

Оглавление

Введение.....	10
1 Обзор литературы по теме исследований.....	13
1.1 Виды растениеводческого освещения и факторы, оказывающие влияние на рост, развитие и продуктивность растений.....	13
1.2 Основные процессы в растении и спектральный состав источников излучения.....	15
1.2.1 Фотосинтез	15
1.2.2 Фотоморфогенез	17
1.2.3 Фотопериодизм	21
1.2.4 Основные результаты исследований светокультуры растений	22
1.3 Светодиоды и облучатели для досветки растений	24
1.3.1 Досветка растений	24
1.3.2 Светодиоды для растений	24
1.3.3 Светодиодные облучатели для растений	26
1.3.4 Основные фирмы – производители светодиодной продукции, которую можно использовать для облучения растений	29
1.4 Выводы по первой главе	32
2 Методика и результаты исследований.....	33
2.1 Методика.....	33
2.2 Характеристика объектов исследования	35
2.2.1 Характеристика растения.....	35
2.2.2 Характеристика теплицы	37
2.2.3 Характеристика светодиодного облучателя (основные требования)	39
2.3 Анализ оптимального спектрального состава облучателя и выбор светодиодов.....	40
2.4 Моделирование кривой силы излучения облучателя.....	49
2.4.1 Конструкция и габариты облучателя.....	49
2.4.2 Анализ светораспределения параметров фотометрических тел светильников	50
2.5 Моделирование со стандартными КСС светильников.....	51
2.5.1 Облучатель с КСС светильников для уличного освещения.....	51
2.5.2 Облучатель с КСС для приборов прожекторного типа	57
2.6 Моделирование КСИ специализированного облучателя	62
2.7 Анализ полученных результатов и выводы	73
Заключение	76

Введение

Для нормального развития растений требуется определенный набор благоприятных внешних факторов. Условия, близкие идеальным, можно создавать в теплицах. Учитывая все возрастающие масштабы тепличного хозяйства, определяющими факторами его развития становятся две основные и связанные между собой проблемы: внедрение технологий, уменьшающих потребление электроэнергии и технологий повышающих продуктивность производства сельскохозяйственной продукции.

Растение – сложная система и на его рост, развитие и продуктивность влияют многие факторы. Изменение требуемых значений всех внешних и внутренних факторов, включая световой, во времени является причиной суточных и сезонных колебаний роста.

Одно из определяющих значений имеют параметры падающего на растение потока фотонов. Под действием излучения в спектральном диапазоне фотосинтетически активной радиации (ФАР - 380–720 нм) происходит фотосинтез – основной процесс, а также фоторегуляция всех биохимических процессов в растении.

Развитие растений в теплицах в разные времена года возможно только при обеспечении требуемого уровня искусственной облученности, учитывающей условия естественной облученности. Например, овощи, выращенные в теплицах при низкой облученности, как правило, имеют пониженное содержание витаминов, органических кислот, минеральных солей и сухого вещества при значительном накапливании нитратов.

Для полноценного развития растений в теплицах требуется обеспечить не только необходимые уровни облученностей, но и требуемое качество (спектральный состав) излучения. При этом численные значения параметров дополнительного искусственного облучения зависят от типа растения, периода его развития, а также от количества и качества присутствующего солнечного излучения. У растений имеются системы фоторецепторов, обеспечивающие погло-

щение энергии по всей области ФАР. Отсутствие в излучении отдельных участков спектра может привести к нарушению нормального роста растений при их выращивании.

За счет создания оптимального качества света можно получить существенную прибавку урожая. Оптимизировать условия светового режима означает: определить требуемые значения спектрального состава падающего излучения, интенсивности, длительности воздействия и установить необходимые соотношения между ними.

В связи с этим, необходимо создавать такие облучательные установки (ОБУ) для теплиц, которые позволяли бы осуществлять досветку растений только тем количеством излучения и такого качества, которые необходимы в данный момент растению. Такая ОБУ будет не только энергоэффективной, но и позволит подбирать необходимые параметры облучения растения, которые обеспечивали бы наибольшую продуктивность при выращивании любых светокультур в теплицах.

Ясно, что традиционные облучатели для растений (например, на основе натриевых ламп) не обеспечивают таких возможностей. Поэтому стремительно развивается светодиодная облучательная техника для выращивания растений в условиях закрытого грунта. Это наиболее перспективное направление, так как технология изготовления светодиодов совершенствуется, цена из года в год падает, а световая отдача увеличивается. Кроме того, светодиоды позволяют создавать адаптивные облучательные установки.

Цель настоящей работы: разработка светодиодного облучателя для теплиц с оптимальными спектром излучения и параметрами светораспределения.

Задачи:

- Обоснование и выбор светодиодов для создания исходного спектра излучения облучателя;
- Моделирование оптимальной кривой силы излучения для облучения различных видов тепличных светокультур.

Научная новизна: Впервые разработан светодиодный облучатель для теплиц с научно обоснованным спектром излучения, оптимальной кривой силы излучения, высокой энергоэффективностью, универсальностью применения и возможностью адаптации к изменяющимся внешним условиям.

1 Обзор литературы по теме исследований

1.1 Виды растениеводческого освещения и факторы, оказывающие влияние на рост, развитие и продуктивность растений.

Факторы, оказывающие влияние на рост, развитие и продуктивность растений:

- свет;
- вода;
- температура;
- окружающая среда (например углекислый газ);
- удобрения.

Эти факторы должны быть сбалансированы между собой. Скорость роста и развития растения лимитируется тем из них, который является наименьшим относительно оптимального.

Одним из определяющих факторов является, падающий на растения поток фотонов. Под действием излучения в спектральном диапазоне фотосинтетически активной радиации (ФАР) происходит фотосинтез – основной процесс, а также фоторегуляция всех биохимических процессов в растении. Недостаток света приводит к замедлению роста растений и нарушению их развития, например, к чрезмерному удлинению и хрупкости стеблей, неправильному созреванию и т.д.

Растениеводческое освещение можно разделить на три типа (рисунок 1.1). Сфера применения подобных осветительных систем достаточно разнообразна, начиная от «простого» удлинения светового дня до полной замены естественного источника света — Солнца.



Рисунок 1.1 – Типы растениеводческого освещения

Чтобы понять, как и за счет чего можно обеспечить благоприятные условия для роста растений, необходимо выделить основные параметры светового излучения, влияющие на их рост. Во-первых, это интенсивность самого света. Данный параметр влияет на процесс фотосинтеза, в ходе которого идут химические процессы превращения CO_2 в углеводы. Основным показателем в растениеводстве, определяющим эту величину, является плотность потока излучения фотосинтетически активной радиации (ФАР), измеряющаяся в $\text{мкмоль/м}^2\text{с}$. Так, для выращивания томатов типовым значением плотности потока будет $185 \text{ мкмоль/м}^2\text{с}$, для перца — $100 \text{ мкмоль/м}^2\text{с}$ [1]. Если мы рассмотрим цветы, то для некоторых сортов этот показатель и вовсе будет относительно невысок. Например, для выращивания розы в горшке или герани достаточно обеспечить уровень плотности потока излучения ФАР в $50 \text{ мкмоль/м}^2\text{с}$ [2].

Второй параметр — световой период, т. е. время в течение суток, на протяжении которого растение освещается. Используя различные комбинации «дня» и «ночи» для разных видов культур, можно добиться значительного улучшения результатов, поскольку существуют растения «короткого дня», приспособившиеся в процессе эволюции расти в условиях длинной ночи, и растения «длинного дня», для которых предпочтителен продолжительный световой день.

Третьим важным условием является спектральный состав света. Спектр влияет на рост, формирование, развитие и цветение культур, т. к. различные

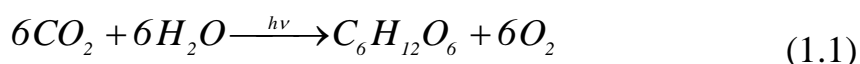
длины волн по-разному воздействуют на растения. Так, например, длины волн 200-380 нм преимущественно вредны либо бесполезны, а все, что выше 1000 нм, попросту превращаются в тепло и не влияют на рост растения [2].

1.2 Основные процессы в растении и спектральный состав источников излучения

1.2.1 Фотосинтез

Фотосинтез - основной и самый энергоемкий процесс. Его обеспечивают хлорофиллы и каротиноиды. Фотосинтез состоит из двух фаз:

- световая, которая всегда происходит исключительно на свету;
- темновая, для которой обязательным компонентом является углекислый газ – CO_2



Хлорофиллы поглощают свет синего и красного диапазонов и только они участвуют в преобразовании солнечной энергии. Каротиноиды – группа пигментов, которые поглощают в области спектра 400 – 550 нм и играют вспомогательную роль. Главная функция каротиноидов – поглощение энергии и перенос ее к хлорофиллу. Спектры поглощения основных видов пигментов оказаны на рисунке 1.2.

Из всех фотопроцессов в растениях наиболее энергоемким является именно фотосинтез: для его протекания требуются уровни облученности на 1–3 порядка большие, чем, например, для фотоморфогенеза, фотопериодизма и других процессов [3].

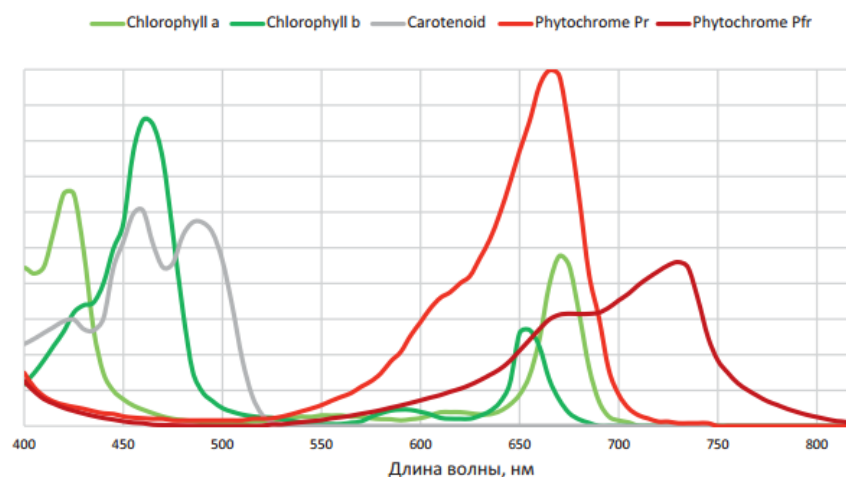


Рисунок 1.2 – Спектры поглощения растений

Эффективность основных фотохимических процессов зависит от длины волны падающего на растение излучения. Эта зависимость обусловлена тем, что каждому пигменту соответствует свой индивидуальный спектр поглощения (рисунок 1.2). Спектры действия основных процессов происходящих под действием света показаны на рисунке 1.3 – 1.5. Отличие спектров действия от спектров поглощения обусловлены тем, что существуют процессы передачи энергии в возбужденном состоянии между молекулами разных пигментов.

Исследования показали, что многие виды растений имеют близкие требования к спектру падающего на них излучения [4]. Поэтому, можно построить некую обобщенную спектральную характеристику спектральной чувствительности листьев растений (рисунок 1.3).

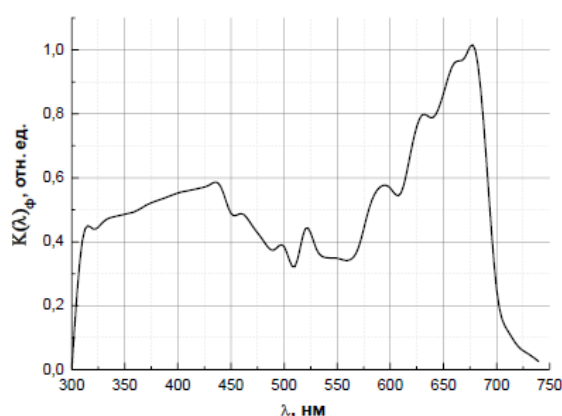


Рисунок 1.3 – Относительная спектральная фотосинтезная эффективность излучения по Свентицкому [5]

Однако установлено, что спектр действия не постоянен даже для одного растения в разные периоды его развития. Рисунок 1.4 демонстрирует, как может изменяться спектр действия фотосинтеза листьев редиса, сформировавшихся в лучах отдельных областей ФАР различной интенсивности.

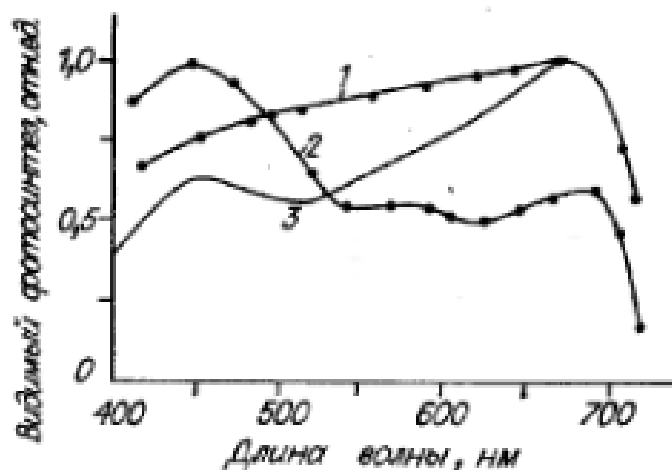


Рисунок 1.4 – Обобщенный спектр действия фотосинтеза листьев редиса, сформировавшихся в лучах отдельных областей ФАР различной интенсивности

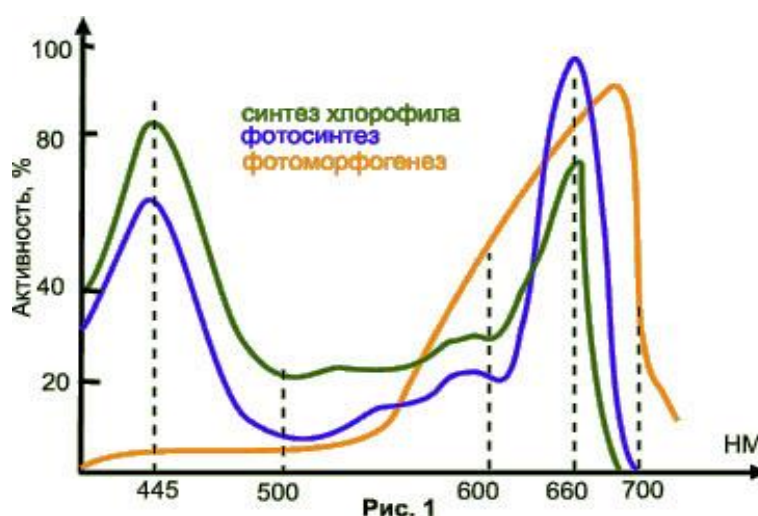


Рисунок 1.5 – Спектры действия основных процессов в растении

1.2.2 Фотоморфогенез

Фотоморфогенез – изменение размеров и формы под влиянием излучения разного качества и разной интенсивности. Этот процесс играет регулирующую роль в процессе развития и роста растения.

Регуляторная роль света состоит в переключении основных механизмов регуляции, обеспечивающих адекватную реакцию растений на условия освещения, реализуя соответствующие программы развития растений. В систему фоторегуляции входят рецепторы и трансдукторы светового сигнала. Фоторецепторы преобразуют квант света в биохимический сигнал.

Основные специфические сенсорные пигменты, обладающие фоторегулирующими свойствами: фитохромы (phy A-E), криптохромы (cry 1-5), фототропины (phot 1-2), суперхром (неохром). Действие света начинается с его поглощения этими пигментами. Фитохромы поглощают красный и дальний красный свет; криптохромы и фототропины – ближний ультрафиолетовый и синий свет, суперхром (неохром) – синий и красный [6].

Фоторегулирующее действие красного света обусловлено, в основном, фитохромом. Фитохром существует в двух формах с разными свойствами. Под воздействием красного света (660 нм) или дальнего красного света (730 нм) эти две формы переходят друг в друга. Этот эффект схож с действием выключателя, т.е. всегда сохраняется результат последнего воздействия.

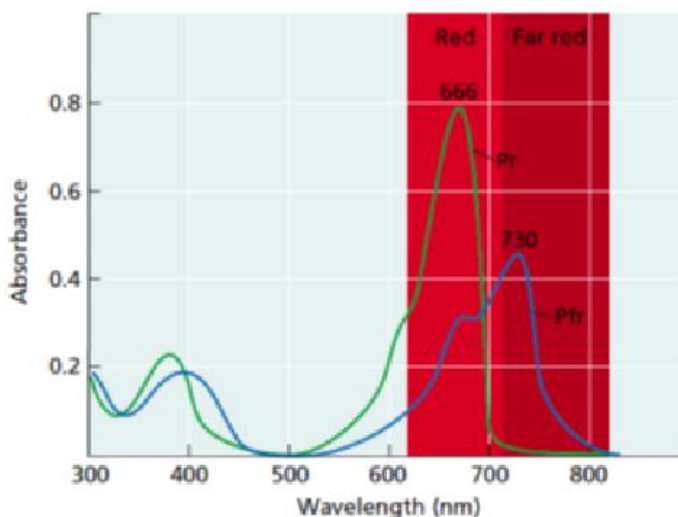


Рисунок 1.6 – Спектры поглощения фитохрома Φ_{660} И Φ_{730}

Утром фитохромы Φ_{660} и Φ_{730} активизируются и растение «просыпается». Вечером растения получают большую дозу дальних красных лучей, активизируется только Φ_{730} и этим фитохромная система «говорит» растению о

том, что пора «спать». Ночью температура воздуха может заметно уменьшиться, поэтому, получив фитохромный сигнал и «сверив» его с часами, растение принимает «превентивные меры» защиты от холода.

Цветением растений также управляет фитохром. Он обеспечивает слежение за временем суток (утро-вечер), управляя периодичностью жизнедеятельности растения.

Таким образом, на основании сигналов фитохромной системы растение изменяет стратегию роста: готовится к фотосинтезу или все силы расходует на рост; приступает к цветению или к листопаду; семена прорастают или дожидаются более благоприятного освещения.

Это влияет на рост и развитие растения, его продуктивность. Например, пигменты с максимумом чувствительности в красной области спектра отвечают за развитие корневой системы, созревание плодов, цветение растений. Известно, также, что под воздействием красных лучей продуктивность биомассы растений возрастает[2].

Вторая светочувствительная система связана с синей областью спектра. Фоторецепторы синего света – криптохромы, фототропин. Спектр поглощения криптохрома приходится на область 400 - 500 нм. Для взрослых растений синий цвет, например, регулирует ширину устьиц листьев, управляет движением листьев за солнцем [7], угнетает рост стеблей [1].

Синий свет управляет изгибом проростка и стебля в сторону солнца (фототропизм). Пигменты с максимумами поглощения в синей области отвечают за увеличение зелёной массы. При облучении синим светом наблюдается самый высокий фотосинтез в расчете на единицу площади листа. При недостатке синего света (например, в загущенных посадках или под стеклом) растения вытягиваются [1]. Существует мнение, что в разное время дня синий свет оказывать разное влияние на растения.

Биологическое значение зеленого света связано с преобладанием его в спектре солнечного излучения. Известно, что зеленый цвет в определенном соотношении с синим, контролирует процессы закрывания-открывания устьиц

листа, управляя, таким образом, процессами водо- и газообмена [8, 9]. Показано, что регулирующее действие зеленого цвета на процессы жизнедеятельности растений реализуется через передачу сигнала на фитохромы А-Е, поглощающие красный свет.

Криптохром 1 и другие рецепторы, поглощающие при длинах волн 515, 525, 535, 543, 553 нм, активирует систему вторичных посредников и гормональную систему регуляции, включая программу фотоморфогенеза растений. При этом уменьшается количество хлоропластов и содержание фотосинтетических пигментов в единице площади листа, следовательно, уменьшается интенсивность фотосинтеза по сравнению с действием синего и красного света. Зеленый свет играет регуляторную роль в формировании морфогенеза растений на стадиях и проростка и взрослого растения.

