

Использование светодиодного освещения для выращивания растений

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. РОЛЬ СВЕТА В ЖИЗНИ РАСТЕНИЯ	5
1.1 Спектральный состав света, необходимый для эффективного фотосинтеза	5
1.2 Принципы восприятия света растениями	10
1.3 Влияние искусственного облучения на анатомо-физиологическую характеристику растений	12
ГЛАВА 2. ВЫРАЩИВАНИЕ РАСТЕНИЙ ПОСРЕДСТВОМ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ	16
2.1 Требования к искусственным источникам излучения	16
2.2 Влияние светодиодного освещения на рост и развитие растений	18
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	24
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	25

ВВЕДЕНИЕ

Огромную роль в жизни на Земле играют растения. Они сами производят органические вещества посредством фотосинтеза, а не получают их извне. Для роста, цветения и плодоношения им нужен свет [7].

Введение достижения в области технологии быстро эксплуатируются защищенной отраслью садоводства и ускорили переход от структур, обеспечивающих простую защиту от заморозков, к сложным автоматизированным заводским заводам, в которых все параметры окружающей среды тщательно регулируются. Такие достижения позволили производить сельскохозяйственные культуры круглый год и могут способствовать существенному увеличению урожайности. Например, производство салата на заводских фабриках увеличило урожайность сельскохозяйственных культур до 100 раз на единицу площади земли по сравнению с обычными наружными практиками. Как и в случае с тепличным производством в условиях ограниченной освещенности, таких как зимние месяцы в северных широтах, растениеводство на заводах требует искусственного освещения. В крупномасштабных системах производства растений эффективность системы освещения является ключевым фактором поддержания рентабельности [21].

Системный подход к разработке научно обоснованных методов круглогодичного производства овощной продукции во внесезонный период непосредственно в местах ее потребления, в районах с экстремальными природными условиями, становится приоритетным для биологической и сельскохозяйственной науки. Эффективное решение поставленной задачи обеспечит возможность организации стабильного производства разнообразной растительной продукции в условиях прогнозируемого глобального изменения климата и ухудшения экологической обстановки [10].

Как для фотосинтеза, так и вообще для нормального течения любых фотобиологических процессов жизнедеятельности растений нужен свет – лучистая энергия, не только определенного спектрального состава, но и соответствующей мощности.

Основным источником искусственного освещения в настоящее время является электрическая энергия. Продуктивность системы электрического досвечивания определяется спектральным составом источника света, уровнем освещённости, и коэффициентом полезного действия, влияющим на эксплуатационные расходы [7].

Отсутствие в излучении ламп отдельных участков спектра может привести к нарушению нормального роста растений при их длительном выращивании.

Светодиодные лампы позволяют плавно регулировать уровень освещенности, имеют улучшенную цветопередачу и большой срок службы. Научно и практически доказано, что для освещения растений можно использовать источники света на основе светодиодов различного цвета свечения [7].

Внедрение светодиодных систем освещения для садоводства привлекло значительное внимание в связи с их потенциалом по сокращению затрат электроэнергии, что делает производство озимых культур более финансово жизнеспособным. Садоводческие осветительные установки Светодиодные лампы показывают значительное разнообразие в их дизайне, системах управления, и произведенных спектрах света. Светодиодные системы освещения могут быть высоко энергоэффективными; однако не все светодиоды являются более энергоэффективными, чем стандартные натриевые лампы высокого давления (HPS), и необходимо проявлять осторожность при проектировании и внедрении для обеспечения того, чтобы установленные системы удовлетворяли потребности системы растениеводства [21].

Цель данной работы состоит в теоретической характеристике использования светодиодного освещения для выращивания растений

Задачи:

- 1) Рассмотреть, каков спектральный состав света, необходимый для эффективного фотосинтеза.
- 2) Выявить принципы восприятия света растениями.
- 3) Охарактеризовать влияние искусственного облучения на анатомо-физиологическую характеристику растений.
- 4) Определить требования к искусственным источникам излучения.
- 5) Рассмотреть, каково влияние искусственного облучения на анатомо-физиологическую характеристику растений.

