

УДК 628.941.8

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ОВОЩНЫХ КУЛЬТУР

Д.Ю. Каракайтис

Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
Пермский край, Пермский район, с. Лобаново, ул. Культуры, 12
e-mail: info@ecoledbio.ru

Светодиодное освещение все чаще используется в растениеводстве, в том числе для теплиц и закрытых «вертикальных ферм». Для удовлетворения потребностей отрасли растениеводства разработчикам таких систем необходимо понимать требования, которые предъявляются к спектральному распределению энергии в световом потоке, воздействующем на растения, обеспечивающему их оптимальный рост и развитие. Целью исследования являлся анализ эффективности светодиодного освещения при выращивании овощей в закрытом грунте.

Ключевые слова: светодиодные лампы, натриевая лампа, овощные культуры, развитие растений, фенологические наблюдения, биометрический анализ.

Введение. Факторами, лимитирующими развитие растений, являются свет, вода, температура, питание. В условиях защищенного грунта часто лимитирующим фактором является освещение, именно поэтому необходима досветка (то есть искусственное продление светового дня или дополнение спектрального состава в источнике освещения). Энергетические затраты – это одна из самых больших статей расходов в бюджете тепличных комбинатов. Доля себестоимости составляет 20-70% в зависимости от региона в России. Увеличить прибыль и конкурентоспособность овощной продукции можно за счет снижения ее себестоимости, то есть, снизив энергетические затраты. По показателю энергосбережения светодиод – явный лидер среди других источников освещения. Большим преимуществом светодиода является тот факт, что их применение дает возможность регулировать спектр освещения, а, следовательно, интенсивность воздействия на растения. Существенным аргументом является экономия при освещении теплиц светодиодными светильниками, что позволяет сэкономить до 50% электроэнергии при прогнозируемом росте урожая.

Методы. В исследовании преимуществ светодиодных фитосветильников над натриевыми лампами мы изучили современную практику использования тех и других, как в бытовом освещении, так и промышленном, особенно выделив исследовательский опыт ведущих отечественных компаний с оборудованием ECOLED, PromLED, FitoLED, для применения их в сельском хозяйстве. Рассмотрены источники Интернет, статьи в ведущих и ведомственных периодических журналах. Использованы также результаты собственных испытаний в опытной теплице Пермского НИИСХ – филиала ПФИЦ УрО РАН.

Для исследования использовались следующие методы: приведенных затрат, а также, аналитический, сравнительный, экспериментальный методы.

Результаты и обсуждение. Эффективность применения светодиодных светильников по сравнению с обычными лампами, натриевыми, может достигаться не только прямой экономией электроэнергии, но и путем регулирования мощности и спектра излучения в режиме досветки с учетом естественной облученности растений солнечным светом, в наиболее выгодном промежутке времени суток. В результате мы выделяем три зоны суток – пик, полупик и ночь. Досвечивание растений может производиться в ночной и полупиковой зонах, при этом в промежутках времени с 9.00-10.00 и 17.00-18.00 мощность излучения светодиодных светильников регулируется с учетом естественного излучения.

Светодиоды отличаются низким энергопотреблением – они используют не более 10% от потребления традиционными натриевыми светильниками.

У светодиодов есть и другие положительные стороны: высокий КПД (95%), низкая пульсация, безопасность, долгий срок службы – до 100 000 часов. Это также чистота и разнообразие светового спектра, излучаемого светодиодными светильниками, высокий уровень прочности (ударная и вибрационная прочность), экологическая и противопожарная безопасность. Драйвер светильника защищает его от скачков напряжения до 10 Кв и импульсных помех.

Конкуренция на рынке год от года приводит к удешевлению LED (light-emitting diode - светодиод), повышению энергетической эффективности, долговечности и светоотдачи. Современная инженерная практика свидетельствует о том, что очень скоро светодиоды станут лидерами по уровню светоотдачи, превысив показатели ламп накаливания, люминесцентных ламп и других источников.