Особенно значим зеленый свет для развития растений на ранних стадиях морфогенеза, когда правильная оценка световых условий позволяет включить растению адекватную программу развития [10].

Пигменты, поглощающие в зелёной области спектра, из-за низкого значения коэффициента поглощения обеспечивают более глубокое проникновение излучения в листья. Эти пигменты также участвуют в фотосинтезе, так как передают часть поглощенной энергии излучения хлорофиллу и, по этой причине, полезны для фотосинтеза плотных листьев и листьев нижних ярусов, куда синие и красные лучи почти не проникают.

Таким образом, как и для фотосинтеза, основными фоторегулирующими свойствами должны обладать источники, излучающие в синей и красной областях спектра.

1.2.3 Фотопериодизм

Фотопериодизм – процесс управляемый длительностью светового дня. Это также – важнейший фоторегулирующий фактор. Он контролирует процессы перехода растений к цветению, а также ростовые процессы. Это действие связано с возбуждением определенных пигментов (фоторецепторов). Физиологический ответ на изменение длительности дня – фотопериодическая реакция растений. Например, в умеренных широтах уменьшение длины дня говорит о надвигающемся похолодании. Растения готовятся к состоянию покоя: происходит листопад, питательные вещества перемещаются из надземной части в подземную, рост растения останавливается.

В Средиземноморье сокращение длины дня говорит о наступлении зимы — самого влажного сезона с приемлемыми для роста температурами. Растения дают противоположный физиологический ответ – усиливают рост. Существуют климатические зоны, в которых влажный период приходится на осень или весну. Растениям приходится «оценивать» не общую тенденцию, а точно «измерять» длину дня. Если день соответствует «внутреннему эталону» данного растения, то сезон благоприятный, а если дни длиннее или короче «эталона», условия неблагоприятны и растение готовится к покою. Бывает и иная, противоположная, ситуация, когда климат в целом благоприятен, но весной или осенью наблюдается засуха. Тогда измеренная «эталонная» длина дня говорит об условиях, неблагоприятных для роста данного вида растения.

Под контролем фотопериодизма находятся и многие другие процессы. От длины дня зависит перестройка работы меристемы: образование цветков, летний покой и формирование почек у деревьев. Земляника образует усы при наступлении длинных дней. Сбрасывание листьев у репчатого лука и тюльпанов происходит на длинном дне, а у березы и осины — на коротком. Образование запасющих органов (кочанов у капусты, клубней у топинамбура также зависит от длины дня. Растения пустынь могут изменять тип листьев, а водные растения сменять подводные листья на надводные.

1.2.4 Основные результаты исследований светокультуры растений

Основные результаты исследований светокультуры растений:

- действие света многообразно и влияет на рост и развитие растений, а также на процессы фоторегуляции всех биохимических процессов в растении, в том числе на накопление полезных и вредных веществ, определяющих качество продукта;
- растение поглощает в спектральной области, так называемой, фотосинтетически активной радиации (ФАР), расположенной в диапазоне 380 – 750 нм. Этот диапазон определяется спектрами поглощения основных, находящихся в клетках растений пигментов: хлорофиллы а и b, каротиноиды, фитохром и другие пигменты;
- поглощение ФАР растениями неравномерно по спектру. Максимум поглощения приходится на синюю (460 нм) и красную (670 нм) области, в которых поглощают преимущественно молекулы хлорофилла;
- для полноценного развития растения необходимо изучение всего спектра ФАР, так как в этом диапазоне расположены спектры поглощения всех видов пигментов, в том числе оказывающих регулирующее воздействие на фотохимические процессы в растении;
- разные участки спектра ФАР оказывают различное воздействие на процессы роста и развития растений. Это определяется тем, что разные пигменты имеют разные спектры поглощения, а отвечают каждый за свою «сферу деятельности» в растении;
- спектральная характеристика чувствительности растений к излучению не является строго универсальной и зависит от вида растения, стадии его развития, интенсивности потока излучения и других факторов;
- известно, что основная доля поглощаемой листьями световой энергии расходуется на фотосинтез, а на поглощение пигментами с фоторегулирующим действием требуется несколько процентов от суммарной доли поглощенной радиации;

- КПД ФАР составляет 0,5 – 8 %;
- значения ФАР (Вт/м^2 , $\mu\text{mol/м}^2 \cdot \text{сек}$) индивидуальны для каждого растения и зависят от стадии развития;
- все растения обладают фотопериодизмом с индивидуальной длительностью светового дня;
- характер и степень влияния излучения на растения зависят от природных (внешних) факторов: продолжительность вегетационного периода, температура, полив, интенсивность ФАР, состав воздуха и другие;
- растения обладают фототропизмом – способность воспринимать направление светового потока.

Ясно, что кроме определенного спектрального состава поглощаемого растениями излучения, необходимо соблюдать требуемые значения интенсивности излучения. На рисунке 1.7 показана зависимость эффективности фотосинтетического действия ОИ в зависимости от его интенсивности. Эта зависимость качественно показывает, что существует определенный оптимальный поток излучения.

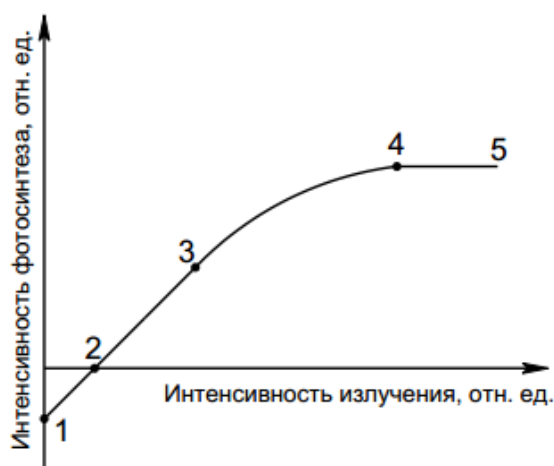


Рисунок 1.7 – Типовая световая кривая фотосинтеза [11]:

- 1 – «отрицательный» фотосинтез; 2 – световая компенсационная точка фотосинтеза; 3-4 – уменьшение резерва усвоения энергии за счет увеличения числа поглощенных квантов; 4-5 – плато насыщения

1.3. Светодиоды и облучатели для досветки растений

1.3.1 Досветка растений

Досветка растений в теплице нужна для следующих целей:

- дополнения к естественному дневному свету, то есть для создания необходимой интенсивности светового потока для протекания фотохимических процессов в растении, обеспечивающих рост и развитие растения, и, в конечном итоге, его продуктивность. Таким образом, недостаток солнечного излучения – компенсируется искусственная досветка;
- управления эффективностью фотосинтеза растения для ускорения роста и повышения качества продукции путем управления интенсивностью и спектральным составом источника излучения;
- активизации защитных механизмов устойчивости растения к некоторым вредителям [12];
- регулирования стадий жизненного цикла растений облучением различного спектра и продолжительностью воздействия освещения (фотопериодизм, всхожесть, цветение, образование генеративных органов) [7];
- выращивания без дневного света, что позволяет добиться максимального климатического контроля;

На практике в промышленных тепличных хозяйствах используется в полном объеме только первое направление и частично четвертое.

1.3.2 Светодиоды для растений

Новые возможности в технологии в облучении растений появились в связи с созданием мощных светодиодов. Поэтому в последние годы наблюдается рост интереса производителей световых приборов к созданию светодиодной облучательной техники для выращивания растений. Для полной реализации возможностей светодиодного облучения растений наметились две основные тенденции его совершенствования:

- Разработка облучателей с оптимальным качеством (спектром) излучения;
- Разработка способов, методов и конкретных систем управления количеством и качеством излучения.

Над первой проблемой работают многие фирмы. Они создают специальные «фитосветодиоды», позволяющие создать спектр излучения, близкий к кривым действия фотосинтеза с широким спектром излучения в пределах ФАР. Однако возможность управления таким спектром излучения отсутствует.

Поэтому преимущественно разрабатываются «фитосветодиоды» разных цветов, из которых затем в облучателе можно составить источник, состоящие из набора цветных светодиодов с суммарным спектром излучения, также перекрывающим всю область ФАР. В этом случае появляется возможность управлять спектром излучения.

Производители и исследователи, обычно, при разработке устройств для досветки ориентируются на спектры поглощения основных пигментов в растениях: хлорофилла а и b, каротиноидов, фитохромов и др. Спектры поглощения пигментов имеют явно выраженные пики в синей - 450 нм и дальней красной - 650 нм (в англоязычной литературе используется термин “FarRed” –FR) областях спектра.

В качестве примера разработки специальных «фитосветодиодов» можно привести продукцию фирмы Артледс, которая разработала светодиод для освещения растений со специальным люминофором УСКИ), спектральная характеристика которого приведена на рисунке 1.8.

Так как спектры поглощения пигментов расположены в достаточно широком спектральном диапазоне, то, по-видимому, нет смысла полностью повторять в источнике излучения спектры действия, как фотосинтеза, так и фоторегулирующих пигментов.

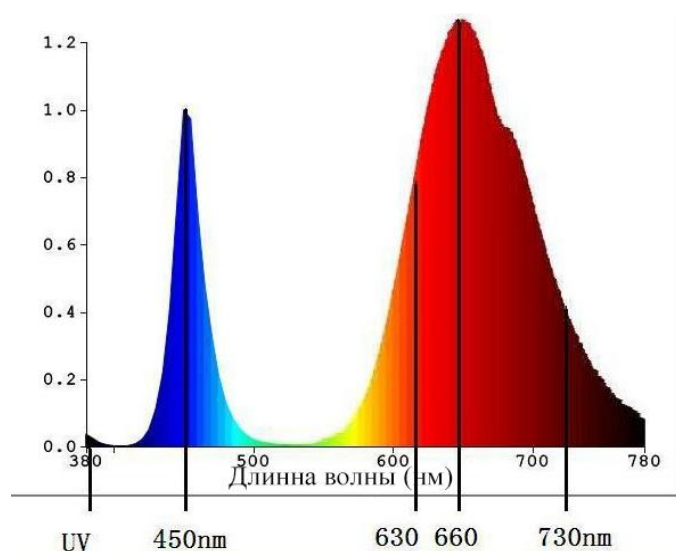


Рисунок 1.8 – Спектральная характеристика светодиода с люминофором УСКИ

1.3.3 Светодиодные облучатели для растений

Другой путь - разработка облучателей (светильников) с оптимальным спектром излучения, на основе использования разноцветных светодиодов. На рисунке 1.9, 1.10 показаны для примера спектры излучения натриевых ламп (ДНаТ), светодиода белого свечения и специального излучателя для растений, составленного из разных светодиодов.

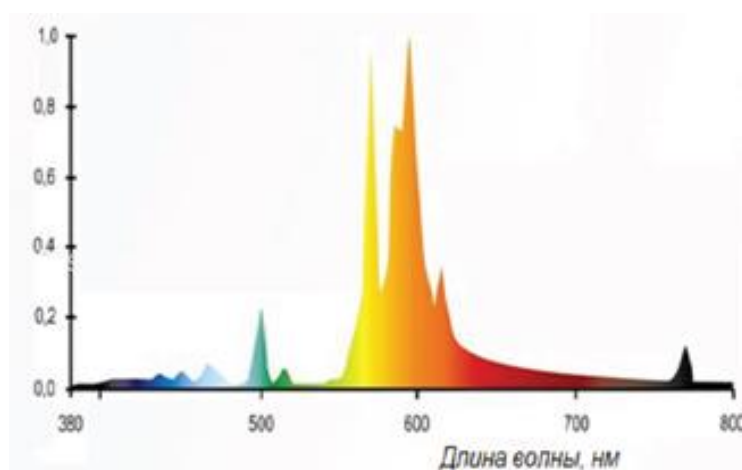


Рисунок 1.9 – Спектры излучения НЛВД

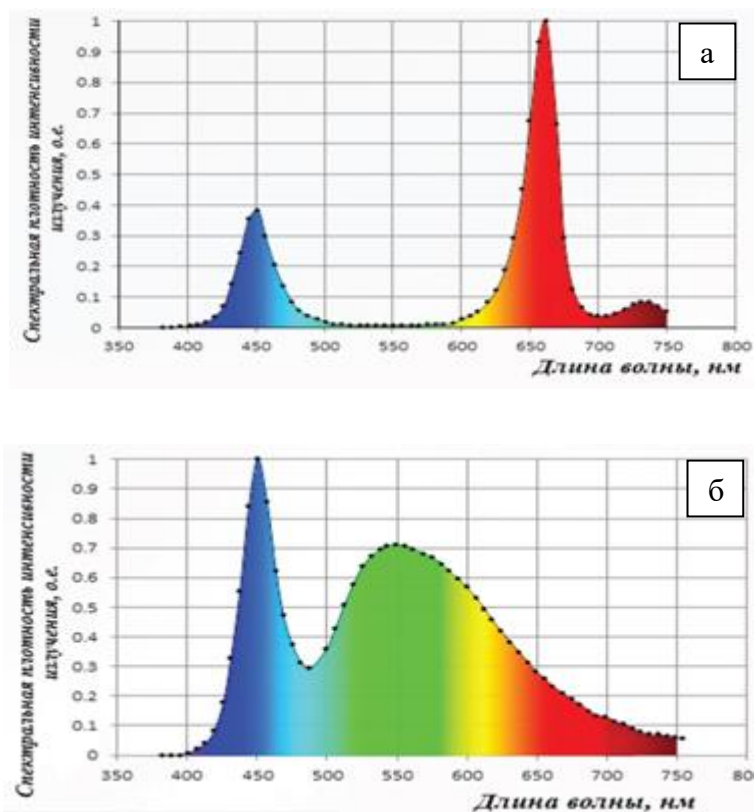


Рисунок 1.10 – Спектры излучения белого светодиодного облучателя(а) и красно-синего светодиодного облучателя (б)

Имеются разработки с применение десятка светодиодов, излучение которых охватывает всю область ФАР.Этот путь для массового применения не эффективен из-за высокой стоимости светодиодов.

В настоящее время различными фирмами выпускается огромно количество светодиодных фитосветильников различающихся спектрами излучения, назначением, конструкцией, мощностью и др. Поэтому ниже мы приведем только некоторые примеры таких светильников, а точнее облучателей.

В направлении разработки таких светодиодных систем облучения для растений работают многие крупные фирмы-производители. Поэтому в настоящее время на рынке светодиодной продукции имеется большое количество разнообразной осветительной техники для теплиц. Обычно, в облучателях используются синие (440–470 нм), красные (630–660 нм) и другие светодиоды.

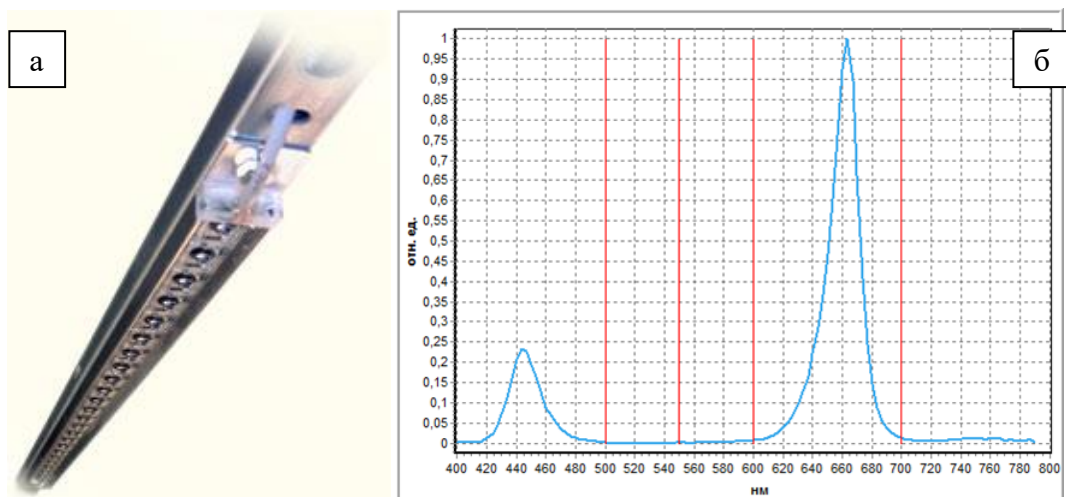


Рисунок 1.11– Внешний вид (а)и спектр излучения (б)светильника Agro-24

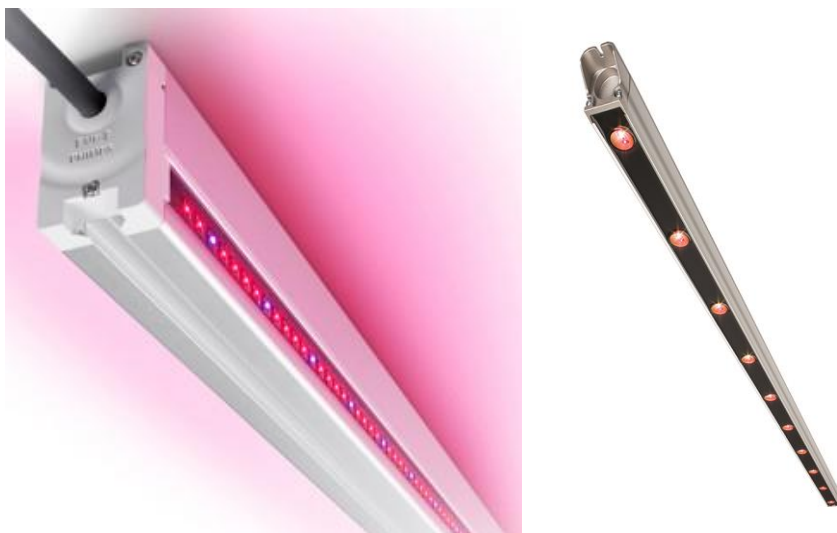


Рисунок 1.12 – Светильники для досветки растений фирмы Philips

Применение светодиодов излучающих только в синей и красной областях спектра (в различных соотношениях), как правило, дает удовлетворительный урожай. Однако, ясно, что использование такой узко спектральной досветки, в отличие от солнечной, не позволяет растению использовать весь спектр биохимических реакций заложенных в генетическом аппарате, что может сказываться на ее пищевых свойствах(пищевом качестве). Кроме того, только узко спектральная досветка может повлиять на процессы формирования вегетативных и продуктивных органов. Важным обстоятельством является и тот факт, что для узко спектрального освещения характерно крайне низкий индекс цветопередачи, что негативно сказывается на зрительной работе персонала теплиц.

Многие копируют с помощью светодиодов спектр натриевых ламп. И этот путь не является перспективным, так как растению необходимо излучение из разных областей спектра и в определенном соотношении.

Чтобы повысить эффективность досветки, производители пытаются выпускать продукцию перекрывающую область ФАР за счет добавления светодиодов, излучающих ультрафиолетовой, голубой, оранжевой, красной и инфракрасной частях спектра. Иногда просто копируется солнечный спектр. Копирование с помощью светодиодов солнечного спектра излучения экономически не выгодно. Большое количество светодиодов значительно усложняет конструкцию. К тому же СД излучающие в голубой, зеленой и оранжевой областях спектра имеют низкий внешний квантовый выход (10-20% против 40-50% у синих и красных СД). Однако, такой мультиспектральный способ составления необходимой растению цветовой гаммы излучения, хорошо подходит для регулирования фитопотоками в исследовательских устройствах.

1.3.4 Основные фирмы - производители светодиодной продукции, которую можно использовать для облучения растений

NichiaCorporation[13]– инженерно-химическая производственная компания со штаб-квартирой в Токусима, Япония. Специализируется на производстве и продаже люминофоров, в том числе светодиодов, лазерных диодов, материалов для аккумуляторных батарей, а также хлористого кальция. NichiaCorporation состоит из двух подразделений. Первое ведет разработку и производство люминофоров и других химических веществ. Второе ответственно за светодиоды.

Samsung LED[14] – производитель светодиодной продукции из Южной Кореи. Является совместным предприятием корейской Samsung и японской SumitomoChemical. Осуществляет научные исследования и разработки, производство и продажу сапфировых подложек для светодиодов.