ГЛАВА 1. РОЛЬ СВЕТА В ЖИЗНИ РАСТЕНИЯ

1.1 Спектральный состав света, необходимый для эффективного фотосинтеза

Свет, как фактор окружающей среды, определяет многие стороны роста и развития растений – его действие не сводится только к фотосинтезу и накоплению органического вещества. Такие процессы, как фотопериодизм и фотоморфогенез являются внешним проявлением регуляторной роли света. Значительность влияния световых условий выращивания растений на их рост, развитие и продуктивность, определила необходимость оценки источников света, используемых в технологиях выращивания растений в регулируемых условиях, по двум группам параметров: по соответствию лучистого потока потребностям растений и по экономической выгоде применения – основная доля себестоимости произведенной продукции приходится на затраченную электроэнергию. Рациональная организация и контроль за качественными и количественными характеристиками световой среды произрастания растений состоит в том, что спектральным составом светового потока и суммарной облученностью, в значительной степени определяют экономическую эффективность технологий интенсивной светокультуры томата [10].

Оптимизируя использование света для максимального фотосинтеза растения способны использовать свет с длинами волн в диапазоне 400-700 нм для фотосинтеза. Это волновая полоса, которая часто упоминается как фотосинтетически активное излучение (ФАР), содержащее 26% фотонов и 42% энергии, достигающей поверхности Земли (рассчитано по эталонным спектрам ASTM G173-03) [21].

Для осуществления фотосинтеза необходимы излучения в определенной части видимого оптического излучения, так называемой

области фотосинтетически активной радиации (ФАР). Характер действия фотосинтеза изменяется для излучений различного спектрального состава. В первую очередь следует отметить, что у всех зеленых растений основные максимумы поглощения находятся в синей и красной областях спектра, а минимум – в желто-зеленой [7].

Каждому участку спектра оптического излучения предназначена своя роль в жизнедеятельности растений (рисунок 1).

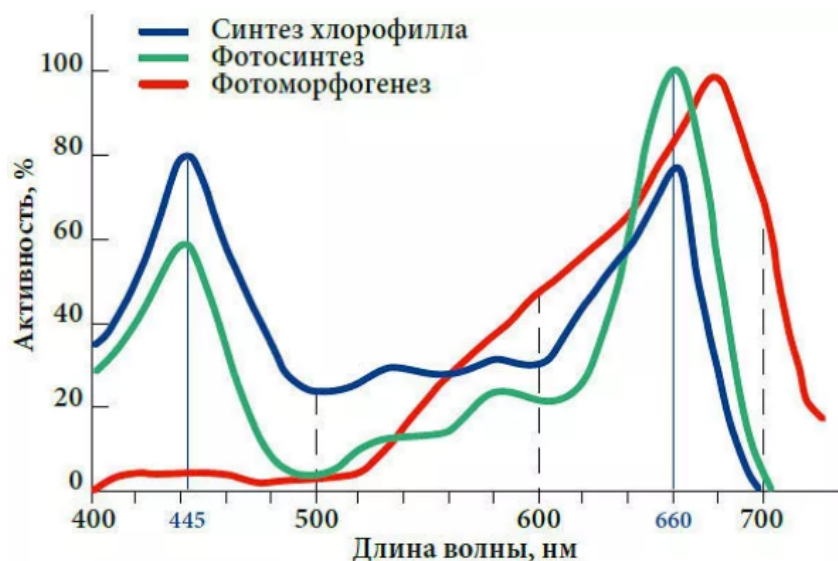


Рисунок 1 – Относительная спектральная чувствительность реакций растений на оптическое излучение различных длин волн [8]

Для растений физиологически активное излучение, при котором происходят фотосинтез, биоценоз пигмента, фотоморфогенез и другие процессы, расположено в интервале 280 ... 750 нм [8].