Основные преимущества светодиодного освещения:

- увеличение светового потока и уменьшение тепловыделения, что способствует росту урожайности;
- снижение энергопотребления на 1 кг производимой продукции;
- долговечность и удобство при эксплуатации;
- возможности для регулировки яркости и управления освещением выращиваемой культуры, обеспечение стабильного уровня освещенности вне зависимости от сезона и погодных условий;
- подбор оптимального спектра излучения для культуры и индивидуальных условий конкретного парника;
- положительное влияние светового спектра на рост и развитие тепличных овощей;
- экономное использование ресурсов земли для достижения максимальной продуктивности растений.

Недостатки. К недостаткам светодиодного освещения можно отнести относительно большие размеры светильников, что продиктовано стремлением добиться высокой интенсивности излучения за счёт большего количества светодиодов, и сравнительно высокую стоимость светильников на первоначальном этапе. Первый недостаток не является критичным для тепличных объектов традиционной конструкции, а второй компенсируется коротким сроком окупаемости (порядка 2,5 лет) и достаточно длинным сроком эксплуатации после этого, уже в условиях полностью возвращённых затрат на приобретение и нарастающей экономии за счёт низкого энергопотребления светодиодными светильниками.

Эффективность. Подсчитано, что срок окупаемости светодиодных светильников начинается от 3-х лет. Уже сейчас отмечены определенные преимущества в выращивании овощей с помощью разных спектров освещения. Например, при использовании светильников с синим спектром с длиной волны – от 440 нм до 460 нм – корневая система растений, их стебель и листья развиваются лучше, становятся более крепкими [4].

Проведенные опыты указывают на возможность применения светодиодных светильников для освещения растений. Современные светодиоды покрывают весь видимый диапазон оптического спектра: от красного до фиолетового цвета. Диапазон длин волн излучения светодиодов в красной области спектра составляет от 620 до 635 нм, в оранжевой – от 610 до 620 нм, в жёлтой – от 585 до 595 нм, в зелёной – от 520 до 535 нм, в голубой – от 465 до 475 нм и в синей – от 450 до 465 нм. Таким образом, составляя комбинации из светодиодов разных цветовых групп, можно получить источник света с практически любым спектральным составом в видимом диапазоне.

Если использовать красный спектр с длиной волны от 650 нм до 670 нм, то отмечают увеличение массы наземной части растения в 1,7-2 раза, а также увеличение количества плодов. Фаза цветения наступает на 7-10 дней раньше [1].

Светодиоды не нагреваются и поэтому не оказывают влияние на температуру воздуха в теплице, а также не «обжигают» растения при ярусной досветке.

LED-светильники не выделяют тепла, не перегревают помещение. За счет того, что свет от светодиодов, расположенных в ценозе культуры направлен непосредственно в активную зону фотосинтеза растений, за счет этого мы можем увеличивать плотность посадки растений, что приводит к увеличению урожайности. Со слов агрономов, под LED-освещением с лучшей стороны показывают себя генеративные гибриды на прививке.

Под натриевые лампы гибриды уже существуют: огромная коллекция высокоурожайных, вкусных и технологичных в уходе растений. Теперь работа направлена на селекцию гибридов, которые раскрывают свой генетический потенциал под светодиодами и под комбинированной досветкой.

Практический опыт. Был проведен следующий эксперимент на томате: при приходе солнечной радиации в 600 Дж использовалась также досветка в теплицах, таким образом, увеличивался приход фотосинтетически активной радиации (ФАР, PAR) днем. Перегрева не наблюдалось, и это никак не сказывалось на растениях. При использовании натриевых ламп, перегрев наступал уже утром, примерно к 11 часам.

Использование натриевых ламп в жаркий период года провоцирует перегревание теплицы, и растения оказываются в опасности. Так пыльца томата теряет способность к оплодотворению, количество завязей снижается.

Дальнейший отбор гибридов проводится в результате производственных испытаний. В теплицах проходят испытания гибриды томатов: [F1 Сантьяго](#), [F1 Берлино](#) и [F1 Фаберже](#).

Среди огурцов специалисты увидели перспективу в гибридах F1 Метренг, F1 Аврора, F1 Сайбер. Сейчас гибриды находятся на сортоиспытании.