OsramOptoSemiconductors[15] – немецкая компания со штаб-квартирой в Регенсбурге. Является дочерней компанией OsramGmbH и второй в мире по объему производства оптоэлектронных полупроводников. Одним из основных продуктов компании являются светоизлучающие диоды. Она также производит лазерные диоды высокой мощности, инфракрасные компоненты и оптические датчики. Компания была основана в 1999 году как совместное предприятие Osram и InfineonTechnologies.

LG Innotek[16] – подразделение группы компаний LG. Занимается производством компонентов светоизлучающих диодов (LED). На основе ее компонентов создаются яркие и энергосберегающие лампы освещения и другие продукты, которые функционируют с меньшими затратами.

SeoulSemiconductor[17]– корейская компания по производству светодиодных устройств. Акции компании котируются на KOSDAQ. Компания производит корпуса для светодиодов на двух заводах в городе Ансан, Корея. Общая мощность производства составляет 4 млрд. корпусов в месяц.

CreeInc.[18] – многонациональный производитель полупроводниковых материалов и приборов со штаб-квартирой в Дареме, США. Компания постоянно ведет исследования и разработки в области светодиодной продукции. Сейчас Cree производит высоковольтные SiC диоды Шотки с напряжением 300...1700 В и током до 20 А по технологии ZERO RECOVERY с нулевым временем обратного восстановления, СВЧ полевые транзисторы, а также кристаллы для светодиодов и полупроводниковых лазеров синего и ультрафиолетового диапазона.

PhilipsLumiledsLightingCompany[19]– является производителем широкого спектра светоизлучающих диодов (СИД). В данный момент единственным владельцем компании является PhilipsLighting. LumiledsLighting BV была создана в ноябре 1999 года как совместное предприятие PhilipsLighting и AgilentTechnologies. Последняя была филиалом Hewlett-Packard. На момент образования между компаниями было равноправное партнерство: обе владели 50% акций LumiledsLighting. В августе 2005 года Philips получила контрольный

пакет акций Lumileds, когда она приобрел 47% акций компании Agilents за 950 миллионов долларов.

Sharp[20] – японская многонациональная корпорация, которая разрабатывает и производит электронные продукты. Штаб-квартира находится в Осаке, Япония. В Sharp было занято около 55580 человек по всему миру по состоянию на июнь 2011 года. Компания была основана в сентябре 1912 года. С тех пор она превратилась в одну из ведущих компаний в мире электроники. Линейка светодиодной продукции Sharp насчитывает более 100 осветительных модулей.

TG-LightOptoelectronic[21] – тайваньский производитель светодиодов для осветительных ламп. Компания предлагает клиентам различные варианты светодиодов, а также системы управления освещением. Продукция TG-LightOptoelectronic включает в себя уличные фонари, лампы дневного света, настенные светильники, лампы для проекторов и все виды альтернативных источников света. Штаб-квартира компании находится в Чжунхэ Сити, Тайпэй. Главный завод площадью 3500 квадратных метров расположен в городе Цзянмэнь, провинция Гуандун, Китай.

EverlightElectronics [22] – тайваньская компания, которая производит светоизлучающие диоды. Это седьмая по объему производства компания в мире. Штаб-квартира находится в городе Тайбэй. EverlightElectronics была основана в 1983 году. Изначально она занималась производством светодиодов для бытовой техники. К 2006 году Everlight была крупнейшим производителем светоизлучающих диодов на Тайване. Компания выпускала 1.850 миллиарда единиц в месяц. На ее фабриках трудились 4000 человек. В 2007 году 40% своих доходов Everlight получила от продажи светодиодов для подсветки мобильных телефонов, она также начала осваивать светодиоды для подсветки мониторов портативных компьютеров и телевизоров.

1.4 Выводы по первой главе

Из представленного анализа можно сделать однозначный вывод о том, что управление процессами фотосинтеза и фотоморфогенеза – наиболее эффективный путь воздействия на продуктивность, рост и урожайность растений.

Как и для фотосинтеза, основными фоторегулирующими свойствами должны обладать источники, излучающие в синей и красной областях спектра.

Растения адаптированы к тому спектральному составу излучения, который падает на них при условиях, при которых они формировались. Об этом говорят, например, спектры действия фотосинтеза листьев редиса на различных этапах роста, показанные в [23]. Однако, на различных широтах, в разные месяцы года (и даже в разное время дня) спектр излучения может изменяться, т.е. солнечный свет также не может быть принят как универсальное излучение для всего множества растений.

Для правильного развития растений важно, чтобы они получали хорошо сбалансированный по спектру свет.

Для фоторегулирования нужны источники (облучатели) с управляемыми потоками и спектрами.

Так как спектры поглощения пигментов расположены в достаточно широком спектральном диапазоне, то, по-видимому, нет смысла полностью повторять в источнике излучения спектры действия, как фотосинтеза, так и фоторегулирующих пигментов.

Основной недостаток светодиодного освещения – стоимость светодиодных светильников со световым потоком, эквивалентным световому потоку одного современного светильника с НЛВД 600Вт, превышает стоимость последнего почти в 10 раз.

2 Методика и результаты исследований

2.1. Методики

В настоящей работе для проработки компонентов светотехнического анализа были использованы различные средства компьютерной обработки данных:

1. SPECTRA (www.spectra.1023world.net);
2. IESGen(Karbaras@rambler.ru);
3. MicrosoftWindowsNotepad (блокнот);
4. DIALux (www.dial.de).

Для подбора светодиодов и анализа спектрального состава облучателя использовалась программа SPECTRA.

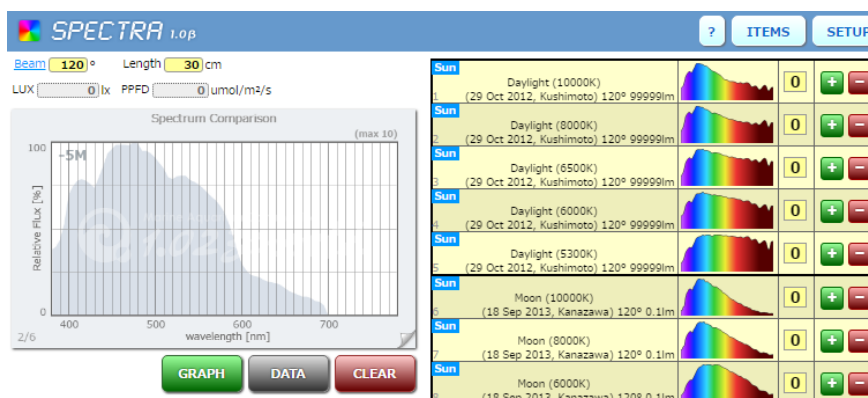


Рисунок 2.1—Программного обеспечения SPECTRA

Для анализа распределения облученности известных и разрабатываемых для телиц светильников (облучателей) в работе использовались средства компьютерного моделирования процессов освещения в теплице, анализировалось светораспределение известных и искомых параметров фотометрических тел светильников. Этап компьютерного моделирования осуществлялся с помощью программы DIALux и вспомогательных инструментов – приложений IESGen, MicrosoftWindowsNotepad.

Настоящая работа выполнялась с помощью программы DIALux 4.12, разработанная фирмой DIAL GmbH (Deutsche Institut für Angewandte Lichttechnik–

Немецким институтом прикладной светотехники), которая осуществляет планирование и дизайн освещения уже более 20 лет[24].

При использовании компьютерного проектирования осветительных установок рекомендуется представлять светораспределение осветительных приборов в виде файлов стандартных форматов, например в IES - формате.

IES-файл – формат файла с фотометрическими данными световых приборов. Формат разработан Светотехническим Обществом Северной Америки (IlluminatingEngineeringSocietyofNorthAmerica, IESNA). Создан для передачи фотометрических данных световых приборов, между разными светотехническими программами. IES формат поддерживается большинством профессиональных компьютерных программ (DIALux, Relux, Lightscape, 3D StudioMax, 3D StudioViz и др.) в которых используется средства освещения. Файл IES является цифровым отражением, максимально приближенной к реальности, источника света. Файлы формата IES широко используются многими изготовителями СП и является одним из промышленных стандартов файлов фотометрических данных.

На рисунке 2.2 показано приложение четвертой версии IESGen, с помощью которого можно создать файл с нужным световым узором. Построение осуществляется в выбранном порядке числовых значений, что соответствует параметром яркости.

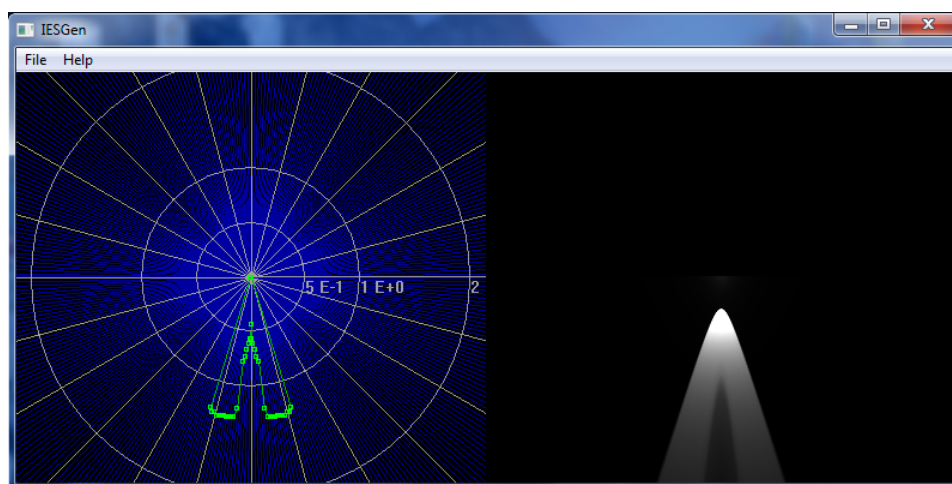


Рисунок 2.2 – Интерфейс IES – генератора (IESGen)

Возможность визуализации КСС направлено на прорисовку нужного изображения формы светораспределения. Следующим шагом служит сохранение и обработка данных в среде MicrosoftWindowsNotepad (блокнот). Прорисованный вариант с помощью IESGen сохраняется в формате IES и открывается в Notepad для корректировки математической модели IES формата данных. IES файл обрабатывается в соответствии со стандартом IESNA: LM – 63 – 1995, разработанного Светотехническим Обществом Северной Америки (IESNA), дополнительно изложенного [25].

2.2 Характеристика объектов исследования

В настоящей работе объектами исследования является:

- 1) Растение – огурец, культура, которая рассматривается как модель растения вертикального роста.
- 2) Теплица - помещение с заданными размерами и высотой подвеса светильников.
- 3) Источник света – светодиодный модуль (облучатель). Рассматривается конструкция и параметры светораспределения в стандартной промышленной теплице.

2.2.1 Характеристика растения

В качестве основного модельного растения, для которого необходимо разработать облучатель, выбран огурец, который выращивается в теплицах.

Для расчетаоблучательной установки необходимо определить модель растения. Исследования стереометрии листа огуречных растений, при дополнительном облучении в [26] показали, что форма листа приближена к полусферической. Пространственная характеристика всего растения очень сложна, однако с помощью гониофотометра оригинальной конструкции и методики определения пространственной характеристики небольших объектов [27] можно определить пространственную характеристику 25-30 дневной рассады. Исследования

показали [28], что растение с крупными взрослыми тремя листьями имеют пространственную характеристику, приближенную к равномерной функции, а значит полусферы.

Рассматривая особенности роста листьев на стебле отдельного растения огурца, можно заметить, что непосредственно над каждым листом располагается лист четвертого от него яруса.

Это позволяет представить пространственную модель растения огурца в виде полусфер находящихся друг над другом. В плотной посадке листья будут представлять множество полусфер, расположенных рядом. Как показывают исследования [27] для оценки облученности близко расположенных физических тел с полусферической пространственной характеристикой следует применять косинусную зависимость, т.е. эти группы приемников излучения моделировать плоской горизонтальной пластиной.

Однако такая модель применима только для низкорослых растений. На равномерность облучения растений огурца выращиваемых на вертикальных шпалерах в большей степени оказывает влияние высота подвеса облучателей и в меньшей расстояние между ними. Выращиваемые в телицах огурцы достигают размеров в несколько метров.

Зеленый лист и, тем более, растение в целом являются объемными приемниками излучения. Их пространственная характеристика может изменяться в зависимости от стадии развития растения, объема ценоза, условий облучения и многих других факторов.

Поэтому для разработки оптимальной конструкции облучателя требуется иная модель растения и требуются использовать иные параметры для оценки равномерности облучения растения, например, вертикальная или цилиндрическая облученности.

2.2.2 Характеристика теплицы

Теплицы различаются по своей форме, размеру и сезону использования [29].

По размеру стандартные промышленные теплицы могут быть:

- Малые, с размерами: ширина — 7,5 м, высота – 4 м, длинна от 10 до 20 м;
- Средние. Ширина – 10 м, высота – 5 м, от 20 до 40 м;
- Большие. Ширина – 12 м, высота – 6 м, длинна от 40 до 60 м.

Тип, размеры и конфигурация промышленных теплиц определяются возможностями и потребностью хозяйства, где они строятся. Современные теплицы представляют собой блоки из одного или нескольких тепличных модулей. Каждый модуль, в свою очередь, представляет собой теплицу, оснащенную всеми основными видами технологических систем жизнеобеспечения растений и поддержания микроклимата. То есть, будучи соединенным со всем строением, каждый модуль имеет собственный налаженный микроклимат и специфические под каждый вид растений устройства жизнеобеспечения.

Строения могут быть [30]:

- стеллажными;
- безстеллажными.

Стеллажный вариант отличается тем, что культуры выращиваются на полках, оснащенных бортами. Второй вариант проще – растения находятся прямо на земле. Стеллажный вариант позволяет увеличить продуктивность теплицы. Между стеллажами должен оставаться проход в 1,5 метра. Материал для полок – дерево, пластик или железобетон.

С учетом размеров и форм теплицы располагают таким образом, чтобы растения равномерно освещались в течение всего дня, в том числе в зимнее время года.

Для расчетов нами выбрана промышленная теплица средних размеров, типичный внешний вид и размеры которой представлены на рисунке 2.3.

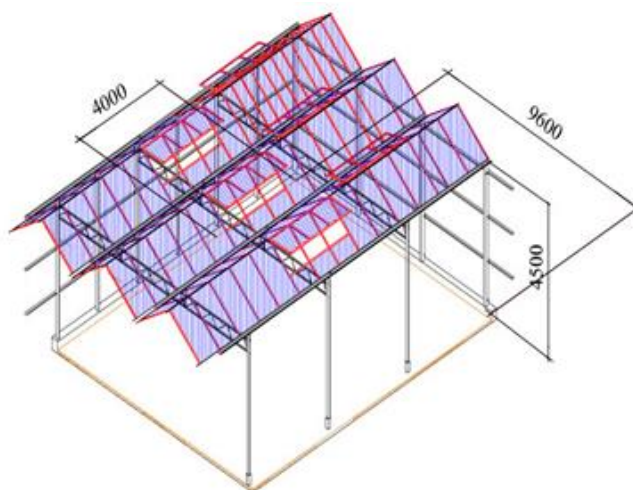


Рисунок 2.3 – Конструкция теплицы

Конструкция промышленной теплицы типа «Venlo» (Венло): длина пролета 9,6 м, высота колонн от фундамента до лотка 4,5 м, шаг колонн 4,0 м.

Конструкция несущего каркаса теплицы состоит из колонн, ферм, лотков, прогонов, раскосов, тяг, соединительных и крепежных элементов. Они выполняются из нержавеющей стали или оцинкованного металла либо сплавов, не подверженных коррозии. Планировочная сетка колонн каркаса теплицы должна оптимально сочетать как возможности по обеспечению необходимого пространственного маневра в шатровом объеме культивационного сооружения при размещении оборудования инженерно- технологических систем и растений, так и условия для максимального снижения металлоемкости сооружений. Этим требованиям отвечает каркас теплиц с пролетом 8-10 м и шагом колонн 4 м, высота колонны – 4,5-5 м.

Лотки для выращивания растений устраиваются на выровненном и уплотненном земляном основании с песчаной подсыпкой, поверх которой укладывается специальная синтетическая ткань, для исключения прорастания сорняков.

2.2.3 Характеристика светодиодного облучателя (основные требования)

Центральная задача при разработке адаптивной облучательной установки для теплиц – правильный выбор базового источника излучения (светильника, светодиодного модуля). В соответствии с заданием, необходимо разработать облучатель для адаптивной ОБУ с оптимальным спектром излучения, возможностью управления спектральным составом, оптимальной для выращивания различных растений в теплицах кривой силы излучения, а также удобными для монтажа и эксплуатации габаритами.

Основными важнейшими параметрами такого облучателя являются: базовый спектр излучения и параметры и характеристики оптической системы (коэффициент полезного действия – КПД, кривая силы света – КСС). За счет оптимального спектрального состава и оптимального светораспределения облучателя можно добиться значительного снижения энергозатрат. КПД показывает, какая доля светового потока лампы выходит из светильника. У современных светильников он составляет $0,8 \div 0,95\%$.

В основу сравнительной (с другими источниками излучения) оценки таких затрат можно взять необходимое количество квантов падающих на единицу поверхности растения при условии, что соотношение синей, зеленой и красной составляющих в спектре излучения облучателя близко к идеальному, необходимому для растения на данном этапе его развития, а также коэффициент использования излучения растением. Последний параметр должен включать и коэффициенты поглощения излучения растением и геометрические факторы, которые определяют ту долю падающего от излучателя потока, которая падает на растение.

КСС описывают распределение излучения светильника в пространстве. В основу их классификации положены два независимых друг от друга признака: зона направлений максимальной силы света и коэффициент формы КСС, под которым понимают отношение максимальной силы света в данной мериди-

ональной плоскости к среднеарифметической силе света светового потока для этой плоскости. Под КСС понимают зависимость силы света светового потока от меридиональных и экваториальных углов, получаемый сечением его фотометрического тела плоскостью или поверхностью.

Отметим, что для тепличных облучателей более приемлемым является термин кривая силы излучения (КСИ).

2.3. Анализ оптимального спектрального состава облучателя и выбор светодиодов.

Спектральный состав. Исходный спектральный состав излучения светильника определяется количеством светодиодов излучающих в синей, красной и зеленой областях спектра. Требования к спектру излучения светодиодного модуля однозначно определить сложно, так как он может быть разным для разных типов растений, зависит от стадии их развития, а также необходимости использования излучения разных участков спектра для управления фотохимическими процессами в растении (см. раздел 1).

Для растения нужен весь спектр падающего излучения в пределах ФАР, но в каком соотношении – вопрос? Для правильного развития растений важно, чтобы они получали хорошо сбалансированный по спектру свет. Ясно, что необходимо ориентироваться на спектры поглощения пигментов растений. Но так эти спектры расположены в достаточно широком спектральном диапазоне, то, по-видимому, нет смысла полностью повторять в источнике излучения спектры действия, как фотосинтеза, так и фоторегулирующих пигментов.

Несмотря на большое количество исследований по влиянию спектрального состава света на рост и фотосинтез растений, действие узкополосного светодиодного освещения на растения остается недостаточно изученным. Обнаружен ряд эффектов влияния такого облучения на работу фотосинтетического аппарата (ФСА) растений, но целостной картины этих эффектов нет. Поэтому точных сведений о необходимых, даже для наиболее распространенных теп-

личных растений, соотношениях интенсивностей излучения в разных участках спектра нет. Ясно только, что излучение должно быть в пределах ФАР.

В отечественной и зарубежной литературе ориентируются, как правило, на спектр действия фотосинтеза (см. раздел 1, рисунок 1.3). Часто в отечественной литературе ссылаются на фундаментальную работу Н.Н. Протасовой [1], которая определила для растений некое «оптимальное» соотношение интенсивностей излучения в разных участках спектра. Это соотношение равно для диапазонов длин волн (нм): $400-500/500-600/600-700 = 30/20/50 \%$. Однако все исследователи (биологи) утверждают также, что необходимый растению спектр индивидуален для каждого типа растения и может быть разным на разных стадиях развития растений.

