3. **Haag Andrei**, Ph. D., associate professor, Tomsky Agricultural Institute – branch of Novosibirsk State Agrarian University, Tomsk, Russia, tel.: +7 (3822) 51-57-05, e-mail: gaag85@mail.ru.

4. **Kinsfaktor Olga**, Candidate of Agricultural Sciences, Tomsky Agricultural Institute – branch of Novosibirsk State Agrarian University, Tomsk, Russia, tel.: +7 (3822) 51-57-05, e-mail: koa1975@sibmail.com.

5. **Chudinova Uliya**, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Tomsky Agricultural Institute – branch of Novosibirsk State Agrarian University; Tomsk, Russia, e-mail: zootechnik_tshi@mail.ru.

In a comparative aspect, the indicators of the level of live weight, the exterior of the breeding bull calves of the Galloway breed were studied. In all periods of growth, animals K(F)X «Letyazhye» were ahead of their peers from other enterprises in terms of live weight, their superiority was also noted in exterior parameters. Towards the end of the experiment, the bulls K(F)X «Letyazhye» outperformed their peers from ООО «Spas» by 14 kg ($P \leq 0,05$), or 2,9 %, K(F)X «Sinitsyn» by 18 kg ($P \leq$

0,05), or 3,7 %, and the animals of enterprises K(F)X «Dodger» – by 83 kg ($P \leq 0,05$), or 17,2 %. The depth of the chest of the bulls K(F)X «Letyazhye» was greater than that of the animals of ООО «Spas» – 1,9 cm ($P \leq 0,05$), or 2,93 %, K(F)X «Dodger» – by 5,1 cm ($P \leq 0,05$), or 7,9 %, K(F)X «Sinitsyn» – by 1,0 cm ($P \leq 0,01$), or 1,5 %; chest girth behind the shoulder blades – 4,0 cm ($P \leq 0,01$) or 2,23 %, 25,0 ($P \leq 0,01$) cm, or 13,97 %, 19,0 cm ($P \leq 0,01$), or 10,61 % respectively.

© Фахрутдинова Р.Ш., Афонина И.А., Гаг А.В., Кинсфатор О.А., Чудинова Ю.В.

УДК 621.321

DOI: 10.31563/1684-7628-2019-52-4-100-105

Р.Р. Галиуллин, Р.С. Аипов, Р.Б. Яруллин

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБЛУЧЕНИЯ РАСТЕНИЙ В СООРУЖЕНИЯХ ЗАЩИЩЕННОГО ГРУНТА

Ключевые слова: сооружения защищённого грунта; натриевые лампы высокого давления; светодиодные светильники; облучательная установка; спектральный состав; вегетационный цикл; дифференциальная и интегральная энергоёмкости; биомасса; весовой коэффициент; эффективность.

Введение. В районах с холодным и умеренным климатом естественные условия позволяют выращивать растения и получать растениеводческую продукцию только в ограниченный период времени года, а в остальное время – только в условиях защищённого грунта. Особенностью современного тепличного хозяйства является высокая технологичность. Поэтому важнейшей задачей производства защищённого грунта является повышение продуктивности фотосинтеза выращиваемых растений в условиях искусственного микроклимата при минимальных энергозатратах. Актуальной научной и практической проблемой может стать разработка и внедрение современных эффективных энергосберегающих технологий и электрооборудования на основе достижений науки и техники. В современных тепличных хозяйствах стоимость энергоносителей, таких как газ, электроэнергия, доходит до 60 % [10]. При постоянно возраста-

ющих тарифах на энергоносители в условиях рыночной экономики в сельскохозяйственном производстве применение оптического излучения необоснованно уменьшилось. Однако в технологическом процессе сооружений защищённого грунта оптическому излучению нет альтернативы. В настоящее время для облучения растений чаще всего используют люминесцентные лампы низкого давления, дуговые ртутно-люминесцентные лампы высокого давления, ксеноновые лампы, а также приборы на базе натриевых ламп, т. к. они в технологии светокультуры обладают высокими ресурсными показателями и энергоэффективностью [1, 2, 9, 12]. Появление в промышленных масштабах в последние годы мощных светодиодов сделало их конкурентами для натриевых ламп. Благодаря высокому коэффициенту полезного действия светодиодная технология обеспечивает низкое энергопотребление и малое тепловыделение. Помимо этого, в

силу самой природы получения излучения светодиоды обладают совокупностью характеристик, недостижимых для других технологий, таких как механическая и температурная устойчивость, устойчивость к перепадам напряжения, продолжительный срок службы, отличная контрастность и цветопередача. Тем не менее основным преимуществом светодиодных светильников перед традиционными источниками излучения являются адаптированность их под микропроцессорное управление интенсивностью излучения и возможность изменения спектральных характеристик под любые виды и сорта плодовоовощных растений. Меняя спектр излучения облучательной установки, можно управлять процессом формирования урожая, удлинять или сокращать онтогенез растений, повышать урожайность. Это в итоге обеспечит уменьшение потребления электрической энергии при выращивании тепличных растений [2, 3]. Извест-

ными учёными Алферовой Л.К., Башиловым А.М., Бородиным И.Ф., Бутенко Р.Г. и др. доказана эффективность применения искусственного облучения в процессе формирования и повышения урожайности растений, однако здесь не в полной мере решены вопросы регулирования дозы облучения в зависимости от фазы роста растений.