У огурца F1 Аврора плоды чуть короче, чем у F1 Метренга и основного гибрида, они не перерастают, что позволяет использовать данный гибрид для фасовки.

Эксперимент коллег из г. Уфа с LED-освещением в теплицах себя оправдал. Компания уже сейчас существенно экономит на энергоресурсах, развивает инновационное предприятие, а также ищет для выращивания гибриды овощей, соответствующие новым технологиям: современные, эффективные, способные дать лучшие результаты под светодиодным освещением [1].

Проводились и другие исследования воздействий излучения видимой части спектрального диапазона на растения. Ученые исследовали влияние интенсивности и спектрального состава света на эффективность фотосинтеза и продуктивность различных растений. У растений за поглощение света отвечают специальные пигменты. Основные из них – хлорофиллы а и b и каротиноиды. Хлорофиллы поглощают свет синего и красного диапазонов, а каротиноиды – синего диапазона. Свет, полученный разными пигментами, расходуется на разные цели: пигменты с пиком чувствительности в красной области спектра отвечают за развитие корневой системы, созревание плодов, цветение растений; пигменты с пиком поглощения в синей области отвечают за увеличение зелёной массы; зелёная часть спектра излучения полезна для фотосинтеза плотных листьев и листьев нижних ярусов, куда

синие и красные лучи почти не проникают. Остальные части спектра растениями практически не используются [5].

В результате исследований было показано, что наиболее благоприятными для выращивания светолюбивых растений являются интенсивности в пределах 150–220 Вт/м², а оптимальный состав излучения имеет следующее соотношение энергий по спектру: 30% – в синей области (380–490 нм), 20% в зелёной (490–590 нм) и 50% – в красной области (600–700 нм). С использованием такого искусственного освещения получены урожаи, в несколько раз более высокие, чем при обычном освещении, причём за более короткие (в 1,5–2 раза) сроки (4).

Интенсивность излучения светодиода зависит от протекающего через кристалл тока. Это позволяет управлять интенсивностью излучения светодиодного светильника, причём относительно легко – путём изменения значения тока. Если использовать в светильнике светодиоды с разными значениями длины волны излучения, то, изменяя ток для разных светодиодов, можно получать различные по составу и интенсивности спектры излучения и таким образом подбирать спектр светильника в зависимости от конкретного этапа развития растения [6].

Необходимо сказать о том, что современные теплицы представляют собой сложные технические комплексы, в большей части роботизированные. Управление ими осуществляется при помощи автоматизированных систем, в которые достаточно органично можно добавить и управление освещением, причём как по интенсивности, так и по спектральному составу излучения, и производить такие управляющие операции по программам, учитывающим фазу развития растений.

В отличие от ламп, светодиоды, в отличие от ламп, не являются хрупкими, поэтому устройства на их основе могут быть вандалоустойчивыми, а возможность низковольтного питания делает их безопасными, то есть не являющимися потенциальными источниками возникновения пожара или взрыва.

Всё перечисленное делает светодиодные светильники крайне привлекательными для использования в тепличном освещении. Для того чтобы оценить их возможности, нужно сравнить параметры светодиодных источников света и ныне применяемых в тепличном хозяйстве ламп.

Эффективность источника света можно оценить по количеству люменов излучаемого светового потока, приходящихся на один ватт потребляемой источником мощности. Однако в данном случае это будет не совсем корректно. Например, глаз человека воспринимает цвета по-разному, пик его чувствительности лежит в зелёной области спектра, таким образом, источник синего или красного света нам будет казаться более тусклым, чем источник зелёного такой же оптической мощности. Клетки растений тоже не все длины волн воспринимают одинаково, разные диапазоны излучения влияют на протекание процессов фотосинтеза по-своему. Поэтому использование светильников одной и той же мощности, но различающихся по спектральному составу, приводит к разным результатам [4].

Излучение в диапазоне волн от 400 до 700 нм оказывает наибольшее влияние на протекание фотосинтеза и называется «фотосинтетически активным». Существует

стандартный параметр, характеризующий «яркость» источника света для растения, – количество фотонов с длиной волны от 400 до 700 нм, излучаемых за одну секунду. Эта величина называется фотосинтетическим фотонным потоком (Photosynthetic Photon Flux – PPF) и измеряется в микромолях фотонов в секунду, а отношение PPF к потребляемой мощности рассматривается как коэффициент эффективности излучения [6].