Основываясь на этих сведениях, выберем в качестве исходного суммарный спектр излучения светодиодного модуля таким образом, чтобы выполнялось соотношение Н.Н. Протасовой [1]. В дальнейшем, точные соотношения интенсивностей в разных участках спектра можно подбирать изменением токов светодиодов. В этом случае облучатель будет обладать универсальными характеристиками качества излучения, а также адаптивностью.

Выбор светодиодов. Этот выбор должен быть основан не только на возможности смоделировать любое соотношение в спектре излучения модуля, но и на экономических соображениях. Как было показано в [31], оптимальное соотношение в спектре излучения светодиодного модуля с возможностью управления распределением энергии в спектрах излучения в пределах ФАР можно создать путем составления различных сочетаний цветных и белых СД.

При этом можно выбрать 2 основных варианта сочетания светодиодов:

1) *Трехцветный светодиодный облучатель.* Исходя из номенклатуры выпускаемых промышленностью светодиодов, наиболее оптимальным является вариант со следующим трехцветным составом светодиодов:

- белый (теплый оттенок),
- синий ($\lambda_p = 420-465$ нм).
- красный ($\lambda_p = 660$ нм),

Три типа светодиодов позволяют комбинировать различные варианты спектрального состава излучателя в пределах ФАР, в том числе выполнения соотношения 30/20/50 % по Н.Н.Протасовой[1]. Этот вариант сочетания светодиодов дает возможность изменять суммарный поток от нулевого значения до номинального (среднего), создавать любую комбинацию спектра для любого этапа развития растения, минимизировать затраты на производство облучателя, а также обладают универсальностью применения для различных видов растений и стадий их развития. Поэтому трехцветный вариант облучателя для адаптивной ОБУ является предпочтительным.

Для подбора конкретных типов светодиодов необходимо ориентироваться не только на универсальные спектры действия фотосинтеза, но и на спектры поглощения пигментов, обладающих регулирующими свойствами.

Белый светодиод с теплым оттенком позволяет охватить возбуждающим излучением всю зеленую область, которая не является главной в процессах фотосинтеза, но может быть нужна для фоторегулирования фотопроцессами. Как следует из литературных источников – количественные энергетические характеристики фоторегулирующего действия малы по сравнению с фотосинтезом. Это светодиод может возбуждать также оба типа фитохромов: Φ_{660} и Φ_{730} . Поэтому белый светодиод со сплошным спектром излучения в широкой области экономичных светильниках – обязательный элемент. Наиболее подходящим является светодиод фирмы Nichia с теплым оттенком цветамарка NS3W183TS. Спектр его показан на рисунке 2.4. Видно, что этот светодиод в синей области имеет максимум полосы в области 430 нм. Эта спектральная область нужна для растения для управления некоторыми фотохимическими процессами (см. раздел 1). Другие типы «белых» светодиодов обладают максимумом излучения в «синей» области спектра только при длинах волн более 450 нм.

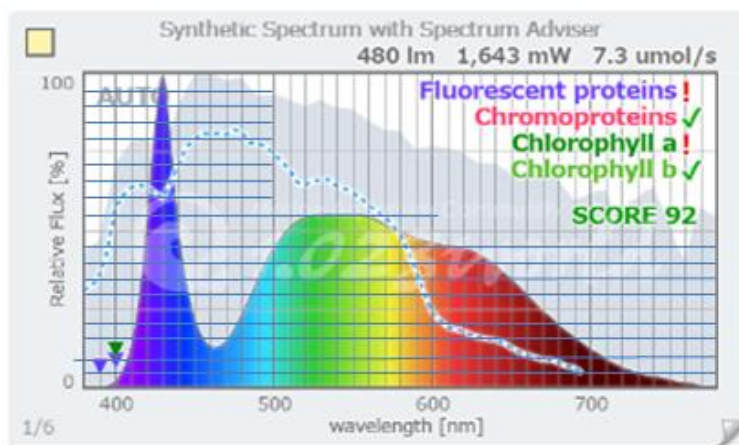


Рисунок 2.4 – Спектр излучения теплого белого светодиода Nichia

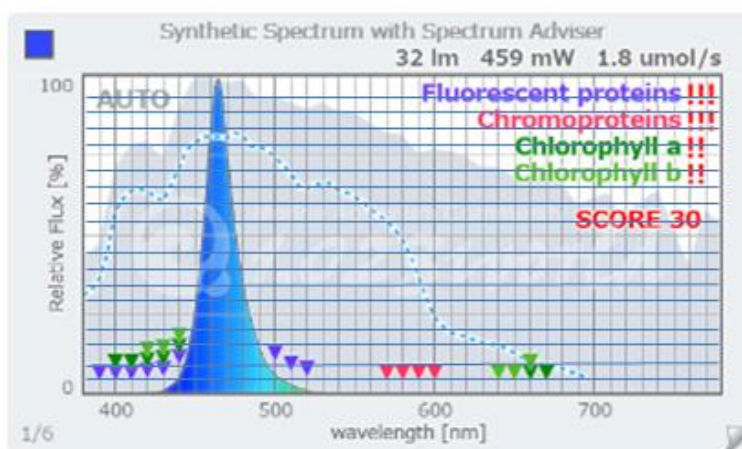


Рисунок 2.5 – Спектр излучения синего светодиода Nichia

Отметим, что светодиоды фирмы Nichia обладают наилучшим соотношением цена/качество (таблица 2.1).

Для создания необходимого по Н.Н. Протасовой [1] соотношения спектра излучения облучателя в область 400 – 500 нм следует добавить «синий» светодиод. Можно выбрать марку LXM3-PD01. Красный светодиод должен, в соответствии с этим соотношением, добавить такое количество энергии (Вт/м^2), чтобы в области 600 – 700 нм излучалось 50% плотности потока энергии.

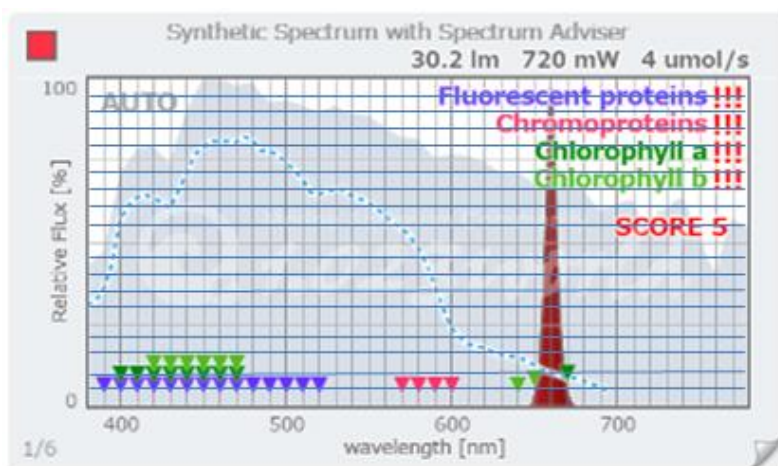


Рисунок 2.6 – Спектр излучения красного светодиода Philips

Для подбора оптимального исходного спектра растений мы воспользовались описанной выше программой SPECTRA.

При подборе спектров можно ориентироваться на соотношение Протасовой 30%, 20%, 50% , либо на кривую Свентицкого[5], показанную на рисунке 2.7

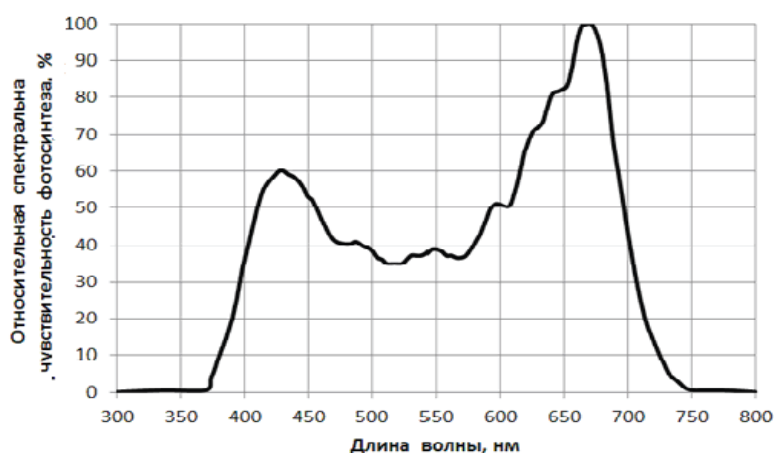


Рисунок 2.7 –Относительная спектральная фотосинтезная эффективность излучения по Свентицкому [5]

Мощности излучения белого светодиода с теплым оттенком мощностью 1 Вт фирмой Nichia составляет в различных участках спектра:

- 400-500 нм – 0,27 Вт;
- 500-600 нм – 0,45 Вт;
- 600-700 нм – 0,28 Вт.

Мощности излучения синегосветодиода фирмы Nichia в области 400-500 нм составляет 1 Вт.

Мощности излучения красного светодиода фирмы Philips в области 600-700 нм составляет 3 Вт.

Таким образом, если использовать по одному светодиоду в сумме получим излучение в различных участках спектра:

- 400-500 нм - 1,27 Вт;
- 500-600 нм – 0,45 Вт;
- 600-700 нм – 3,28 Вт.

Если взять два белых светодиода, то светодиоду в сумме получим излучение в различных участках спектра:

- 400-500 нм - 1,54 Вт;
- 500-600 нм – 0,9 Вт;
- 600-700 нм – 3,56 Вт.

Тогда получим соотношение синий/зеленый/красный, равная 0,26/0,15/0,59 таким образом можно подобрать нужный необходимый спектральный состав.

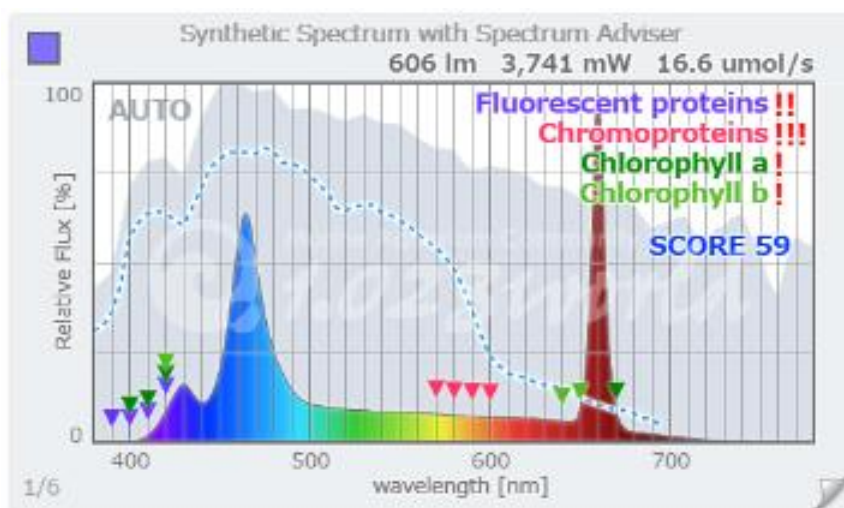


Рисунок 2.8 – Спектр излучения комбинация теплого белого, красного, синего светодиодов Nichia и Philips.

2) *Двухцветный светодиодный облучатель.*

Более экономичным вариантом является применение двух светодиодов, белого и красного. Как оказалось, использование белого светодиодов в сочетании с красным может быть вполне достаточным для создания излучателя со спектральным составом близким к спектру действия фотосинтеза, поскольку у белого светодиода значительную долю составляет синий компонент свечения. На рисунке 2.9 показан нормированный расчетный спектр, полученный путем сложения взятых в определенных пропорциях спектров свечения белого и красного светодиодов.

Однако, как показывает расчет, необходимого соотношения синий/зеленый при использовании любых, выпускаемых в мире, белых светодиодов достичь невозможно. Для примера ниже приведены результаты расчета соотношения потоков для трех белых светодиодов фирмы Nichia и одного красного светодиода фирмы Philips.

Мощности излучения белого светодиода с теплым оттенком мощностью 1 Вт фирмой Nichia составляет в различных участках спектра:

- 400-500 нм - 0,27 Вт;
- 500-600 нм – 0,45 Вт;
- 600-700 нм – 0,28 Вт.

Таким образом, если использовать по одному светодиоду в сумме получим излучение в различных участках спектра:

- 400-500 нм - 0,27 Вт;
- 500-600 нм – 0,45 Вт;
- 600-700 нм – 0,28 Вт.

Если взять пять белых светодиодов, то светодиодов в сумме получим излучение в различных участках спектра:

- 400-500 нм - 1,35 Вт;
- 500-600 нм – 2,25 Вт;
- 600-700 нм – 1,40 Вт.

Тогда получим соотношение синий/зеленый/красный, равная 0,17/0,29/0,57 таким образом можно подобрать нужный спектральный состав.

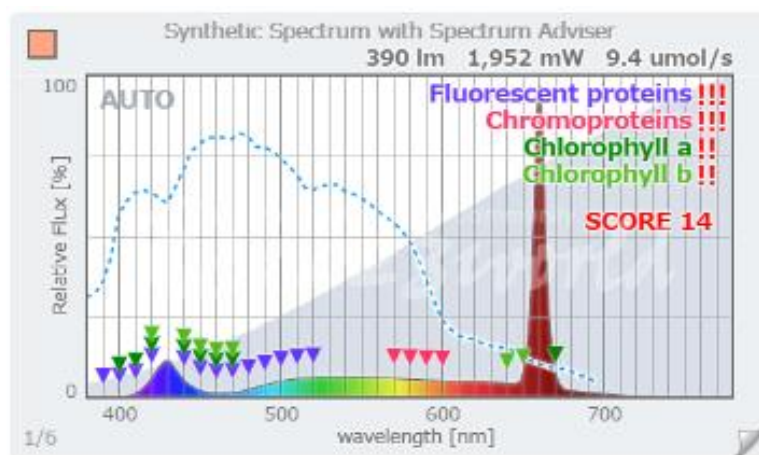


Рисунок 2.9 – Спектр излучения комбинация теплого белого, красного и светодиодов Nichia и Philips.

Выводы:

1. Наиболее оптимальным вариантом для создания адаптивного облучателя для теплиц является использование трехцветного светодиода с использованием белого и синего светодиодов фирмы Nichia.
2. Экономичный оптимальный двухцветный облучатель может быть разработан на основе применения специального белого светодиода с увеличенной синей составляющей в спектре излучения.

Таблица 2.1 – Характеристики и стоимость известных производителей светодиодов

Производитель	Наименование светодиода	Цвет	Угол свечения, градусов	Световой поток, лм (мВт)	Номинальный ток, мА	Напряжения, В	Цена за единицу, руб.
Nichia Corporation	NCSB119T	синий	120	32 лм	350 - 700	3,3-3,8	53,74
	NCSG119T	зеленый	120	128 лм	700	3,6 - 4	53,74
	NS3W183TS	теплый белый	140	180 лм	350	3,5	35
Osram Opto Semiconductors	LB W5AM-GYHY-25-Z	синий	170	30 лм	350	3,2	93,67
	OSLON SSL® 150	красный	150	358 мВт	350	2,1	146,81
	OSTAR Projection Compact	янтарный синий зеленый	120	43 лм 325 мВт 67 лм	350 350 350	2,2 3,4 3,5	-
Seoul Semiconductor Inc.	Z Power P5-II	красный зеленый синий (RGB)	120	35 лм 57 лм 13 лм	350 350 350	2,5 3,8 3,6	464,79
Cree	ML-EROY-A1-0000-000503	синий	125	175 мВт	150	3,2	39,35
	XP-EXPEPHR-L1-R250-00801	красный	130	300 мВт	350	2,2	72,79
	XP-E2BGR-L1-0000-00E01	зеленый	135	118 лм	350	3,2	-
Everlight Electronics	SHWO	синий	120	23 лм	750	3,7	294,45
LED Engin Inc.	LZ4-00R208-0000	красный	95	2500 мВт	700	10,5	485,9478
	LZ1-00DB00-0000	синий	80	1025 мВт	1000	3,6	1161,50
Sharp	GM5YJ01210A	оранжевый			100	2,3	-
Philips Lumileds Lighting Company	LXM3-PD01	красный	125	350 мВт	350	2,2	129,55

2.4. Моделирование кривой силы излучения облучателя

Другая важнейшая задача при разработке фитосветильника – оптимальная конструкция и оптимальная кривая силы излучения. Хорошие параметры фитооблучателей есть у многих фирм, например, у Филипс [32]. Однако их облучатели не в полной мере универсальны и кривые силы излучения, по видимому, не являются оптимальными.

2.4.1 Конструкция и габариты облучателя

Их необходимо выбирать таким образом, чтобы облучатель обладал наименьшим коэффициентом затенения в теплице после монтажа. Применение светодиодов позволяет разрабатывать практически любые по форме и мощности облучатели. Поскольку растения (огурцы, томаты) в теплице растут в виде длинного ряда с расстоянием между ними около метра, то целесообразно делать светильник длиной 1 – 1,5 метра и располагать его вдоль рядов растущих растений. Поперечное сечение такого светильника с малым коэффициентом затенения может быть в районе $0,05 \times 0,1 \text{ м}^2$. Приблизительно такие габариты облучателей для теплиц делают некоторые фирмы, например Филипс [32]. Мощность такого светодиодного облучателя может быть до 200 Вт. Вариант конструкции предлагаемого нами облучателя показан на рисунке 2.10.

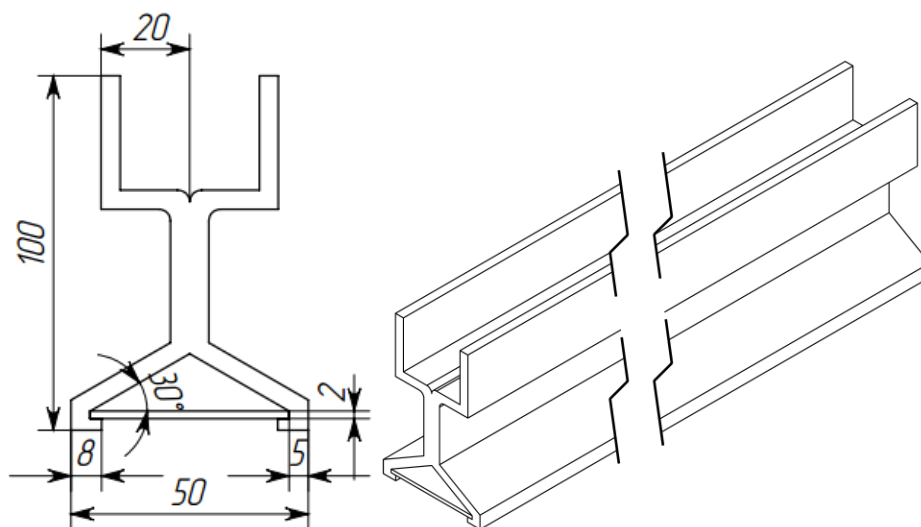


Рисунок 2.10 – Эскизный чертеж облучателя

2.4.2 Анализ светораспределения параметров фотометрических тел светильников

Для проектирования систем освещения в помещениях различного назначения или уличного освещения уже давно разработаны определенные требования, в том числе к светораспределению. Кривые силы света (КСС) светильников, предназначенных для освещения, подразделяются на семь типов: концентрированная (0° - 15°), глубокая (0° - 30°), косинусная (0° - 35°), полуширокая (35° - 55°), широкая (55° - 85°), равномерная (0° - 180°), синусная (70° - 90°). Требования к облучателям для теплиц по светораспределению по-видимому, четко и однозначно не сформулированы. Поскольку в настоящее время основными источниками для освещения теплиц являются натриевые лампы [33].

