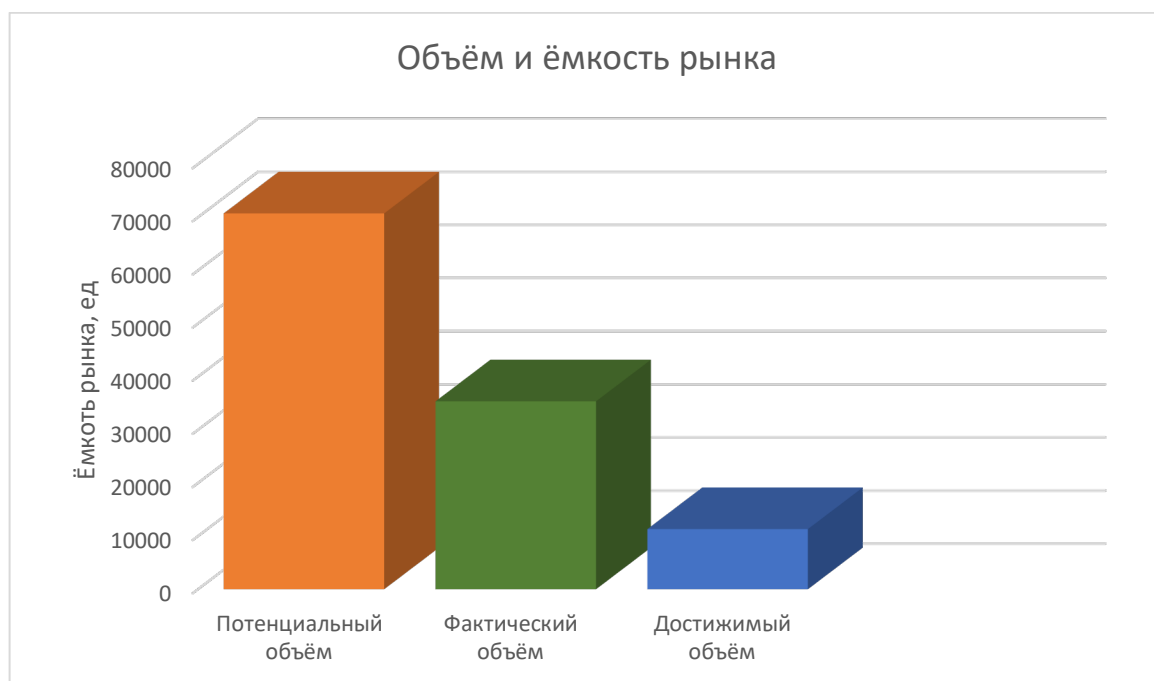


Рисунок 42 – Объём рынка, представленный в единицах производимого продукта.

4.5 Анализ современного состояния и перспектив отрасли

В настоящее время рынок осветительных приборов для растениеводства активно развивается. С каждым годом популярность искусственного освещения растений растёт. Появляются новые светильники различных конфигураций, начиная от маломощных ламп с цоколем E27 и заканчивая полноценными осветительными приборами повышенной мощности с системой подвеса и вторичной оптикой. Светильники для растениеводства стали доступны широкому пользователю и теперь их можно купить не только в специализированных магазинах, но и в любом хозяйственном магазине. Так в 2019 г. было произведено светодиодных

светильников 2,2 тыс. шт. на сумму 8,1 млн. руб. Импорт светодиодных светильников составил 134,6 тыс. шт. на сумму 2252,2 млн. руб [39].

Следующий шаг развития отрасли – это производство готовых комплексов для выращивания зелени и овощей в домашних условиях. Данные комплексы будут иметь систему освещения с необходимыми параметрами и гидропонную систему автоматического полива. Все это будет размещено в компактном и эргономичном корпусе. Так пользователю не нужно будет подбирать осветительный прибор, а вероятность ошибки сводится к нулю, так как все необходимые параметры излучения будут рассчитаны и подобраны для определенного домашнего фитошкафа. Таким образом, эффективность выращивания будет выше, нежели подбирать светильник самостоятельно и конструировать установку для выращивания своими руками.

С появлением доступных фитосветильников начало набирать популярность такое направление как ситифермерство. Стали появляться различные форумы, которые посвящены способам выращивания растений в домашних условиях, люди стали больше узнавать про особенности домашнего садоводства. А также согласно данным ООН, 600 крупнейших городов мира приходится более половины мирового валового продукта. По тем же данным, традиционное сельское хозяйство уже с трудом справляется с задачей обеспечения городов продовольствием и нуждается в дополнении [40]. А в России на 2017 г. к городским жителям были 75% населения страны [41], это число будет неуклонно расти. Так, согласно данным оценкам, можно предположить, что рынок домашнего растениеводства будет также расти.