На определенных стадиях роста и развития растений требуются различные участки видимого света в диапазоне 400-700 нм, но с преобладанием красных, синих и фиолетовых лучей. На стадии цветения могут оказаться продуктивным добавление желтого или оранжевого света. В период плодоношения и созревания для некоторых видов растений возрастает роль, например, зеленого света (огурцы, томаты) [7].

Роль спектрального состава света для фотосинтеза весьма и весьма существенна. Физико-биохимические эффекты, вызываемые воздействием красного или синего света или даже простым изменением соотношения красных и синих лучей в источниках света, настолько существенны, что

становиться актуальной регуляция фотосинтетической деятельности растения с помощью изменения спектрального состава света. Для более точной оценки оптического излучения его делят на отдельные участки, оказывающие различное физиологическое воздействие [7]:

280-320 нм - влияет, чаще всего, вредным образом на рост и развитие растений. Однако существует растения, для которых присутствие этого излучения в количестве ~0,5% оказывает стимулирующий эффект [7, 10]. Ультрафиолетовые лучи поддиапазона 280 ... 315 нм способствуют процессу закаливания растений, повышая тем самым их холодостойкость. Длинноволновые ультрафиолетовые лучи (315 ... 380 нм) необходимы для обмена веществ и роста растений. Они задерживают вытягивание стеблей, повышают содержание витамина С и других, играя регуляторную роль в развитии [8].

320-400 нм - оказывает воздействие на регуляторные процессы в развитии растений. Благодаря этому включение в состав лучистого потока небольшого количества такого излучения вполне целесообразно [7, 10] в количестве 1-3% [10].

В спектре поглощения фотосинтетической активной реакции (400 ... 700 нм) принято выделять три физиологически значимые для растений участка, условно названные: «синим» (400-500 нм), «зеленым» (500-600 нм) и «красным» (600-700 нм) [8].

400-500 нм («синий») - поглощение желтыми пигментами, второй пик абсорбации хлорофиллом, второй пик фотосинтеза, играет важную роль, должен входить для обеспечения фотосинтеза и регуляции [7]. Излучение в синей области спектра увеличивает накопление общей биомассы на протяжении всего периода вегетации растений томата, однако преобладающее количество синего в общем световом потоке приводит к формированию низкорослых растений с высоким фотосинтезом, но низкой продуктивностью [10]. Сине-фиолетовые лучи тормозят рост стеблей, корней и листьев, формируют компактные растения и более толстые листья,

позволяющие лучше поглощать растения и более толстые листья, позволяющие лучше поглощать и использовать оптическое излучение в целом. Они стимулируют образование белков и органосинтез растений, хорошо поглощаются хлорофиллом, что создает условия для максимальной интенсивности фотосинтеза.

500-600 нм («зеленый») включает оптическое излучение голубого (480-510 нм), зеленого (510-555 нм) и желтого (555-585 нм) цвета [8]. Обладает высокой проникающей способностью, полезен для фотосинтеза оптически плотных листьев, листьев нижних ярусов, густых посевов, наименьшая физиологическая реакция [7]. Не является абсолютно необходимым для обеспечения фотосинтеза растений [10]. «Зеленые» лучи практически проходят через листовые пластинки, не поглощаясь ими. Листья под их действием становятся тонкими, осевые органы растений формируются вытянутыми с меньшим числом клеток и хлоропластов. Регуляторная деятельность «зеленых» лучей является близкой к регуляторной деятельности красного света.