Применение светодиодов позволяет конструировать любые виды светораспределения облучателей. Используя светодиодные источники света, являющиеся по существу точечными, легко методами геометрической оптики создавать заданную диаграмму КСС для конкретного объекта. Можно получить равномерно рассеянный свет и максимально равномерное освещение для теплиц, а можно сделать прожектор с углом луча в несколько градусов. Вторичная оптика позволяет получить равномерное освещение даже от осесимметричных светильников.

Поэтому появляется возможность разработать вариант облучателя для тепличного растениеводства с оптимальной кривой силы излучения (КС). Это можно сделать на основе моделирования распределения облученности растений. При этом необходимо учитывать вид растения (его модель), так как растения могут быть низкорослые (салат) и высокорослые (томаты, огурцы). В связи с этим возникают вопросы, - какая КСИ наиболее эффективна и оптимальна для выращивания различных видов растений и по какой характеристике необходимо оценивать нормы облученности растений?

Зеленый лист и, тем более, растение в целом являются объемными приемниками излучения. Их пространственная характеристика может изменяться в

зависимости от роста и развития растения, объема ценоза, условий облучения и многих других факторов. Поэтому расчет облучательной установки для дополнительного облучения плодоносящих растений довольно сложен.

В настоящей работе на основе моделирования освещенности высокорослых растений предлагается один из вариантов создания светильника с оптимальной и достаточно универсальной КСИ, а также возможная конструкция и технология изготовления опытной партии облучателя.

При моделировании решались две задачи:

- какой параметр или характеристика должны быть положены в основу при расчете облученностей в теплице для разных типов растений, например, вертикальная, горизонтальная или цилиндрическая облученности?
- какая КСИ наиболее эффективна и оптимальна для выращивания различных видов растений, например низкорослых и высокорослых?

2.5. Моделирование со стандартными КСС светильников.

2.5.1. Облучатель с КСС светильников для уличного освещения

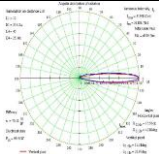
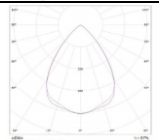
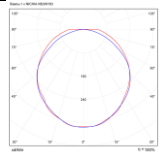
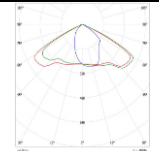
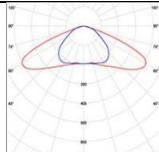
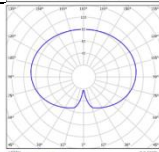
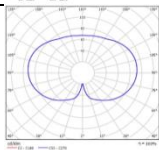
В первую очередь был сделан анализ пригодности для создания оптимального по светораспределению освещения растений в теплицах уличных светильников со стандартными типами КСС, которые были взяты из ГОСТ 17677-82. В таблице 2.2 представлены сведения о параметрах световых приборов в соответствии с типами КСС. Моделирование производилось с использованием программы DIALux, которая позволяет получить компьютерную модель распределения света в виде 3D модели фотометрического тела в любом помещении и оптимизировать ее.

При моделировании светильники располагались в помещении, длина которого составляет 13,5 м, ширина 8 м и высота 6 метров. Высота подвеса светильников в расчете принималась 5,0 м. На рисунке 2.11 приведено 3D представление распределения света для семи типов КСС светодиодных светильни-

ков. Представленные светильники обозначены в соответствии с нумерацией таблицы 2.2.

В этих расчетах для оценки качества и формы распределения освещенности были использованы расчетные поверхности, расположенные в вертикальной плоскости в месте предполагаемого роста растений (для каждого светильника в одинаковой позиции). Результаты распределения показаны на рисунке 2.1

Таблица 2.2 – Параметры СП по типу КСС

№	Данные из нормативного документа ГОСТ 17677-82				Подбор параметров СП по типу КСС					
	Тип кривой силы света		Зона направле- ний макси- мальной света	Коэффициент формы силы света	Характеристики		Фирма производитель			По типу КСС
	Обозначение	Наименование			Ф, лм	Р, Вт	Оптоган www.optogan.ru/	Фокус www.focus-led.ru/	Galad http://galad.ru/	
1	К	Концентриро- ванная	0°-15°	K_{Φ}^3	6500K/ 4700 лм 5000K/ 4700 лм 4000K/ 4700 лм 3000K/ 4450 лм	58	Оптолюкс – Ригель – 80			
2	Г	Глубокая	0°-30°, 180°-150°	$2 \leq K_{\Phi} < 3$	6500K/ 5300 лм 5000K/ 5300 лм 4000K/ 5300 лм	50	Оптолюкс – Вега – 60			
3	Д	Косинусная	0°-35°, 180°-145°	$1,3 < K_{\Phi} < 2$	700, (синий) 1400,(красный)	57		УСС – 60 БИО		
4	Л	Полуширокая	35°-55°, 145°-125°	$1,3 \leq K_{\Phi}$	6500K/7100лм 5000K/7100лм 4000K/7100лм 3000K/6800лм	67	Оптолюкс – Стрит – 80			
5	Ш	Широкая	55°-85°, 125°-95°	$1,3 \leq K_{\Phi}$	5400	60		УСС 60 – Маги- страль		
6	М	Равномерная	0°-180°	$K_{\Phi} \leq 1,3$, при этом $I_{\min} > 0,4$ I_{\max}	4000K/3710	40			GALAD Шар	
7	С	Синусная	70°-90°, 110°-90°	$1,3 < K_{\Phi}$, при этом $I_0 < 0,7$ I_{\max}	4000K/3760	40			GALAD Ло- тос	

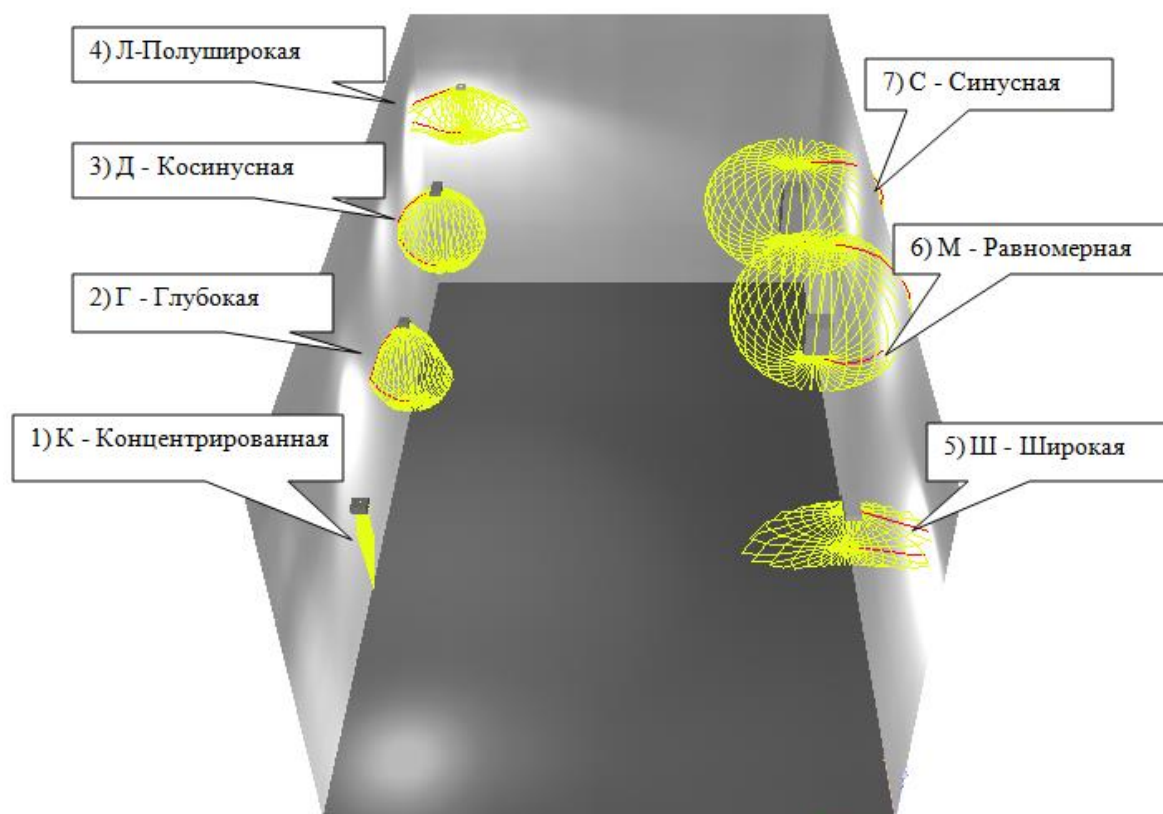


Рисунок 2.11 – 3D – представление распределения света светодиодных светильников по типу КСС

Для оценки качества и формы распределения освещенности были использованы расчетные поверхности. Расчетные поверхности размещались (в вертикально плоскости) в предполагаемой месте роста растений (для каждого светильника в одинаковой позиции). Результаты распределения показаны на рисунке 2.12.

Проанализировано светораспределение кривых сил света в пространстве с помощью кривых изолиний. На рисунке 2.12 видно, что все световые приборы имеют почти одинаковый характер зависимости светораспределения. Для дальнейшего анализа распределения освещенности и моделирования светодиодного модуля останавливаем выбор КСС с концентрированным типом (рисунок 2.12, номер1).

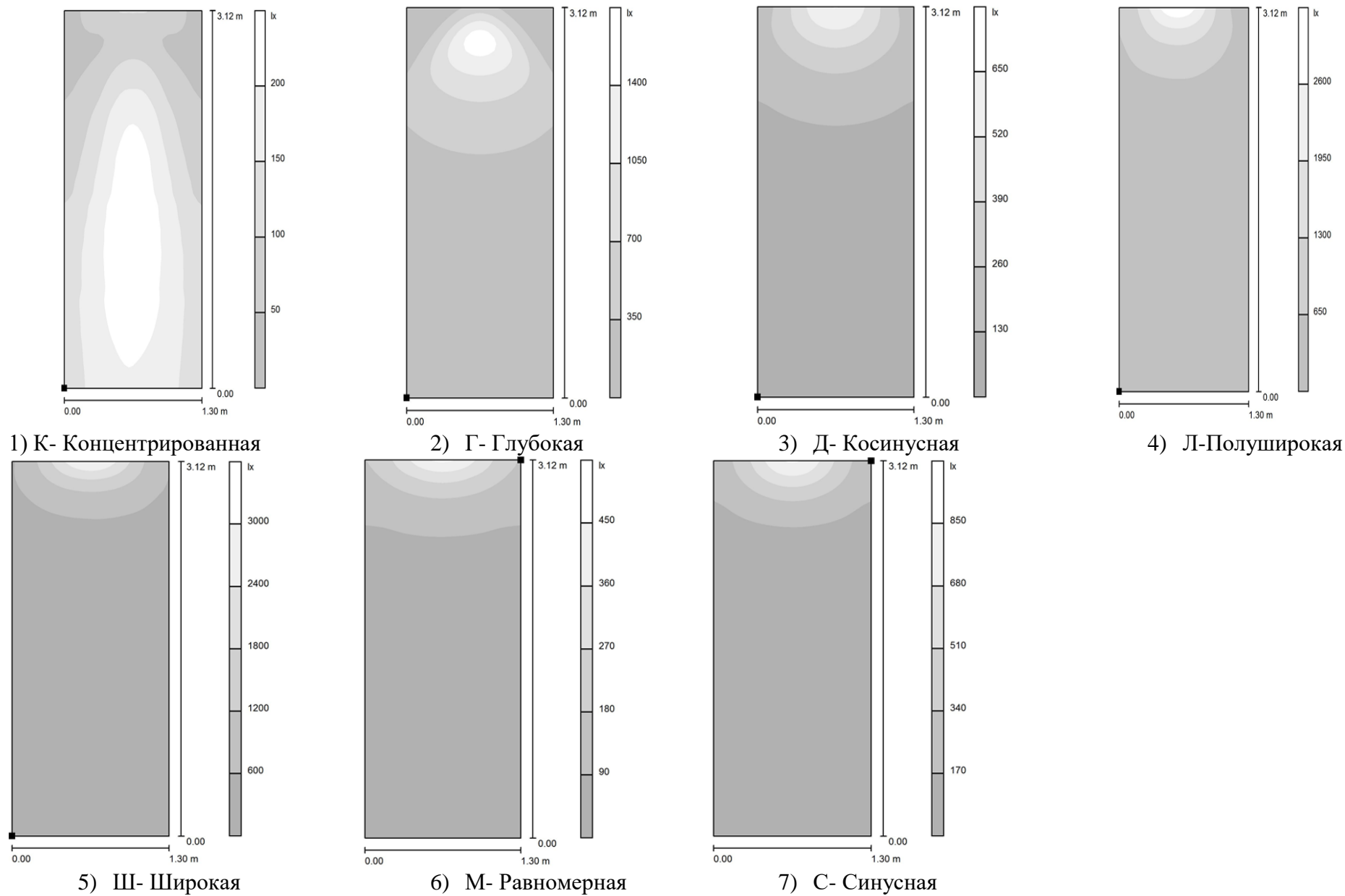
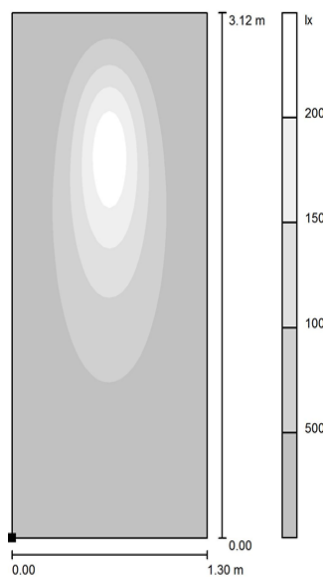
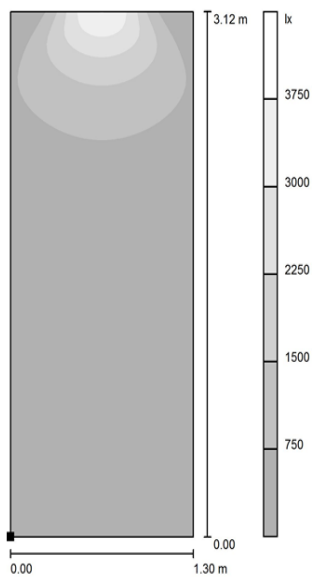


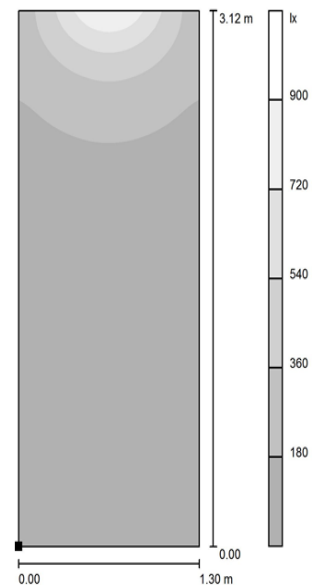
Рисунок 2.12 – Распределения освещенностей на расчетной поверхности для каждого из СП



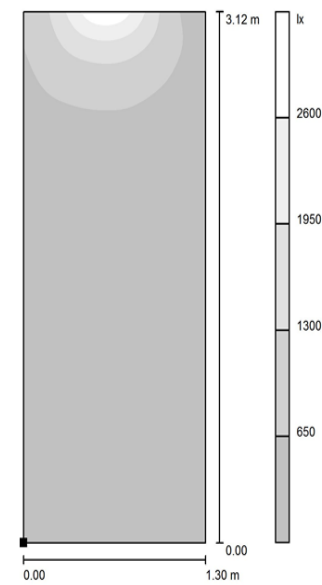
1) К- Концентрированная



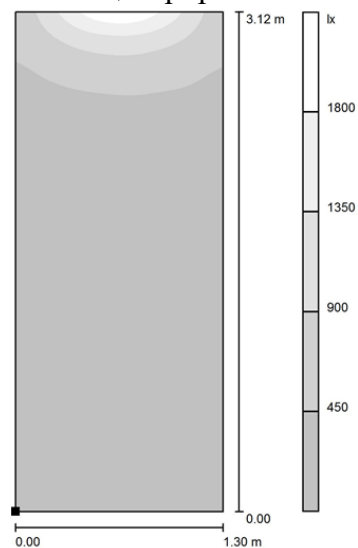
2) Г- Глубокая



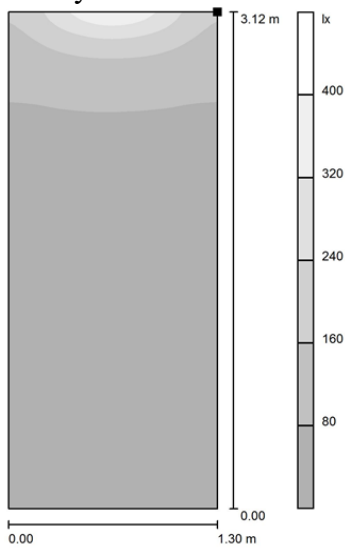
3) Д- Косинусная



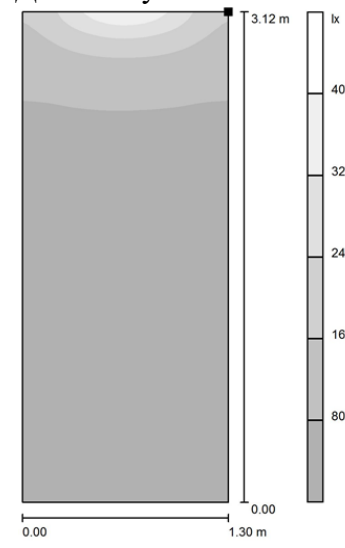
4) Л-Полуширокая



5) Ш- Широкая



6) М- Равномерная



7) С- Синусная

Рисунок 2.13 – Распределения освещенности на расчетной поверхности для каждого из СП с углом повороте 15^0

Аналогичные результаты были получены при повороте светового прибора (и, следовательно, КСС) под углом 15^0 относительно оси симметрии КСС. Это светораспределение имитирует освещение растения сбоку под углом 15^0 . Результаты представлены на рисунке 2.13. Как видно, при повороте на 15 градусов характер распределения освещенности практически не меняется.

Таким образом, результаты моделирования со стандартными КСС свидетельствуют о том, что наилучшее светораспределение для освещения высокорослых растений дают световые приборы с концентрированным типом кривой силы света. Следовательно, для высокорослых растений более предпочтительным является применение излучателей прожекторного типа.

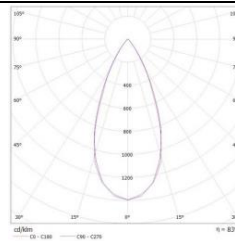
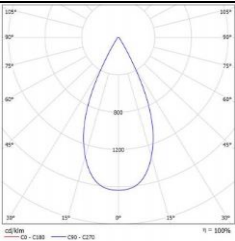
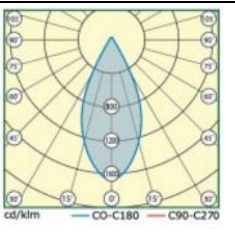
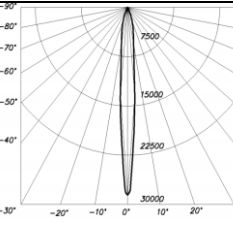
2.5.2. Облучатель с КСС для приборов прожекторного типа

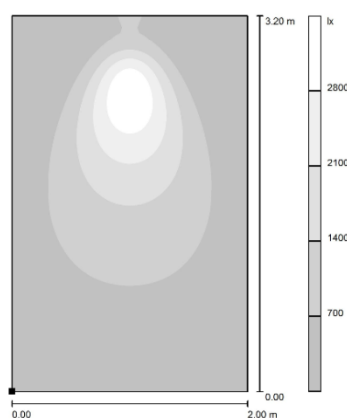
Основываясь на этом факте, мы сделали анализ распределения освещенности на расчетной поверхности для нескольких светильников прожекторного типа. На рисунке 5 приведены результаты распределения освещенности на расчетной поверхности для каждого из светодиодных светильников прожекторного типа с концентрированными КСС, приведенными в таблице 2.3.