4.6 Расчет стоимости продукта

Конечная стоимость продукта будет зависеть от комплектующих, из которых будет изготовлен фитошкаф, так как дизайн самого шкафа потребитель может выбрать для себя сам в зависимости от своих предпочтений и дизайна своей кухни.

Представим расчет расходов на изготовление стандартного шкафа с габаритными размерами 400x400x500мм и стандартного ЛДСП. В табл. 1 представим затраты на комплектующие изделия для изготовления шкафа.

Таблица 11 – Стоимость комплектующих изделий для изготовления фитошкафа

Наименование	Цена (руб.)	Кол – во	Итого (руб.)
ЛДСП 10мм	322	1,8 м ²	580
Насос	650	1 шт.	650
Трубка гибкая 4мм	39	2 м.	78
Поддон с лотками	500	2 шт.	1000
Крепежные элементы	1	16 шт.	16
Светильник	4000	1 шт.	4000
Стеклопанель дверца	1100	1 шт.	1100
Упаковка	80	1 шт.	80
Итого:			7424

С учетом договора о поставке светильников нашего партнера «ФизТехЭнерго», стоимость освещения можно снизить.

Проанализируем план доходов (таблица 4). Считая, что в первом квартале будет упор на разработку первого фитошкафа, где необходимо будет приобрести все комплектующие и вспомогательные материалы, а также разработать систему полива и настроить её. На реализацию первого фитошкафа будет затрачено около 3 недель. Затем в первый месяц будет выпущено 5 фитошкафов, один из которых будет использоваться для демонстрации на различных выставках, а также для портфолио и рекламы. Планируемая стоимость продукта 25000 рублей, исходя из анализа рынка.

Для сборки фитошкафа планируется привлекать работников на базе АО «Физтех-Энерго», будем считать, что 20% от стоимости готового продукта пойдет в выручку предприятия. Общие переменные затраты на единицу продукции представлены в таблице 2.

Таблица 12 - Переменные затраты на единицу продукта

Затраты	Руб.	%
Затраты на материалы	7424	55,3
Затраты на оплату труда	5000	37,2
Прочие	1000	7,4
Итого	13424	100

Постоянные затраты составят за месяц 67120 рублей.

Также необходимо создать сайт продукта (10000 рублей). Прочие постоянные текущие затраты представлены в таблице 3, для и рекламы и обслуживания сайта.

Таблица 13 - Прочие постоянные текущие затраты

Наименование	Сумма, руб	Итого, руб
Таргетированная реклама	5 000	5 000
Обслуживание веб-сайта	1 000	1 000
Прочие затраты	5 000	5 000
ИТОГО		11 000

План дохода и расходов, а также расчет прибыли представлен в таблице 4. Затраты на запуск проекта будут составлять 88120 рублей.

Таблица 14 - План доходов, единица измерения – тыс.руб

№	Показатель / месяц	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Объем продаж		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
2	Выручка	0	125	250	375	500	625	750	875	1000	1125	1250	1375	1500
3	Текущие переменные затраты	-	13,424	26,848	40,272	53,969	67,120	80,544	93,968	107,4	120,8	134,2	147,7	161
4	Маржинальная прибыль	-	111,5	223,1	334,7	446	557,5	669	780,5	892	1003	1115	1226,5	1338
5	Постоянные текущие затраты	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
6	Прибыль от продаж (операционная прибыль)	0	100,5	201	301,5	402	502,5	603	703,5	804	904	1005	1105,5	1206

4.7 Конкурентные преимущества продукта и обзор технико-экономических характеристик аналогов

Разрабатываемый домашний фитошкаф будет иметь эффективный фито излучатель. Фито излучатель, разработанный в рамках ВКР, имеет ряд качеств, определяющих эффективность и технологичность в использовании для растениеводства. Излучатель обладает эффективным режимом облучения, в качестве источников излучения используются светодиоды, излучатель имеет высокий КПД больше 60%. Корпус излучателя имеет следующие габариты: 195x390x65 мм., благодаря небольшой толщине излучатель очень легко может быть интегрирован в компактный гроубокс или фитошкаф. Так фитошкаф будет обладать эффективным режимом облучения, необходимым для развития различных видов растений. Большинство фитосветильников, представленных на рынке, имеют несбалансированный спектральный состав. Чаще всего спектр сформирован красными и синими светодиодами с длиной волны 630 и 430нм соответственно. Также данные светильники обладают малой мощностью излучения недостаточной для обеспечения процессов фотосинтеза растений.