600-700 («красный») – включает излучение оранжевого (585 – 620 нм) и ближнего красного (620-780 нм) [8]. Зона максимального фотосинтетического эффекта синтеза хлорофилла, наиболее важный участок для обеспечения развития и регуляции процессов. Обязателен в лучистом потоке для обеспечения высокого фотосинтеза. Однако монохроматический красный свет может привести к ненормальному развитию или к гибели растения [7]. Обладает значительным регуляторным действием – в области 660нм. находится максимум поглощения фитохрома P660, пигмента, ответственного за прохождение в растениях важнейших нефотохимических реакций [10]. «Красный» участок способствует интенсивному росту листьев и осевых органов их представляют собой основной вид энергии для процесса фотосинтеза. Отсутствие или низкая интенсивность излучения в «красном» участке спектра источников определяет формирование неполноценных растений с низкой продуктивностью [8]. Монохромный красный свет может

привести к неоптимальному росту и развитию многих видов растений [17]. Согласно проведенному исследованию было показано, что свет 100% красный может привести к физиологическим нарушениям, которые могут привести к нежелательному удлинению ствола и/или недостаточному биосинтезу, приводя к низким фотосинтетическим показателям. Это обусловлено нарушением функций фотосинтетического аппарата. При этом стоит отметить, что механизмы, которые лежат в основе субоптимального роста при монохроматическом рассеянии света, пока еще не выяснены, и, по-видимому, являются видоспецифичными [17, 32].

**ВТОЛЬКО КРАСНЫЙ СВЕТ
МОЖЕТ ПРИВЕСТИ К
НЕОПТИМАЛЬНОМУ
РОСТУ И РАЗВИТИЮ А1.
МНОГИЕ ВИДЫ
РАСТЕНИЙ
[8, 10-12, 14].
Исследование**

показывало что свет
100% red может
вести к physiological
нарушения, которые
могут привести к
нежелательному
удлинению ствола
и/или недостаточному
биосинтезу
хлорофилла,

приводя к низким
фотосинтетическим
показателям из-за
дисфункционального
фото
осинтетического
аппарата [15,76,77].
The
механизмы, лежащие
в основе
субоптимального

роста при
монохроматическом
рассеянии света, пока
еще полностью не
изучены
и, по-видимому,
являются
видоспецифичными,
поскольку некоторые
растения, как было
показано, производят

более высокую биомассу под 100% красный свет по сравнению с комбинацией длин ВОЛН

Важной для растений является область 625-680 нм. Лучи этой области наиболее полно поглощаются хлорофиллом и увеличивают образование углеводов при фотосинтезе [8].

700-750 («дальний красный») – в основном эффект вытягивания стебля, ярко выраженное регуляторное действие, достаточно несколько процентов в общем спектре [7]. В области 730нм находится максимум поглощения фитохрома в форме P730. В небольших количествах дальний красный свет должен входить в состав общего облучения [10].

Инфракрасное излучение источников света (780 и более нм) в большей своей части не способно инициировать ход физиологических реакций, однако некоторые области ИК излучения хорошо поглощаются водой, содержащейся в растениях, и таким образом, при определенной мощности, повышают температуру растений, ограничивая максимальную облученность в видимой области значениями $\sim 120-140 \text{ Вт/м}^2$. Поэтому, в общем случае принято

считать, что ИК-радиация может оказывать на растения не прямое, а опосредованное действие [10]. Ближнее ИК излучение (780-1100 нм) действует на растяжение подсемядольного колена для процесса фотосинтеза. Более длинные лучи приводят к повышению температуры листьев и, по мере возрастания их длины, листья начинают завядать с конечным результатом гибели, а с ним и всего растения. Следует отметить, что степень воздействия ИК лучей на развитие растений определяется видом растений, например, на ближнее излучение слабо реагируют томаты и довольно сильно огурцы [8].

Часть доходящей до растений солнечной радиации в спектральном диапазоне 400-700 нм, используемая для процесса фотосинтеза, получила название фотосинтетически активной радиации [7].

Спектр действия света для фотосинтеза был впервые описан Маккри (1971), который показал, что красный свет является оптимальным для ограниченного светом фотосинтеза [21]. Более поздние исследования показали, что изменения концентрации вспомогательных пигментов растений, таких как каротиноиды, которые поглощают преимущественно в синей области спектра PAR, ответственны за различия в эффективности использования света между:

- а) красной и синей областями спектра и
- б) листьями, выращенными в различных условиях [22].