Результаты показывают, что удовлетворительное распределение освещенности может быть обеспечено при применении светильников с КСС прожекторного типа. При этом наиболее равномерное распределение освещенности в вертикальной плоскости обеспечивают светильники с наиболее узкой диаграммой направленности излучения (светильник ССП01-20).

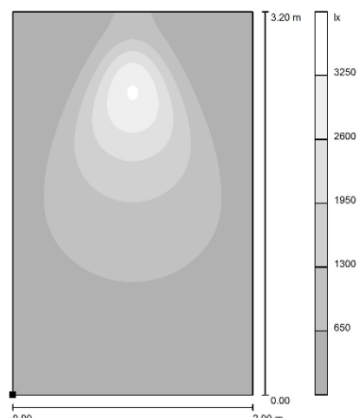
На рисунке 2.14 приведены результаты распределения освещенности на расчетной поверхности для каждого из светодиодных светильников прожекторного типа.

Таблица 2.3–Параметры СП прожекторного типа с концентрированным типом кривой силы света

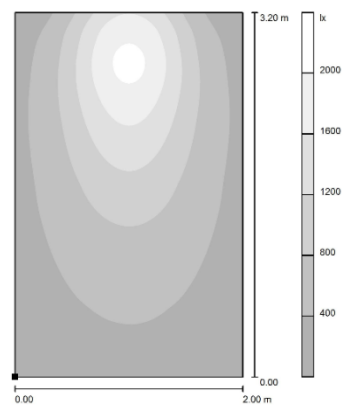
Виды прожекторов	1	2	3	4
	Прожектор Оптолюкс-Вега-240	Оптолюкс-Спэйс-200(П)	INDUSTRY.2-180-272	ССП01-20
Тип кривой силы света				
Напряжение питания	~176 - 264 В	~176 - 264 В	~176-276 В	220 В
Мощность	200 Вт	180 Вт	172 Вт	75 Вт
Габариты (ДхШхВ)	427×215×174 мм	320 ×320×302 мм	762×217×130 мм	447×279×115
Световой поток	6500К/ 21 000 лм 5000К/ 21 000 лм 4000К/ 21 000 лм	6500 К / 20 000 лм 5000 К / 20 000 лм 4000 К / 20 000 лм	6000К / 18 900 лм 4000 К / 17 000 лм	4100



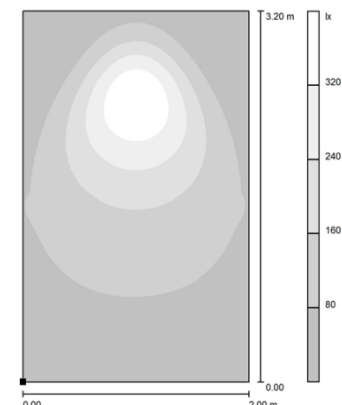
1) Прожектор Оптолюкс-Вега-240



2) Оптолюкс-Спэйс-200(П)



3) INDUSTRY.2-180-272



4) ССП01-20

Рисунок 2.14 – Результаты распределения освещенности на расчетной поверхности для каждого из светодиодных светильников прожекторного типа

Из анализа результатов расчета следует, что 4-ый светодиодный светильник прожекторного типа с концентрированным типом КСС является наиболее подходящим для облучения высокорослых растений.

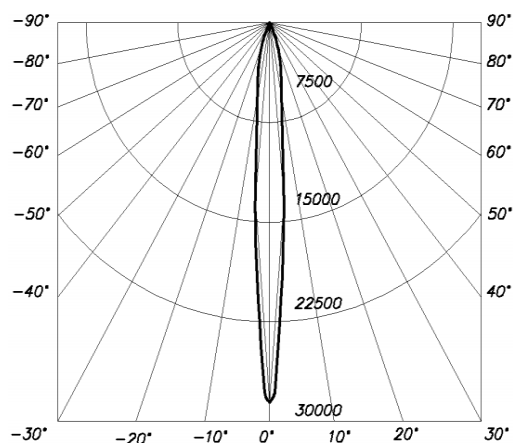


Рисунок 2.15 – Кривая сила света светодиодного светильника прожекторного типа ССП01-20

С использованием КСС этого светового прибора сделан расчет освещения в теплице в рядах, вдоль которых растут растения. Размеры СП с данным светораспределением были выбраны такие же, как у СП GreenPowerPhilips[7]. Этот светодиодный модуль является излучателем для обеспечения досветки растений в тепличном хозяйстве. Однако КСС его не известна. Световой прибор GreenPowerPhilips имеет размеры 1269,75 x 50 x 110 мм. По-видимому, подобные линейные размеры светильника является наиболее оптимальными при формировании необходимого светораспределения и формы фотометрического тела облучателя.

Было проанализировано распределения освещенности в горизонтальной (высота расчетной поверхности 0,85м, рисунок 2.16) и вертикальной (в месте роста растений, рисунок 2.17) плоскостях.

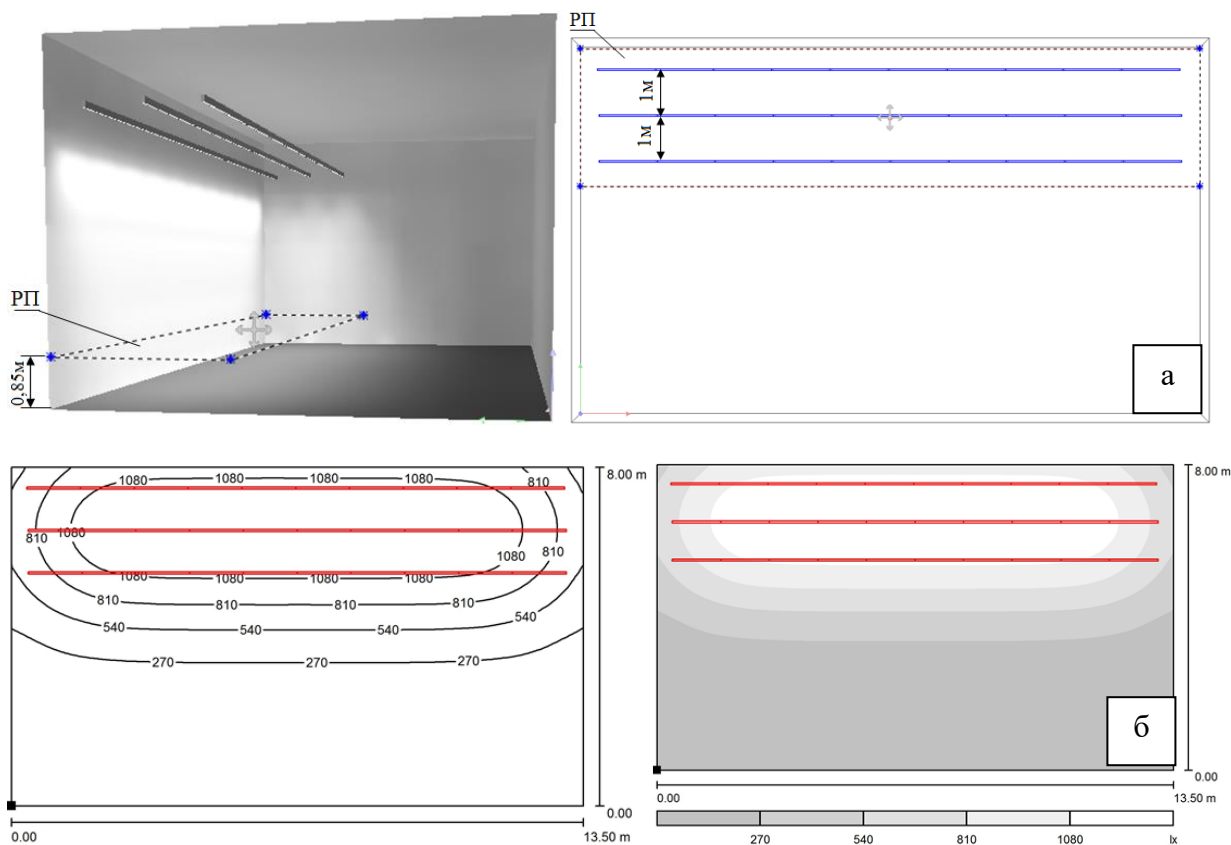


Рисунок 2.16 – Модель объекта и расчетные данные светодиодного светильника прожекторного типа в горизонтальной освещенности:

- а) 3D - модель объекта и вид в плане, расположения расчетной поверхности РП;
- б) Изолинии и градации серого, как результат распределения горизонтальной освещенности (высота РП 0,85 м);

Из рисунка 2.16 видно, что в горизонтальной плоскости создается равномерная освещенность. На уровне 0,85 м среднее значение составляет 1000 лк.

Для оценки вертикального распределения освещенности нами проанализировано качество заданного параметра для центрального (второго) ряда световых приборов. Расчетные поверхности 1 и 2 расположены симметрично относительно центрального ряда на расстоянии 0,5 м от оси светильника в ряду. Распределение освещенности носит равномерный характер, данные представлены для вертикальной протяженности равной 3 метрам.

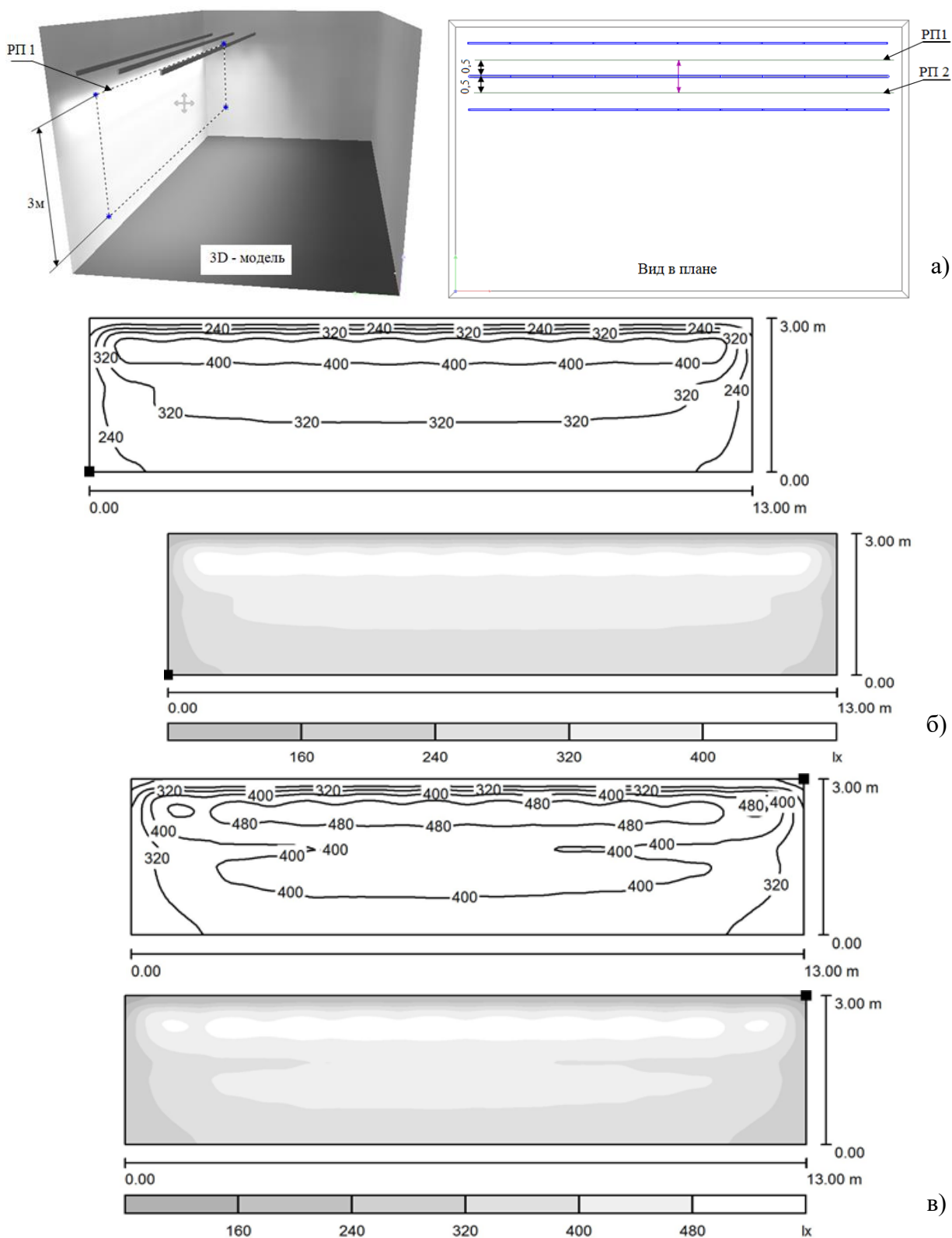


Рисунок 2.17 – Модель объекта и расчетные данные освещенности светодиодного светильника прожекторного типа в вертикальной плоскости:

а) 3D - модель объекта и вид в плане, расположение расчетной поверхности РП1;

б) Изолинии и градации серого, как результат распределения освещенности для РП1 и РП2

Проведенный анализ данных распределения кривых силы света светильников и качества их освещения преимущественно в вертикальной плоскости свидетельствуют о корректировке параметров данного процесса и предложения собственной модели фотометрических данных светильника – светодиодного модуля с оптимальными светотехническими характеристиками.

Следовательно, для достижения хорошего качества распределения облученности по поверхности тела высокорослого растения требуется разработать специальный светильник (облучатель). Его КСИ должна учитывать как геометрические характеристики самого растения, так и геометрию расположения растений в теплице (например, учитывать расстояние между рядами), а также условия освещения (сбоку или сверху).

Из описанных результатов моделирования ясно, что облучатель должен быть прожекторного типа, а диаграмма направленности КСИ должна быть узкой и обеспечивать боковое облучение растений.

2.6. Моделирование КСИ специализированного облучателя

Моделирование было выполнено в следующей последовательности.

Выбор теплицы. Существует много вариантов конструкции теплиц, см., например, материалы изложенные в [34,35]. Для моделирования нами выбран один из вариантов теплицы, показанный на рисунке 2.19.

- Высота подвеса светильников была равна 4,5 и 5 м;
- Система выращивания овощей: в пролете шириной 8 м 4 ряда подвешенных лотков с огурцами;

В стандартном варианте с лампами ДНаТ светильники ориентируются поперек протяженности рядов растений (рисунок 2.19). Ряды светильников расположены между рядами растений (оптический центр лампы посередине прохода) и над рядами растений в междурядье (оптический центр лампы над лотком между шпалерами для подвязки растений).

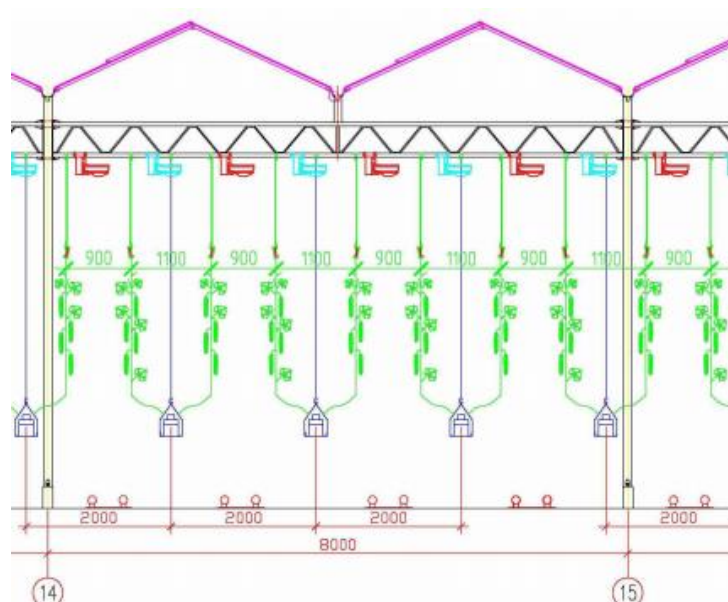


Рисунок 2.19 – Вариант расположения светильников в теплице

Для того, чтобы организовать досветку растений сбоку и сформировать более широкую КСИ, для описанного варианта выращивания растений, мы предлагаем располагать светодиодные облучатели только над рядами растений. При этом конструкция облучателя должна быть такой, какая показана на рисунке 2.10. То есть в облучателе монтируется 2 ряда светодиодов, которые с помощью отражателей или линз направляют потоки облучения на два соседних ряда растений (слева и справа от того над, которым располагается светильник, соответственно).

Определение модели светораспределения. Учитывая параметры теплицы и расположение облучателей сформируем математическую модель светораспределения для нашего светильника. Алгоритм такой модели может быть понят из рисунка 2.20.

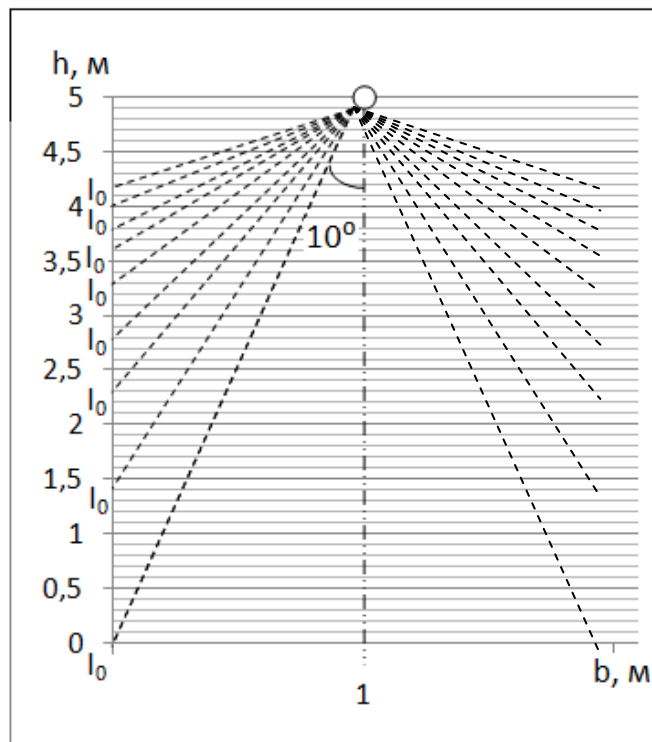


Рисунок 2.20 – Схема формирования модели КСИ светодиодного облучателя.

Исходящие из светильника лучи, подвешенного, в данном случае, на высоте 5 м в плоскости 1, падают на, расположенные на расстоянии 1 метр слева и справа от плоскости 1, вертикальные плоскости. Это соответствует модели, описанной выше, то есть каждая плоскость – это ряд, в котором растут огурцы. Лучи, выходящие под углами 10° , падают, как предполагается, на горизонтальную плоскость с лотками (корни растения). Лучи, выходящие под углами 50° , падают в соседних плоскостях на предполагаемые вершины растений. Исходя из расположения листьев растения на стволе, можно в первом приближении считать, что плоскость листьев перпендикулярна падающим лучам. В этом случае для обеспечения равномерной по вертикали ствола растения облученности в каждой его точке должна быть одинаковая интенсивность падающего потока излучения I_0 . Тогда интенсивность исходящих от источника (облучателя) лучей I_0 и приходящих в разные точки облучаемой плоскости должна подчиняться закону квадрата расстояния и может быть вычислена по формуле:

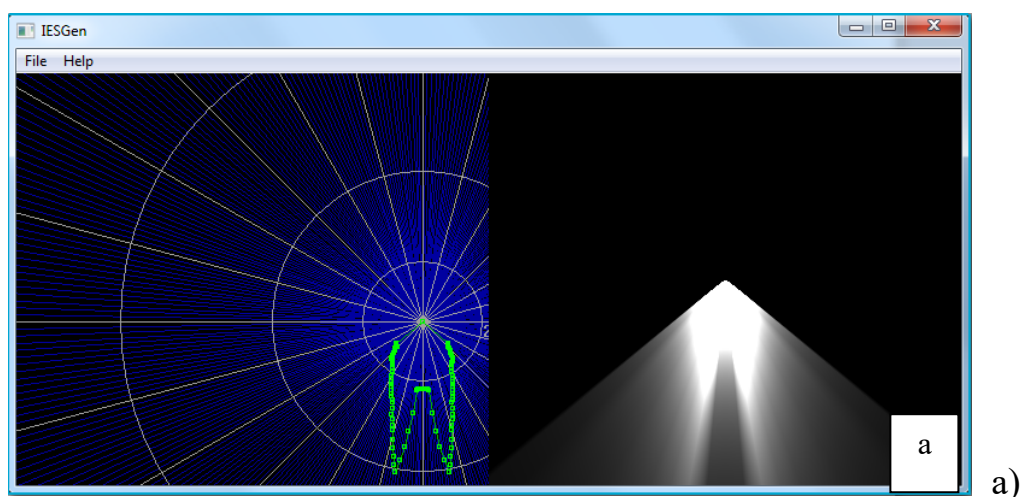
$$I_{0*} = I_0 \times r^2 \quad (2.1)$$

где r_* - расстояние от облучателя до точки падения луча, падающего под углом α . Зависимость I_{0*} от α и есть кривая силы излучения облучателя. Рассчитанная по такому алгоритму КСИ представлена в таблице 2.6.