В фитошкафе будет реализована система автоматического полива на основе гидропоники. Будут иметься локти с несколькими отверстиями под горшки с грунтовым субстратом. Основа с лотками будет выдвижная, для удобства в использовании и обслуживании фитошкафа, а также удобного сбора урожая. Гроубоксы, производящиеся в России зачастую имеют наипростейшую конструкцию. Чаще всего это ящик с установленным внутри фитосветильником и такая конструкция не имеет опции автополива.

Преимущества разрабатываемого фитошкафа перед большинством подобных решений, имеющихся на рынке, заключается в эффективном освещении, а также в автономности. Также в будущем планируется интегрировать управление микроклиматом с помощью приложения для телефона.

Примеры аналогичных решений для домашнего растениеводства:

1. Фитобокс от фирмы Fitonice г. Москва. Данная установка имеет компактный эргономичный дизайн. Позволяет выращивать микрозелень и овощи такие как помидоры черри и другие миниатюрные сорта овощей. Есть возможность настройки микроклимата и параметров освещения через приложение для смартфона [42].



Рисунок 43 – Внешний вид фитобокса [42].

2. MioBio оснащён собственной системой, контролирующей микроклимат внутри каждого отсека в шкафу, которая обеспечивает наиболее оптимальную влажность, температуру и вентиляцию для тех продуктов, что выращиваются на каждой из полок. Это позволяет одновременно высаживать в нём различные продукты с разными требованиями к климатическим условиям. Имеется система искусственного освещения: цветовой спектр ламп подобран наиболее подходящий для данной цели. Системой автоматического микрокапельного полива доставляется необходимое количество питательных веществ и влаги к корням высаженных растений [43].



Рисунок 44 – Домашняя установка для выращивания зелени и овощей MioBio [43].

3. Green Bar российская компания по производству стеллажей и витрин для ситифермерства. Компания предлагает широкий выбор готовых решений. Продукт компании имеет всевозможные технологические решения для обеспечения эффективного развития растений, такие как настройка спектра излучения, автоматический полив, дистанционное управление микроклиматом через приложение [44].



Рисунок 45 – Фито витрина для ситифермерства от Green Bar [44]

4. Компания GrowIt г. Москва. Данная фирма производит фитостеллажи с облицовкой из МДФ. Данные стеллажи можно заказать в нескольких размерах. Размеры от 90см до 240см в высоту и с шириной от 50см до 188см [45].



Рисунок 46 – Внутреннее устройство и внешний вид домашних оранжерей от GrowIt [45].

Сравнение основных параметров имеющихся на рынке решений с разрабатываемым фитошкафом представлено в таблице 5.

Таблица 15. – Основные параметры фитошкафов и подобных решений

Параметр	Наименование продукта				Разрабатываемый фитошкаф
	Fitonice	MioBio	Green Bar	GrowIt	
Размер, мм/производительность	422x395x770/ два стеллажа	2200x600x400 / четыре стеллажа	1000x1000x2500/ три стеллажа	1000x500x1050/ три стеллажа	400x400x500/ два стеллажа
Наличие автополива	+	+	+	-	+
Тип освещения	LED	LED	LED	LED/ДНаТ	LED
Настройка спектра	+	+	+	-	+
Управление микроклиматом	Возможность дистанционного управления микроклиматом	Наличие нескольких программ сценария выращивания ; настройка	Настойка параметров освещения через приложение	Отсутствует	Отсутствует

		параметров микроклимат а через приложение			
Потребляемая мощность, Вт	60	-	200	30 - 200	105 (в среднем)
Цена, руб	73000	Договорная	730000	25000	25000

Каждый из рассмотренных продуктов имеет свои особенности и преимущества. Например, настройка спектра излучения и дистанционное управление являются очень удобными инструментами для эффективного выращивания в домашних условиях, однако такая функция существенно удорожает конечный продукт. Так, например девайсы от Fitonice и Green Bar имеют высокую стоимость.

Также немаловажным аспектом является дизайнерские качества устройства. Несмотря на красивый внешний вид устройств от Green Bar и Fitonice, они все же будут выбиваться из интерьера. Таким образом главное преимущество разрабатываемого фитошкафа заключается в встраиваемом дизайне устройства. Клиент может заказать дизайн фитошкафа и встроить его в интерьер. Также использование фасадов из ламинированного МДФ позволяет изготавливать фитошкафы любой расцветки. Таким образом фитошкаф может послужить элементов интерьера.