Помимо показателей эффективности большое значение имеет состав спектра излучения. Например, если большая часть энергии излучения приходится на синюю область спектра, это приводит к формированию низкорослых растений с высоким фотосинтезом, но низкой продуктивностью. Сильная накачка красным, наоборот, приводит к излишнему росту вегетативных органов в ущерб генеративным.

Натриевые лампы имеют высокое соотношение PPF/Вт – не менее 1,8 мкмоль/(с×Вт). Расчётное значение эффективности использования спектра источника составляет 0,92. В спектре натриевой лампы средний уровень интенсивности в синей области более чем в три раза ниже, чем уровень интенсивности в красной области, что говорит о необходимости использования более интенсивной лампы, а значит, о необходимости повышения потребляемой мощности.

Светодиодный аграрный светильник ECOLED-BIO-100W-D120 F-Optima IP65 компании «ГК «СЭТ» разработан с учётом требований к тепличному освещению, и его спектр максимально приближен к оптимальному. Расчётное значение PPF/Вт – 2 мкмоль/(с×Вт). Расчётное значение эффективности использования спектра источника – 0,83.

Главным преимуществом светодиодного освещения для данного проекта можно назвать подбор практически идеального для роста растений спектра излучения. Спектр расположен как в синей, так и в оранжево-красной областях. Красный свет необходим для роста корневой системы, созревания плодов, цветения, а синий – для развития листьев, роста растений. У натриевой лампы основная часть спектра принадлежит оранжево-красной области и явно недостаёт синего света, из-за недостатка синего растения тянутся вверх, становятся более хрупкими и плохо переносят транспортировку.

В отношении светодиодных светильников следует особо упомянуть их экологическую чистоту и отсутствие у них проблем с утилизацией. Данные особенности связаны с тем, что в составе светодиодов нет вредных веществ. Помимо этого, при эксплуатации они не нагреваются так сильно, как лампы, что облегчает поддержание требуемых климатических условий при выращивании растений [3].

Вне зависимости от типа применяемых источников света в тепличных осветительных системах имеет смысл использовать подсистему управления, на которую могут быть возложены несложные функции контроля состояния светильников и обеспечения режимов управления включением/выключением в зависимости от сезона, времени суток, конфигурации задействованных площадей, требуемого спектра излучения и т.п. Такие подсистемы могут быть как автономными, так и входящими в состав централизованной системы автоматизации теплицы. Как показывает анализ подобных решений, здесь преобладают автономные подсистемы, которые используют простые и очень недорогие контроллеры, как-то: RTU188-BS (FASTWEL), ADAM (Advantech), WAGOI/O, LOGO (Siemens). Следует подчеркнуть, что применение подсистемы управления в составе системы освещения оказывается более

эффективным именно в случае использования светодиодных светильников, так как эти светильники в силу своей физической природы предоставляют достаточные возможности по регулированию и установке своих параметров. На базе такой подсистемы управления возможно решение вопросов подбора светильников с требуемыми спектрами и изменения этих спектров с течением времени в соответствии с протекающими биологическими процессами в ходе оптимизации режимов освещения с целью получения определённых свойств растений.

Для повышения урожайности и увеличения объема производства необходимо учитывать используемый спектр света и его интенсивность в сочетании с другими благоприятными условиями для роста и развития растений. Такими, как температура, содержание углекислого газа, влажность, уровень орошения, плотность посадки, генетика растений. Нужно создать синергетическое взаимодействие этих факторов и помнить, что конечный объем полученного урожая всегда зависит от ограничивающих факторов, если их использовать неправильно [2].

Выращиваемая культура должна «привыкнуть» к увеличению уровня освещенности в теплице. Поэтому с каждым днем длительность периода освещения и интенсивность света должны постепенно увеличиваться на начальном этапе стратегии выращивания — стадии рассады. Интенсивность света и фотопериод можно наращивать в течение 2-3 недель после посадки, довести до оптимального значения ПФФП $200-250 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{sec}$ и достичь продолжительности освещения 20 часов в день. Возможности светодиодных светильников позволяют регулировать уровень освещения небольшими шагами.