Формирование IES - файла. Для проверки возможности анализа облученностей растений от облучателей с рассчитанной КСИ и с описанным выше расположением облучателей в теплице по данным таблицы 2.6. был сформирован IES - файл (рисунок 2.21). Этот файл переносится в программу DIALux для визуализации объекта (математическая модель светодиодного модуля).

Таблица 2.4– Расчетные данные КСИ

Градусов	I_0 , Вт/м ²	h, м	b, м	$r_* = \sqrt{h^2 + b^2}$, м	$I_{0*} = I_0 \times r_*^2$
0°	1	-2	1	$\sqrt{5} = 2,23$	5
5°	1	-2,06	1	$\sqrt{5,25} = 2,29$	5,25
10°	1	5	1	$\sqrt{26} = 5,1$	26
15°	1	3,6	1	$\sqrt{13,96} = 3,74$	13,96
20°	1	2,7	1	$\sqrt{8,29} = 2,88$	8,29
25°	1	2,2	1	$\sqrt{5,84} = 2,42$	5,84
30°	1	1,7	1	$\sqrt{3,89} = 1,97$	3,89
35°	1	1,4	1	$\sqrt{2,96} = 1,72$	2,96
40°	1	1,2	1	$\sqrt{2,44} = 1,56$	2,44
45°	1	1	1	$\sqrt{2} = 1,41$	1,41
50°	1	0,8	1	$\sqrt{1,64} = 1,28$	1,28



а)

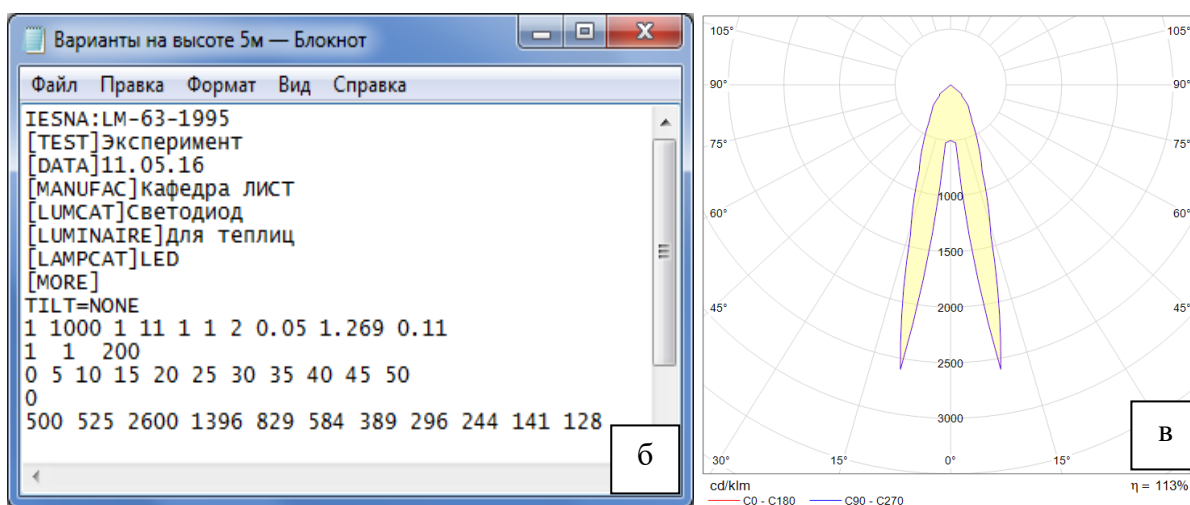


Рисунок 2.21– Демонстрация результата обработки данных:

- а) визуализация заданной формы светораспределения (согласно таблице 2.4);
- б) обработка данных в среде MicrosoftWindowsNotepad;
- в) математическая модель IES формата

Моделирование в DIALux, вариант 1. Затем в программе DIALux проводим расчет параметров освещенности на расчетных поверхностях. В качестве такой поверхности выбираем вертикальную плоскость на расстоянии 1м от центра светильника и определяем распределение освещенности на этой плоскости (рисунок 2.22), а также устанавливаем форму и распределение цилиндрической освещенности для заданной расчетной поверхности. Результаты расчетов представлены на рисунках 2.22.

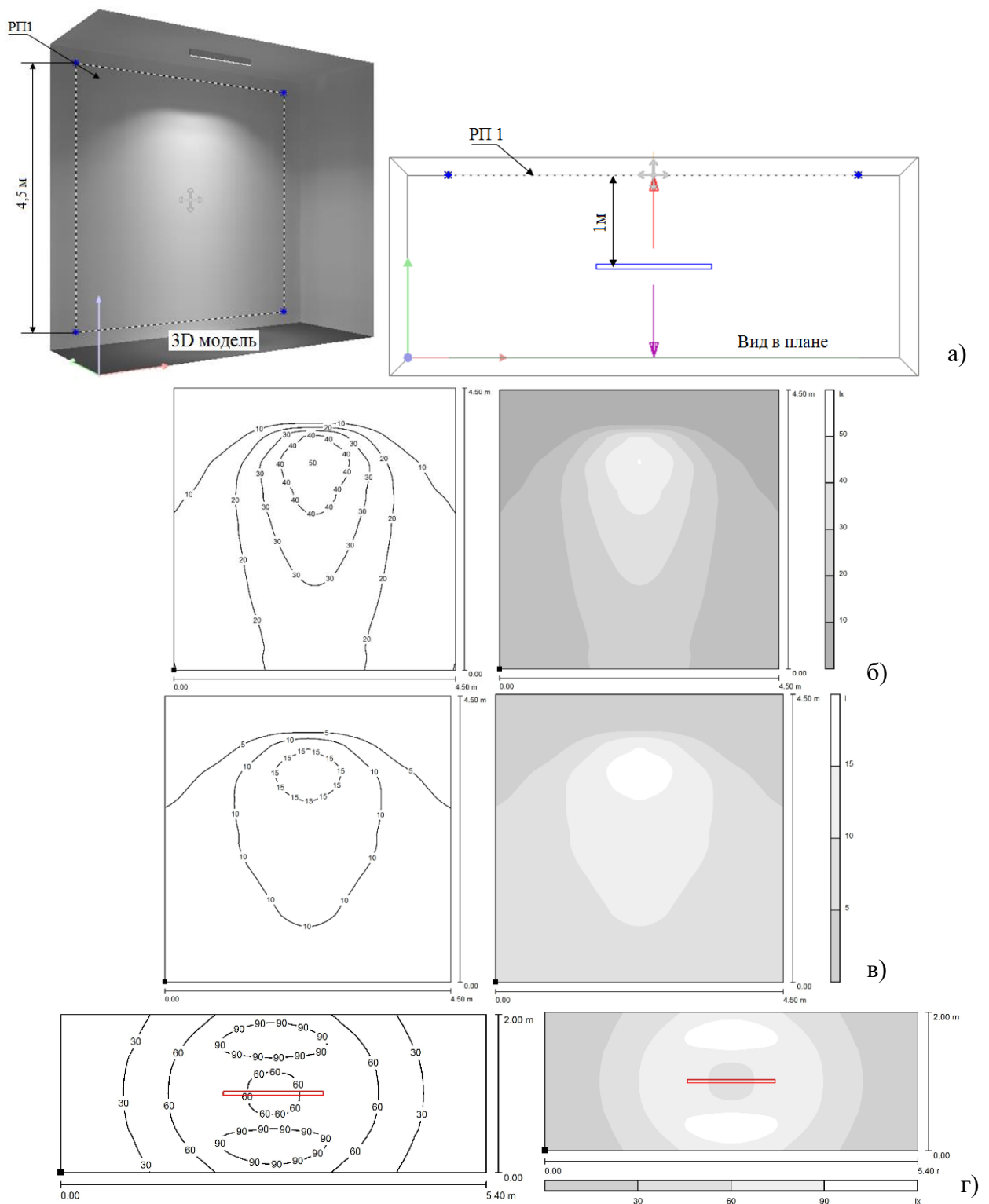


Рисунок 2.22 – Модель объекта и расчетные данные освещенности светодиодного светильника в вертикальной плоскости (на высоте 5 метров):

- а) 3D - модель объекта, вид в плане и расположение расчетной поверхности РП1;
- б) Изолинии и градации серого при распределении освещенности по вертикали для РП1;
- в) Изолинии и градации серого при распределении цилиндрической освещенности для РП1;
- г) Изолинии и градации серого, как результат распределения горизонтальной освещенности (высота рабочей плоскости 0,85 м)

Приведенные расчетные данные для двух типов освещенности (вертикальной и цилиндрической) имеют похожую форму распределения.

Моделирование в DIALux, вариант 2. Аналогичные расчеты были сделаны для второго варианта расположения светильника и расчетной плоскости. В этом случае высота подвеса облучателя равна 4,5 м, ряды растений отстоят друг от друга на 1 метр, как и в предыдущем случае, а расчетная вертикальная плоскость была выбрана на расстоянии 0,8 метра от плоскости расположения облучателя. Выбором такого расположения можно несколько скорректировать то обстоятельство, что листья растения расположены на разных и достаточно значительных расстояниях от ствола (1 метр от плоскости светильника).

С данными параметрами расположения расчетной плоскости и высоты подвеса облучателя в теплице формируем математическую модель светораспределения. Результаты представлены в таблице 2.5

Таблица 2.5 – Расчетные данные КСИ

Градусов	I_0 , Вт/м ²	h, м	b, м	$r_* = \sqrt{h^2 + b^2}$,м	$I_{0*} = I_0 \times r_*^2$
0°	1	-2	1	$\sqrt{4} = 2$	4
5°	1	-2,06	1	$\sqrt{4,25} = 2,06$	4,25
10°	1	5	1	$\sqrt{18,64} = 4,31$	18,64
15°	1	3,6	1	$\sqrt{13,96} = 3,74$	13,96
20°	1	2,7	1	$\sqrt{8,29} = 2,88$	8,29
25°	1	2,2	1	$\sqrt{5,84} = 2,42$	5,84
30°	1	1,7	1	$\sqrt{3,89} = 1,97$	3,89
35°	1	1,4	1	$\sqrt{2,96} = 1,72$	2,96
40°	1	1,2	1	$\sqrt{2,44} = 1,56$	2,44
45°	1	1	1	$\sqrt{2} = 1,41$	1,41
50°	1	0,8	1	$\sqrt{1,64} = 1,28$	1,28

IES-файл, сформированный по данным таблицы 2.5. показан на рисунке 2.24

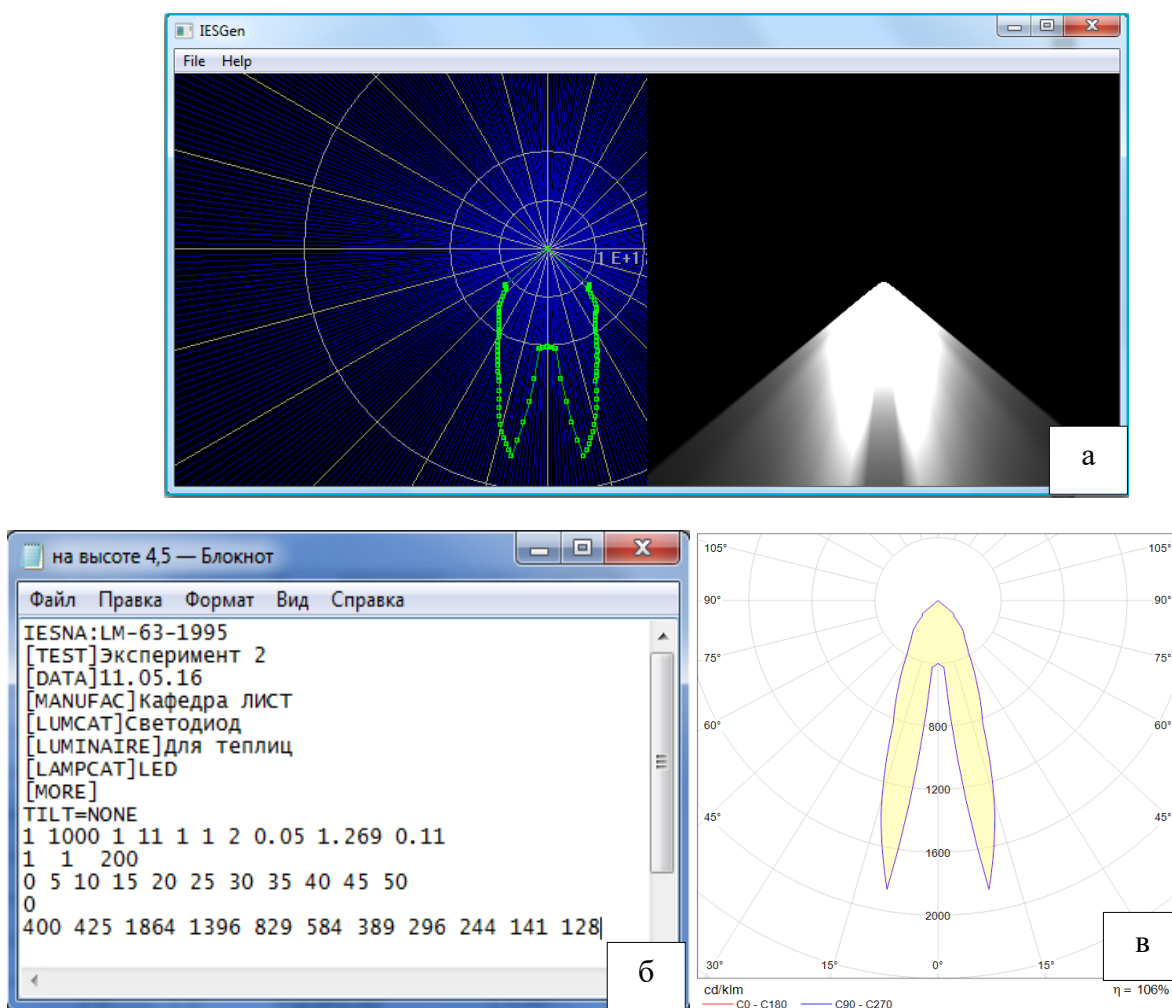


Рисунок 2.24 – Демонстрация результата обработки данных:

- а) визуализация заданной формы светораспределения (согласно таблице 2.5);
- б) обработка данных в среде MicrosoftWindowsNotepad;
- в) математическая модель IES формата данных

Далее вводится расчетная поверхность (на расстоянии 0,8м от центра светильника) и производится расчет распределения освещенности в вертикальной плоскости (рисунок 2.25) и определяется форма и распределение цилиндрической освещенности для заданной расчетной поверхности. Результаты расчета освещенностей представлены на рисунках 2.25 – 2.29

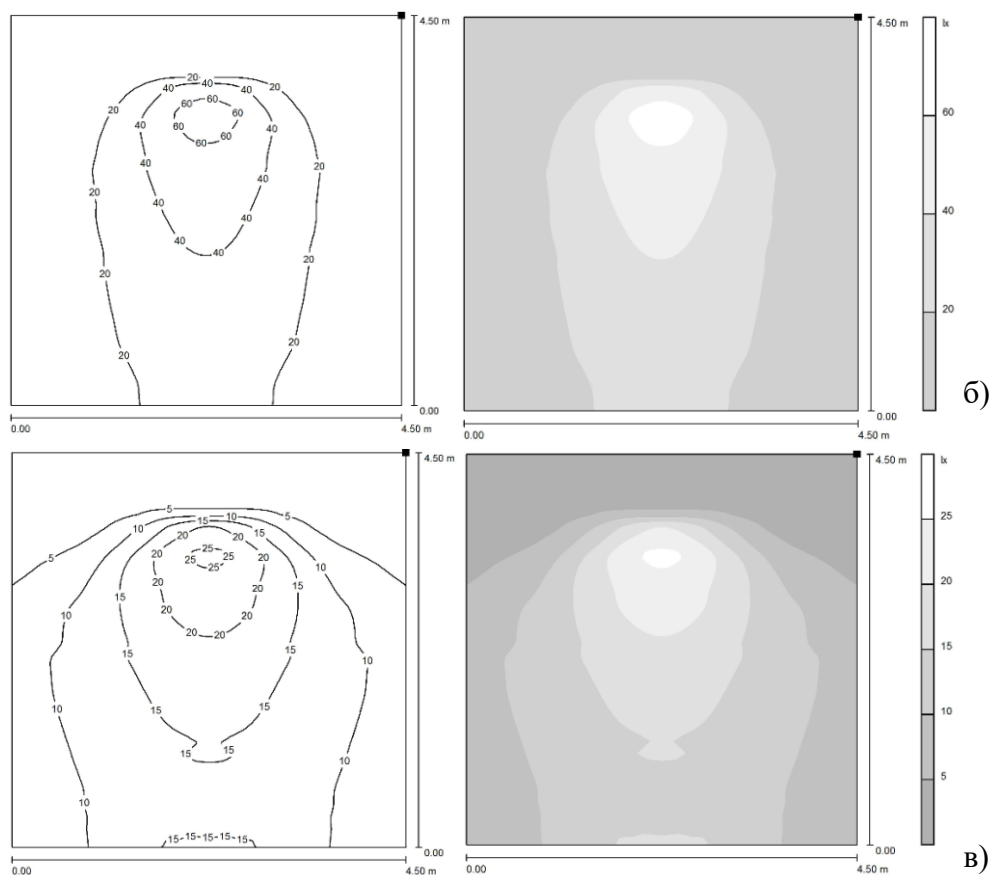
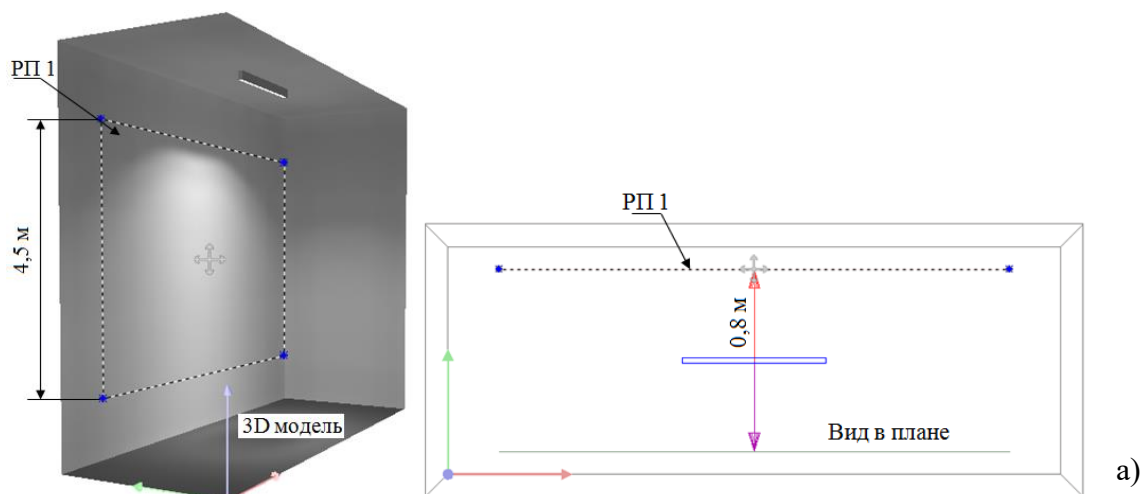