Хотя такие пигменты уменьшают эффективность использования света голубого света, они жизненно важны для защиты фотосинтетического аппарата от ультрафиолетового повреждения [21].

Хотя красный свет наиболее эффективно используется для фотосинтеза, одного красного света недостаточно для максимального фотосинтеза. Синий свет необходим для предотвращения «синдрома красного света» [24], который характеризуется субоптимальной морфологией и aberrантной экспрессией генов и биохимией.

Синий свет также необходим для содействия устьичному раскрытию, улучшения доступа к CO_2 и ускорения транспирации и поглощения питательных веществ.

Другие световые волны могут еще больше увеличить фотосинтез при определенных обстоятельствах.

Например, зеленый свет может проникать дальше в оба навеса и отдельные листья, чем красный или синий свет, и может стимулировать фотосинтез в клетках/листьях, которые не достигаются красным и синим светом.

Результаты работы Terashima et al. также продемонстрировали взаимодействие качества и интенсивности света с наибольшим преимуществом зеленого света, возникающим при промежуточных интенсивностях света. Преимущества включения зеленого света в индивидуальный спектр для растениеводства необходимо будет оценить с учетом энергии, необходимой для получения зеленых длин волн [21].

1.2 Принципы восприятия света растениями

Растения должны получать достаточно света, чтобы стимулировать активный рост и поддерживать качество и продуктивность растений. Чтобы максимизировать производительность и минимизировать затраты энергии, искусственно подаваемый свет должен обеспечивать длины волн, которые используются эффективно и отвечают потребностям растений [21].

В результате направленного воздействия оптического излучения на растения обуславливается выигрыш в урожае. В реальных фитоценозах в случае одинаковой интенсивности оптических потоков боковое освещение является более эффективным, в сравнении с освещением сверху. Это связано с тем, что оно является более объемным и лучше распределяется по ассимилирующей поверхности фитоценоза. Диффузный свет более эффективен, в сравнении с прямым. Угол падения направленного излучения на технологическую поверхность оказывает влияние на способы улучшения пространственного светораспределения и градиента освещенности по высоте растений.

Оптические свойства листьев в известной степени взаимосвязаны с углом падения направленного излучения. При увеличении угла падения света с 30 до 70 градусов снижается коэффициент поглощения на 8...10 % у блестящих и на 2...4 % у матовых листьев. Это обусловлено увеличением коэффициента отражения и уменьшением степени пропускания. При этом стоит учесть, что определение интенсивности отражения осуществляется направлением падающих лучей и их спектральным составом. Отражение от зеленого листа из-за неровности поверхности, окраски будет являться смешанным и неравномерным. Плотные листья с блестящей поверхностью дают большее отражение, в сравнении с матовыми или покрытыми волосками.

Интенсивный свет, который падает на одну сторону листа, производит такое же действие на фотосинтез, как и половинные интенсивности света, падающего на обе стороны листа. Это означает, что для фитоценоза является важным также свет, который был рассеян листьями и отражен от листьев.

В случае большой листовой поверхности и равномерного распределении света в теплице использование его энергии осуществляется намного лучше. Указанная закономерность верна лишь единичных листьев или в том случае, если листья расположены в одной плоскости. Хорошо развитым растением используется свет лучше, в сравнении с отдельным листом. Это обусловлено тем, что свет, который был отражен и прошел через лист улавливается другими листьями.

Для максимального использования продуктивности листьев нельзя удалять зеленые листья, так как это связано с уменьшением общей фотосинтезирующей поверхности (рисунок 2) [9].