При воздействии светодиодного освещения широкого спектра растения выглядят более компактно, расстояния между междоузлиями короче, а потенциал урожая значительно выше. При светодиодном освещении длина междоузлий меньше на 30-50%. При этом сокращаются трудозатраты по уходу за более компактными растениями. Длина стебля меньше, а это значит, что затрачивается меньше энергии на передачу воды к верхнему ярусу листьев, где происходит максимальное испарение [5].

Существенным драйвером повышения урожайности при использовании светодиодного освещения является более высокая скорость формирования листьев и цветов. Рост и развитие растений не зависит от интенсивности солнечного излучения, недостаточного зимой. Прирост урожайности также обеспечивается за счет возможности повышения средних температур при высоком уровне освещенности. Светодиодное освещение позволяет работать при более высоких среднесуточных температурах, обеспечивающих высокий темп роста плодов. Овощи формируются на 2 дня быстрее по сравнению с контрольной группой даже в конце апреля, когда общее количество дневного света увеличивается.

Российские ученые выяснили, что растения в разные фазы развития по-разному реагируют на определенные спектры освещения и наиболее требовательны к наличию в спектре красного и синего излучения. В то время как зеленый и желтый спектры слабее влияют на процессы вегетативного роста и плодообразования [7].

Монохромное освещение овощей в теплице вызывает у растений определенный стресс, который способствует рекордно быстрому росту и созреванию плодов, но сами плоды становятся безвкусными. В период вегетативного роста молодых растений рекомендуется

воздействие синей части спектра (длина волны 400-500 нанометров), а в период цветения и образования завязей — красной (600-700 нанометров).

Список литературы:

1. Галиуллин Р.Р. Разработка и исследование энергосберегающей автоматизированной системы освещения теплицы на основе светодиодных технологий / Р.Р. Галиуллин, С.М. Яковлев и др. // Отчет по научно-исследовательской работе. – Уфа: Башкирский ГАУ, 2014. – 97с.
2. Долгих П.П. Критерии оценки эффективности источников излучения для теплиц / П.П. Долгих // Эпоха науки, 2018. – № 15. – С. 96-99.
3. Малахова С.Д., Федорова З.С., Демьяненко Е.В., Тютюнькова М.В. Биология с основами экологии. Учебное пособие. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2019. – 120 с.
4. Малахова С. Д., Демьяненко Е. В., Тютюнькова М. В., Мурадова И. Ю. Влияние светодиодных ламп нового поколения на рост и развитие томата. Известия ФНЦО, ФГБНУ ФНЦО, 2019. – № 1. – С. 105-108.
5. Физиология и биохимия сельскохозяйственных растений / Н. Н. Третьяков, Е. И. Кошкин, Н. М. Макрушин и др.; под ред. Н. Н. Третьякова. — М.: Колос, 1998. – С. 101-147, 162-165.
6. Эшдаун Я., Рентюк В. Светодиодное освещение для растениеводства. Полупроводниковая техника. Издательство ООО «Медиа КиТ», 2015. – Т. 4. – № 36. – С. 24-29.
7. Москва: Минсельхоз РФ, 2003 – 91 3 с. Освещение в теплице: нормы, требования, нюансы и советы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.asutpp.ru/osveschenie-v-teplitse.html>. –Дата доступа: 25.02.2021.

LED LIGHTING USING IN VEGETABLE GROWING

D.Yu. Karakaytis

Perm Agricultural Research Institute – division of Federal Research Center Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
info@ecoledbio.ru

Abstract. LED lighting is increasingly being used in horticulture, including for greenhouses and indoor "vertical farms". To meet the needs of the horticultural industry, designers of such systems need to understand the requirements for the spectral distribution of energy for photosynthesis to ensure optimal plant growth and development.

Keywords: LED lamps, sodium lamp, operating costs, vegetable crops, plant, plant development, phenological observations, biometric analysis.