4.8 Бизнес-модель проекта

Чтобы объяснить и показать устройство работы бизнес-модели была приведена концепция функционирования бизнес-модели по А. Остервальдеру [46], которая позволяет отразить ключевые моменты и описать принцип работы бизнес-модели.

Ключевыми блоками данной модели являются следующие блоки:

1) Информация о ключевых партнерах. В данной ячейке описываются все необходимые посредники для осуществления работы бизнеса.

2) Информация о видах деятельности. Здесь описывается то, чем будет заниматься компания для достижения прибыли и для обеспечения своей жизнедеятельности.

3) Информация о ценностных предложениях. Данная ячейка отражает список товаров и услуг, которые будет предоставлять компания для определенного потребительского сегмента

4) Информация о взаимоотношениях с потребителем. В данной ячейке представлена информация о том каким образом компания будет предоставлять свои услуги потребителю.

5) Информация о потребительских сегментах. В данной ячейке представлены примеры потребителей, на которых ориентирована компания или её продукт.

6) Информация о ключевых ресурсах. В данной ячейке описаны всевозможные ресурсы, необходимые для функционирования бизнес-модели.

7) Информация о каналах сбыта. Здесь предоставлена информация о том каким образом компания доносит свой продукт конечному потребителю.

8) Информация о структуре издержек. В данной ячейке описываются всевозможные затраты и расходы необходимые для функционирования компании.

9) Информация о потоках поступления доходов. Здесь описаны всевозможные виды доходов, которые компания получает от партнеров и от продажи своего продукта.

Вышеперечисленная информация представлена на рисунке 7.

Ключевые партнеры	Ключевые виды деятельности	Ценностные предложения	Взаимоотношения с потребителями	Потребительские сегменты
Светотехнический завод АО «Физтех-Энерго» г.Томск; Мебельные компании, занимающиеся изготовлением мебели на заказ	Производство фитошкафов под заказ	Фитошкаф - устройство, позволяет выращивать различную зелень в домашних условиях круглый год	Осуществляется посредством продажи фитошкафов через сайт, а также сервисное обслуживание и настройка устройства	Нашим основным целевым сегментом являются граждане в возрасте от 35 до 45 лет, преимущественно имеющие семью и следящие за своим рационом питания
	Ключевые ресурсы		Каналы сбыта	
	Материальные ресурсы – материалы для изготовления фитошкафов		Взаимодействие с пользователем осуществляется через веб-сайт	
Структура издержек			Потоки поступления доходов	
Фиксированные издержки – заработная плата работникам, налоги, аренда; Переменные издержки – расходные материалы, сырье для изготовления продукта			Основной доход компании обеспечивается путем продажи фитошкафов клиентам 85%, а также осуществлением сервисного обслуживания и настройки 15%.	

Рисунок 47 – Бизнес-модель проекта по Остервальдеру.

4.9 Стратегия продвижения продукта на рынок

Ситифермерство достаточно новое и малоизученное направление. Люди недостаточно осведомлены о принципе работы аппаратов для круглогодичного выращивания растений. На сегодняшний день данное направление активно набирает популярность. Однако до сих пор люди мало знают о гидропонных установка и о принципе фитоосвещения.

Чтобы повысить продажи продукта, люди должны иметь представление о продукции, которую они желали бы купить. Таким образом, будущие клиенты должны быть проинформированы в полной мере об устройстве фитошкафов. Так у людей сформируется понимание о продукции, они будут знать о возможностях фитошкафа, будут знать, что им предлагает производитель. Так давая людям больше информации о продукции и о ситифермерстве в целом, можно привлечь новых клиентов, которые узнав больше о данном направлении заинтересуются покупкой аппаратов для круглогодичного растениеводства.

Таким образом, для продвижения продукта необходимо устроить не только рекламную кампанию, но и регулярное освещение фитотематики в СМИ. Так будет размещена реклама на популярных площадках таких как «ВКонтакте», «Instagram», «YouTube» и др. Будут созданы аккаунты на данных площадках, где будут публиковаться посты о новинках, видеоуроки и познавательные видеоролики. Также будут публиковаться статьи с научными исследованиями, в которых будет представлена доказательная база всевозможных улучшений и доработок изделия.

Конечный продукт будет размещен на популярных торговых платформах, таких как «OZON», «Яндекс маркет» и др, а также на официальном сайте изделия. Также на аккаунтах популярных СМИ будет размещена ссылка на официальный сайт продукции и на популярные маркетплейсы.