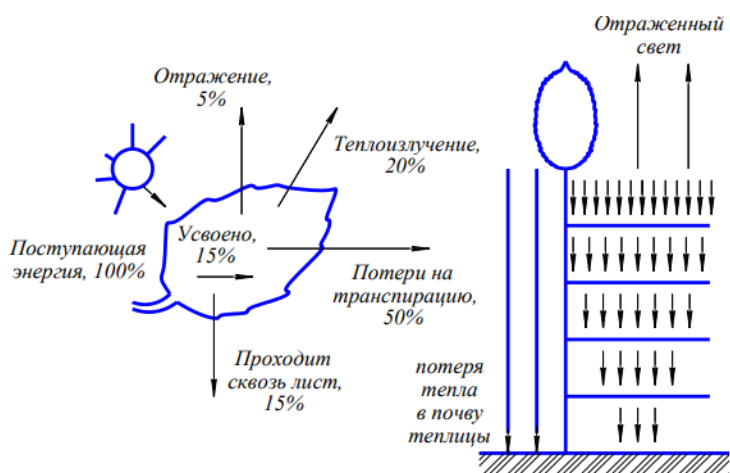


Рисунок 2 – Распределение солнечного света, падающего на растения в теплице [9]

Большая часть энергии солнечного света (около 76 %) перехватывается листьями растений. Преобразование данной энергии происходит при фотосинтезе. Как видно из рисунка, коэффициент использования световой энергии является очень низким [9].

Вегетативные сорта, или привитые растения, обладают более крупными листьями. Высокая температура в корневой зоне также способствует увеличению листьев. Охлаждение в свою очередь может вызвать

укорачивание корней, в результате чего вырастают менее крупные листья [23]. Количество сухого вещества, которое поступает в лист, в значительной степени определяется соотношением прихода-расхода ассимилятов в момент закладки листа.

Толщина листа в значительной степени взаимосвязана с освещенностью и CO_2 (ассимиляцией). Чем больше света, тем толще становится лист [9].

С учетом современных требований к продукции защищенного грунта все большее значение приобретает оценка растений не только по урожайности, но и по пищевому качеству биомассы. Именно этот показатель, характеризующий уровень накопления в биомассе ценных в пищевом отношении соединений и минимальное содержание нежелательных для человека элементов, должен быть одним из основных при определении конкурентоспособности продукции [11].

Повышение накопления в биомассе ценных в пищевом отношении соединений при снижении вредных веществ (например, нитратов) представляется возможным с использованием регуляторного действия излучения УФ - области на тепличные культуры.

Изоляция тепличных растений от воздействия естественных факторов внешней среды приводит к нежелательным последствиям. Дефицит количества естественной энергии оптического излучения, проникающего в сооружения защищенного грунта, в современных промышленных теплицах во внесезонное время ликвидируется за счет дополнительного искусственного излучения тепличных ламп [3].

1.3 Влияние искусственного облучения на анатомо-физиологическую характеристику растений

Теоретически можно было бы импульсировать свет таким образом, чтобы обеспечить правильное количество световой энергии для возбуждения каждой фотосистемы в листе, не вызывая массив механизмов рассеяния энергии, которые помогают защитить растения от повреждений в естественных условиях. Это помогло бы максимально повысить эффективность использования света растениями.

Tennessen et al. (1995) показали, что при условии, что интервалы между световыми импульсами составляют менее 200 мкс, количество фотосинтеза пропорционально общему количеству света, подаваемого растениям.

Jaо and Fang (2004) заметили, что картофельные саженцы растут быстрее всего, когда свет пульсирует с частотой 720 Гц. и отметил, что 180 Гц обеспечивают наиболее энергоэффективную систему и будут уместны там, где сокращение потребления энергии имеет первостепенное значение [21].

Shimada и Taniguchi (2011) обнаружили, что скорость фотосинтеза и морфология растений оказывали неблагоприятное воздействие на растения, подвергшиеся воздействию внефазовых красных и синих световых импульсов, по сравнению с растениями, подвергшимися воздействию внутрифазовых световых импульсов. Хотя этот эксперимент дал интересные результаты с точки зрения того, как растения воспринимают и используют свет, наиболее выраженный физиологический эффект наблюдался повышенный ответ избегания тени, который не имеет никакого преимущества для большинства применений в садоводстве [25].