Рисунок 2.25 – Представление расчетных данных светодиодного светильника на высоте 4,5 метра (расчетные поверхности 0,8м):

- а) 3D - модель объекта и вид в плане, расположения расчетной поверхности РП 1;
- б) Изолинии и градации серого, как результат распределения освещенности по вертикали для РП1;
- в) Изолинии и градации серого, как результат распределения цилиндрической освещенности для РП1

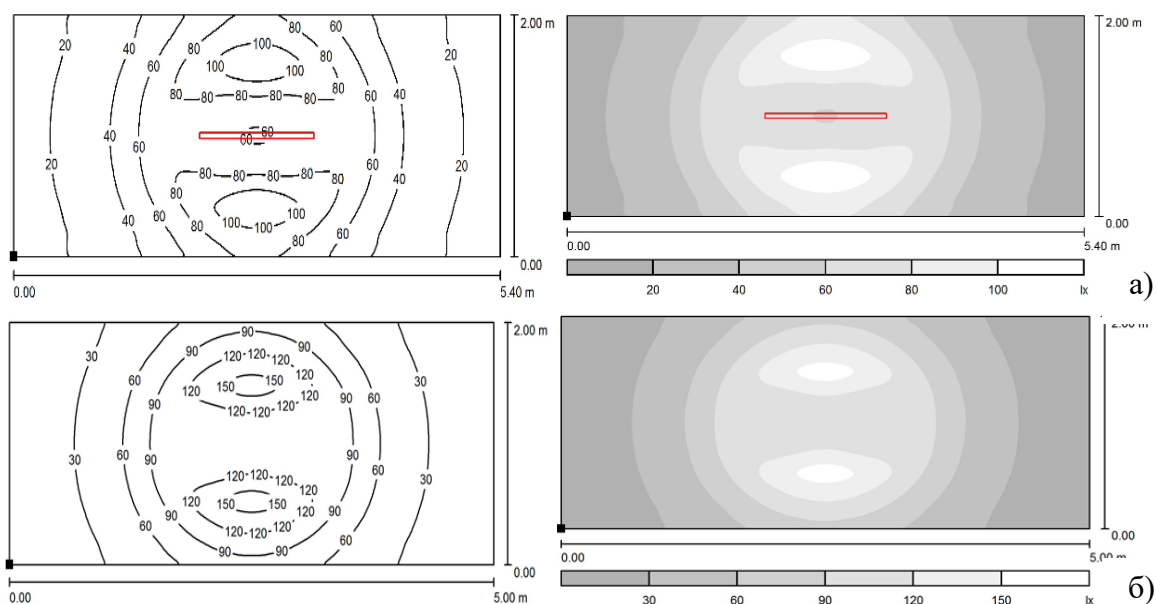


Рисунок 2.26 – Расчетные данные освещенности светодиодного светильника, расположенного на высоте 4,5 метра (ПР1, ПР2 симметрично, относительно центрального ряда):
а) Изолинии и градации серого, как результат распределения горизонтальной освещенности (высота рабочей плоскости 0,85 м);
б) Изолинии и градации серого, как результат распределения горизонтальной освещенности (высота рабочей плоскости 1,5 м)

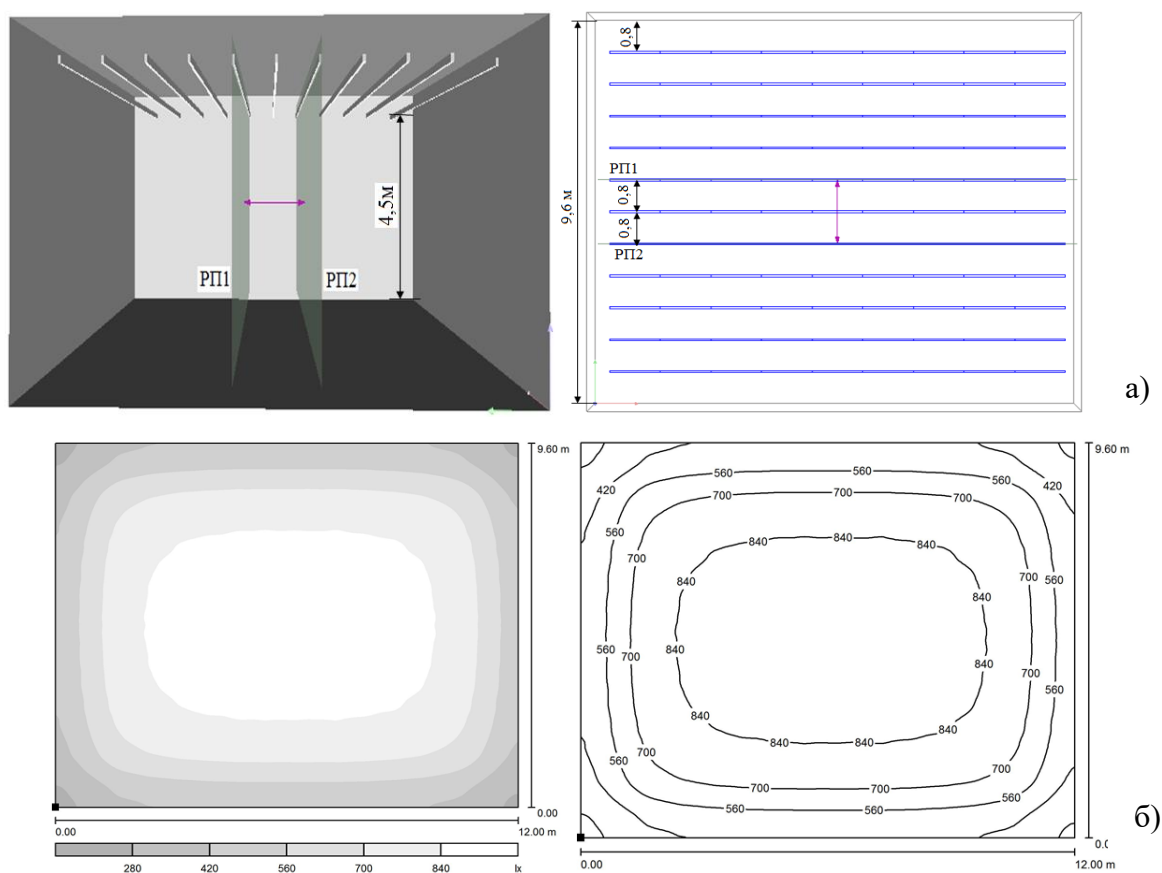


Рисунок 2.27 – Представление расчетных данных универсального светильника:
а) 3D модель объекта и вид в плане;
б) Изолинии и градации серого, как результат распределения горизонтальной освещенности (высота рабочая плоскость 0,85 м).

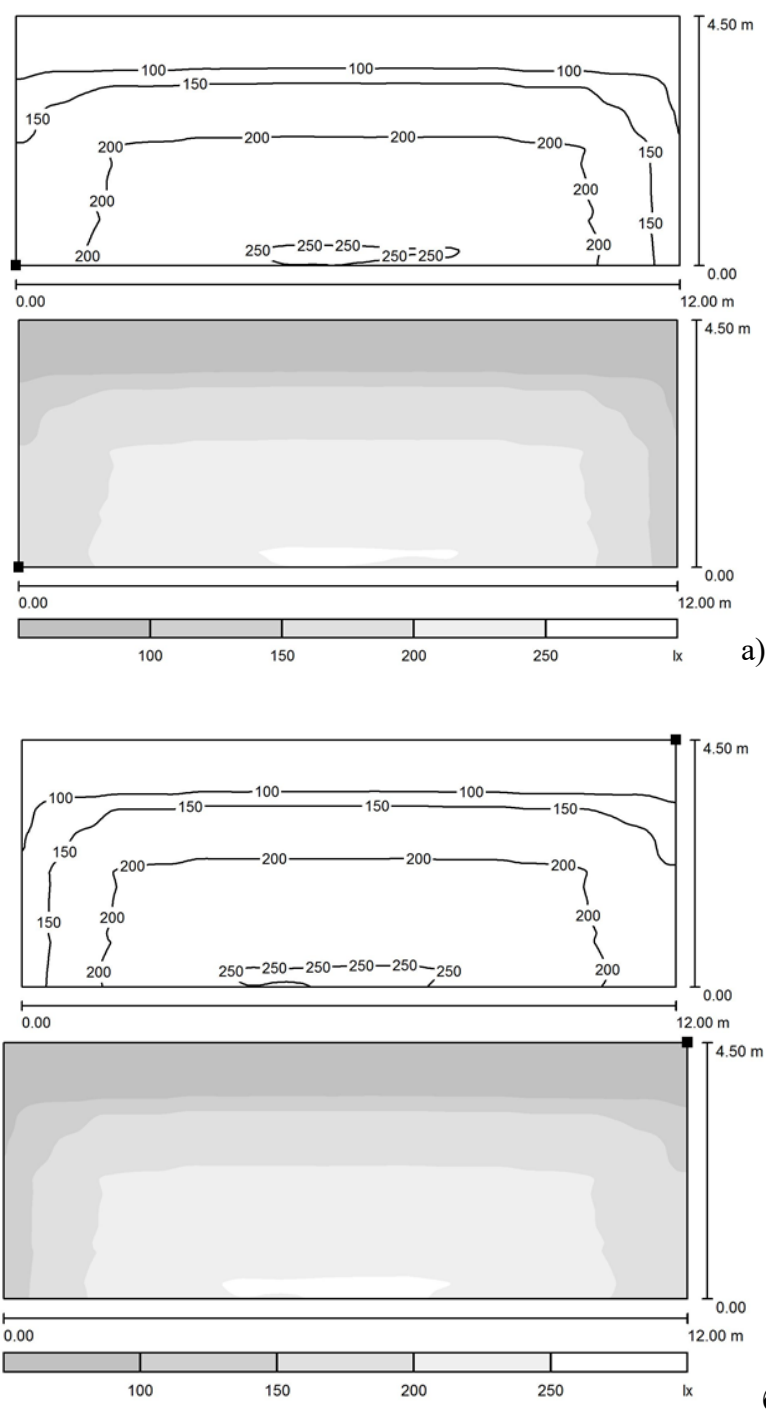


Рисунок 2.28 – Представление расчетных данных универсального светильника в вертикальной плоскости:

- а) Изолинии и градации серого, как результат распределения освещенности для РП 1;
- б) Изолинии и градации серого, как результат распределения освещенности для РП 2

На рисунке 2.29 представлена визуализация математической модели светодиодного модуля при расположении светодиодного модуля (облучателя) на разной высоте подвеса (5м, 4,5м, 3м). Согласно приведённым данным форма распределения освещенности в вертикальной плоскости носит одинаковый характер.

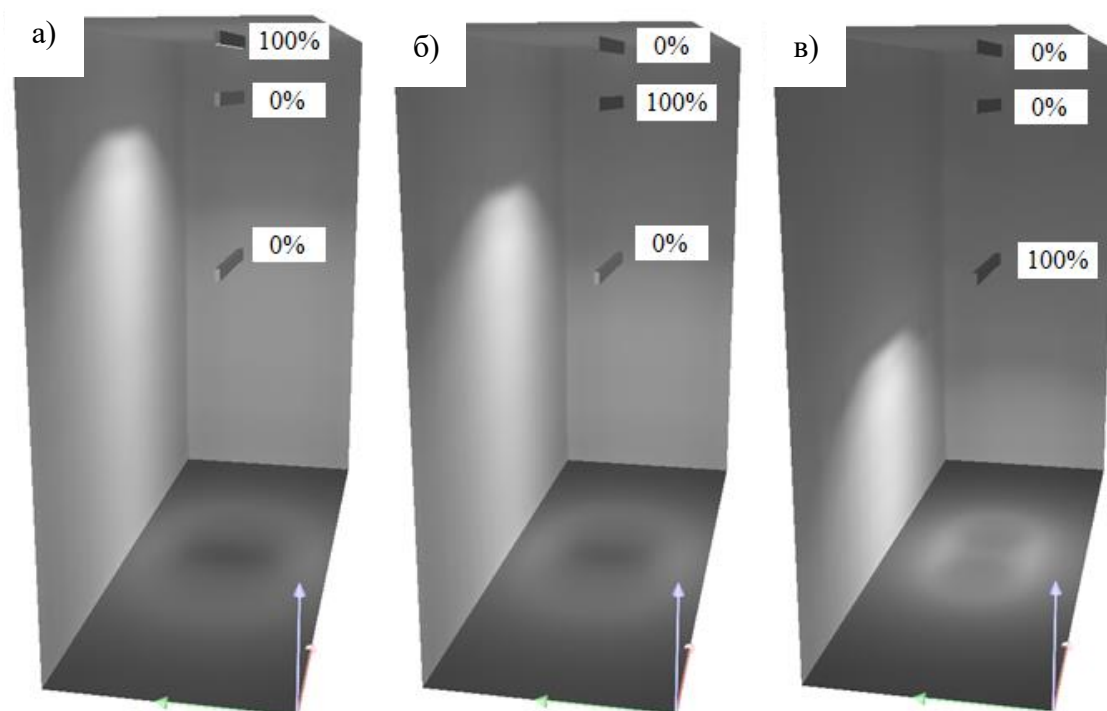


Рисунок 2.29 – Визуализация (световой эффект) математической модели светодиодного модуля на разной высоте подвеса: а) 5м; б) 4,5м; в) 3м.

2.7. Анализ полученных результатов и выводы

Анализ результатов расчета светотехнических характеристик специализированного светильника выявил следующие особенности.

1. Для оценки распределения облученности на поверхности облучаемого высокорослого растения от узконаправленных облучателей вертикальная освещенность не является корректной. Это связано с тем, что КСС облучателя формировалась нами при условии равенства интенсивностей излучений, падающих от облучателя на точку, расположенную на вертикальной плоскости, но на поверхность перпендикулярную направлению распространения луча. В этом случае постоянной будет облученность этой перпендикулярной лучу поверхности. Такая модель расчета КСИ является оправданной, так как плоскость листьев растений по ориентации ближе именно к этой плоскости.

Облученность в вертикальной плоскости отличается от облученности перпендикулярной лучу плоскости на $\cos \alpha$, где α – угол под которым она видна из точки расположения облучателя. Значения косинуса этого угла сильно отли-

чаются вдоль вертикальной плоскости и могут изменяться для расчетного варианта 1 от 0,2 для точки близкой к полу, до 0,7 для точки, близкой к вершине растения (см. рисунок 2.20). В то же время облученность горизонтальной поверхности в точке падения лучей не будет сильно изменять по высоте растения так как косинус угла падения света на горизонтальную поверхность для того же варианта 1 изменяется от 0,98 до 0,7.

Поэтому нормировать лучше горизонтальную освещенность в плоскостях, расположенных на различных расстояниях по вертикали вдоль ствола растения.

Еще более обоснованным будет являться освещенность, рассчитанная с учетом геометрии расположения листьев вдоль ствола. Однако обоснование такого нормирования облученности требует специальных исследований и выбора математически обоснованной модели такого растения.

2. Облучатели в теплице будут располагаться в виде длинных рядов с расстоянием между рядами в 1 метр и достаточно близком расположении светильников друг от друга в ряду. При этом вдоль длины (1 – 1,5 метра) облучателя распределение силы излучения будет близко к Ламбертовскому, а поперек облучателя распределение силы излучения будет в виде КСИ, показанной на рисунках 2.21 и 2.24.

Как показали результаты моделирования, при таких параметрах облучателя и расположении светильника в теплице на горизонтальной поверхности вблизи лотков с низкорослыми растениями распределение облученности по поверхности будет близким к равномерному. Поэтому такой облучатель можно использовать и при выращивании в теплице низкорослых растений (салат, петрушка, цветы)

3. Такой облучатель можно использовать при выращивании не только огурцов или томатов, но и других растений при вертикальном расположении выращиваемых культур. Например, в случае использования стеллажного варианта теплиц, когда растения выращиваются на полках. Стеллажный вариант позволяет увеличить продуктивность теплицы. Разрабатываемый светодиодный

облучатель позволит обеспечить экономичное и равномерное освещение всех растений в течение дня, в том числе в зимнее время года.

4. Из результатов моделирования следует также, что облучатель обладает такой диаграммой направленности излучения, что его можно использовать и для досветки растений внутри ценоза листьев, располагая, например, на половине высоты роста растения.

5. Такая КСИ дает возможность использовать облучатель в любых теплицах для фермерских и других частных хозяйств. В качестве примера на рисунке 2.30. Показано расположение светильника и схема облучения в одной из таких телиц.

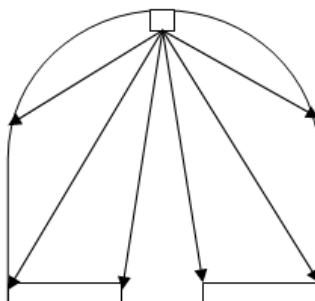


Рисунок 2.30 – Схема облучения растений в теплице для «мичуринцев».

6. Конструкция облучателя. Для изготовления опытных образцов облучателя с рассчитанной КСИ, предлагается следующая конструкция, показанная на рисунке 2.10. Облучатель состоит из двух частей (половинок), изготовленных из алюминия. Светодиоды располагаются на плоскостях, расположенных поуглом 60° после соединения половинок. Требуемая КСИ формируется с помощью отражателей, которые крепятся к корпусу облучателя в месте соединения половинок. Требуемый профиль половинок облучателя легко может быть легко изготовлен штамповкой из листового алюминия. Это существенно уменьшит затраты на его изготовление.

Заключение

Сделан анализ основных фотохимических процессов в растениях. Показано, для правильного развития растений важно, чтобы они получали хорошо сбалансированный по спектру и интенсивности свет. Анализ говорит о том, что управление процессами фотосинтеза и фотоморфогенеза - наиболее эффективный путь воздействия на продуктивность, рост и урожайность растений. Для фоторегулирования нужны источники (облучатели) с управляемыми потоками и спектрами.

Сделано обоснование и выбор светодиодов для создания исходного спектра излучения адаптивного облучателя для теплиц. Исходя из соотношения Протасовой для оптимального соотношения потоков в различных областях спектра: синяя/зеленая/красная = 30%, 20%, 50% и необходимости управления спектральным составом излучения облучателя показано:

- оптимальным вариантом для создания адаптивного облучателя для теплиц является использование трехцветного светодиода с использованием белого и синего светодиодов фирмы Nichia.

- экономичный оптимальный двухцветный облучатель может быть разработан на основе применения специального белого светодиода с увеличенной синей составляющей в спектре излучения.

Показано, что нормировать освещение в теплице лучше используя горизонтальную освещенность в плоскостях, расположенных на различных расстояниях по вертикали вдоль ствола растения. Еще более обоснованным будет нормирование освещенности, рассчитанной с учетом геометрии расположения листьев вдоль ствола.

На основе моделирования распределения освещенности в стандартных теплицах вычислена оптимальная кривая силы излучения для облучения различных видов тепличных светокультур (рисунок 2.24). Кривая соответствует светильнику прожекторного типа с узкой диаграммой направленности.

Разработанный облучатель является универсальным и может использоваться при выращивании как высокорослых, так и низкорослых растений в теплицах различного типа, как в качестве основного источника или для досветки.

Разработана конструкция и технология изготовления опытных образцов облучателя с рассчитанной КСИ. Облучатель состоит из двух частей (половинок), изготовленных из алюминия. Светодиоды располагаются на плоскостях, расположенных под углом 60^0 после соединения половинок. Распределение света производится с помощью отражателя.

Сделан сравнительный экономический расчет облучателей с лампами ДНаТ и светодиодным светильником.