Кроме того, импульсный свет не может обеспечить желаемых эффектов в условиях оранжереи, где присутствует естественный свет. Несколько исследовательских групп разрабатывают системы освещения с сенсорным управлением, которые модулируют световой режим в соответствии с текущими потребностями завода. Эти технологии имеют потенциал для поддержания темпов роста и качества растений в изменяющихся погодных условиях при минимальном потреблении энергии.

Для растениеводства были опробованы мобильные системы освещения, которые используют меньше ламп и соответственно имеют более низкую стоимость. Мобильные системы имеют два основных ограничения:

а) количество света, подаваемого на заводы, обычно ниже, чем при статической системе, и

б) необходимы системы для перемещения ламп с соответствующими требованиями к установке и обслуживанию [21].

Однако затраты на мобильные системы могли бы быть минимальными, если бы для установки ламп использовались существующие мобильные ирригационные боны. Li et al. показали, что салатные растения можно выращивать под мобильными фонарями [31]. Однако в этой мобильной системе используется вдвое меньше ламп, чем в стационарной системе управления светодиодами, и для достижения существенной экономии средств в коммерческой системе потребуется более существенное сокращение количества источников света. Благодаря конструкции мобильных систем освещения растения получают переменную интенсивность по мере прохождения огней над посевом.

Однако растениям может потребоваться до 45 минут постоянного света для достижения максимальной скорости фотосинтеза (Kirschbaum and Pearcy 1988), и поэтому большая часть света, обеспечиваемого при прохождении мобильного света, не будет использоваться для фотосинтеза.

Поэтому мобильное освещение вряд ли подходит для большинства применений. Однако в тех случаях, когда требуются только низкие дозы света (например, обработка светом в конце дня или обработка UVC/UVB), мобильные огни, установленные на ирригационных бонах, могут обеспечить экономически целесообразный способ установки ламп [21].

Действие спектральных диапазонов на рост и развитие высших растений хорошо известно. Так сеянцы томата при облучении синими световым диапазоном в комбинации с красными и зелеными демонстрировали увеличение интенсивности фотосинтеза и количества

устьиц. Синий свет подавляет удлинение гипокотилия и приводит к производству биомассы. Применение синих световых диапазонов в комбинации с натриевыми лампами привело к увеличению общей биомассы, однако снизило выход плодов у огурцов и томатов [1]. Соотношение количества синего и красного излучения влияло на длину стебля сеянцев томата [20]. Излучение зеленых световых диапазонов увеличило площадь листьев, сырую и сухую массу рассады огурца [26]. Красное излучение способствует удлинению гипокотилия и увеличению площади листьев. У томатов и сладкого перца применение зеленого излучения оказало положительное влияние на развитие растений. Добавление дальнекрасного излучения при выращивании сладкого перца увеличивало высоту растения и массу стебля [12].

Согласно работе [1] было проведено исследование для обоснования спектрального состава излучения светодиодного корректора, используемого дополнительно к натриевым лампам в светокультуре, и практическая проверка такого решения в лабораторных условиях. С учетом спектрального состава и интенсивности излучения натриевой лампы ДНаЗ 400 как основного источника в облучательной установке был рассчитан необходимый спектральный состав матрицы, который гарантирует коррекцию спектра натриевой лампы под требования светокультуры. Необходимая добавка дальнекрасного излучения составила $25,4 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1}$, синего - $45,8 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1}$. Применение дополнительного корректирующего облучателя привело к улучшению биометрических параметров рассады томата: увеличению количества листьев на 7,1%, получению более крепкой и коренастой рассады с высотой меньше на 20%, увеличению содержания хлорофилла в листьях, сырой массе листьев на 2,8% больше и содержанию в них сухого вещества на 10,5% больше [1].

Существует стандартный параметр, характеризующий эффективность источника оптического излучения для растения – количество фотонов с длиной волны от 400 до 700нм, излучаемых за одну секунду. Эта величина

называется фотосинтетическим фотонным потоком (Photosynthetic Photon Flux – PPF) и измеряется в микромолях фотонов в секунду (мкмоль/с), а отношение PPF к потребляемой мощности источника излучения (PPF/Вт) рассматривается как коэффициент эффективности излучения. Существует еще один параметр, характеризующий источник оптического излучения, который, как правило, декларирует производитель ламп, это – удельная плотность потока фотонов за секунду – Photosynthetic Photon Flux Dencity (PPFD), измеряется эта величина в мкмоль/с/м² (рисунок 3) [3].

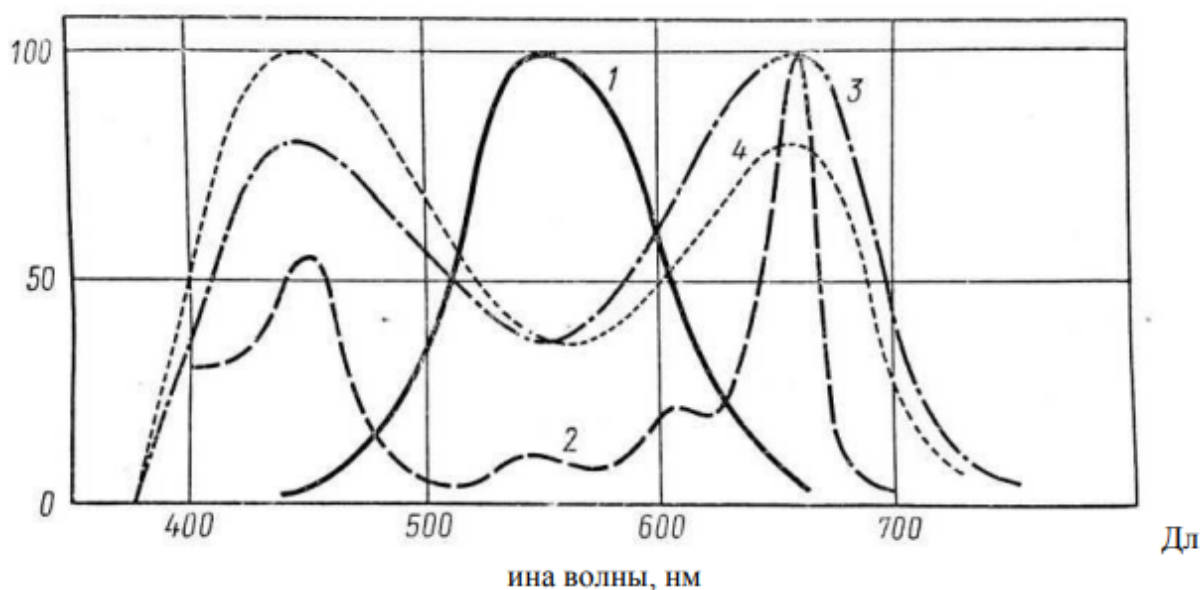


Рисунок 3 – Спектральные кривые: 1 – чувствительности глаза человека; 2 – синтеза хлорофилла; 3 – фотосинтеза; 4 – поглощения оптического излучения листом [3]

На рисунке 3 приведена кривая чувствительности сетчатки глаза среднестатистического человека. Видно, что спектральные чувствительности глаза и растения (спектр поглощения листа, спектр действия фотосинтеза и др.) являются в определенной степени антиподами, то есть, то, что видит глаз (наибольшее поглощение излучения в желто-зеленой зоне) практически не усваивается растением (минимум чувствительности в желто-зеленой зоне). Это значит, что максимумы спектров излучения фотосинтезных ламп и ламп, используемых для освещения, должны быть принципиально разными.

Однако, здесь не все так однозначно. Так как растение – высоко адаптивный организм, способный самостоятельно преобразовывать энергию

оптического излучения различных длин электромагнитных волн в энергию, необходимую для успешной его жизнедеятельности [3].