Цель работы – повышение эффективности облучения растений путём регулирования дозы облучения в зависимости от фазы роста растений.

Материал и методы исследования. Для проверки точности теоретических исследований была подобрана элементная база с использованием микропроцессорной техники и создана облучательная установка, включающая светодиодный светильник. Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 1.

Рисунок 1
Общий вид светодиодного светильника (а) и экспериментальной установки (б)

Светодиодный светильник (рисунок 1, а) содержит 24 красных (630–640 нм), 48 дальних красных (640–660 нм), 36 синих (440–460 нм), 48 белых (2700 К), 6 ультрафиолетовых (380–

400 нм) светодиодов. Всего использовано 162 светодиода с тремя спектральными полосами по две линейки, в каждой из которых 27 светодиодов. Регулировка мощности излучения может

производиться для каждой спектральной полосы отдельно. Характеристики светодиодов в составе светильника даны в таблице 1. Для измерения из-

лучения в видимой области в поддиапазоне 400–790 нм и определения облучённости использовался спектрофотометр ТКА-Спектр [11].

Таблица 1 Характеристики светодиодов в составе светильника

Цвет СД	КПД СД	Количество СД в светильнике	Мощность рассеивания, Вт
Красный (670 нм)	0,55	72	88
Синий (450 нм)	0,45	36	52
Зеленый (550 нм)	–	16	16
УФ (380 нм)	0,2	6	6
Итого			162

В качестве исследуемого растения был выбран выращенный меристемным способом генетически чистый семенной картофель сорта Ред Скарлет (рисунок 1, б).

Преимуществом меристемного способа является то, что культура оказывается более здоровой и практически не боится атак вирусов и благодаря ее высокой урожайности можно получать многочисленные копии растения. Исследования проводились на аэропонной установке, т. е. выращивание растений производилось в воздушной среде без использования почвы, при котором питательные вещества к корням растений доставлялись в виде аэрозоля. Температура в лаборатории поддерживалась на уровне 23–25 °С. Искусственное облучение растений производилось, начиная с двадцать второго дня, с момента всходов и после высадки рассады в аэрапонную установку. Корректировка спектрального состава выполнялась каждые два дня изменением яркости отдельных пар светодиодов с помощью микропроцессорного блока. Изменение спектрального состава производилось в вегетативной фазе в период стационарного логарифмического роста.

Расчёт длины и диаметра стебля растения, а далее биомассы и дифференциальной энергоёмкости производился по данным изображений, полученных с web-камеры.

Результаты исследования. При проведении исследований за параметры, характеризующие рост растений, приняты длина и диаметр стебля, поскольку их несложно идентифицировать по картинкам, полученным с web-камеры, и последующей обработкой с помощью специальных приложений. Весь цикл роста и развития растений разделялся на две части: вегетативный, где осуществляется рост стебля, и генеративный – рост репродуктивных органов, т. е. плодов. Здесь для экспериментов особый интерес представлял второй этап, поскольку рост растений в

нем замедляется и появляется возможность снижения степени облучения для обеспечения энергосбережения. Поэтому с точки зрения энергосбережения на данном этапе целесообразно обеспечивать лишь необходимое и достаточное количество спектральной облучённости, которое обеспечит заданный прирост растения. Для определения начала и окончания вегетативной фазы растения, в течение которого предполагается изменение спектральных и энергетических характеристик облучения, а также оптимизации процесса электропотребления, вводятся два частных показателя – дифференциальная и интегральная энергоёмкости [4, 7, 8]:

$$w_i(t) = \frac{S}{M(t)} \cdot t \rightarrow \min \quad \text{и}$$

$$w_d(t) = \frac{S}{\Delta M(t)} \Delta t \rightarrow \min,$$

где S – мощность, Вт; $M(t)$ – биомасса растения, г.

Выход биомассы растения [6] можно найти по выражению

$$M_{\text{раст}}(t, \varpi) = N_0 \cdot m_m \cdot e^{\lambda \cdot \mu \cdot t} + r \cdot N_0 \cdot m_g \cdot f \cdot e^{\frac{\mu}{C}} \left(\frac{C}{\mu} \right)^{\lambda \cdot \frac{\mu}{C-1}} \cdot e^{\lambda \cdot \mu \cdot t}, \quad (1)$$

где N_0 – количество меристемных клеток растения в начальный момент времени, шт.; m_m – начальная масса меристемных клеток растения, г; m_g – сухая масса вегетативных клеток растений в начальный момент времени, г; λ – коэффициент, показывающий распределение между клетками растения; μ – удельная скорость роста растений, сутки⁻¹; t – время, сутки; f – коэффициент увеличения вегетативных клеток растения; C – показатель старения растения, сутки⁻¹; r – неполная гамма-функция.

Удельная скорость роста растения в выражении (1) может быть определена по известной формуле [6]:

$$\mu = \frac{a \cdot \varphi \cdot M_{\text{л}} \cdot \varpi \cdot k_i \cdot E_0}{1 + \frac{a \cdot \varphi \cdot M_{\text{л}} \cdot \varpi \cdot k_i \cdot E_0 \cdot b(1+\gamma)}{\lambda_{\text{CO}} \cdot Q_{\text{В}}}}, \quad (2)$$

где a – начальный градиент кривой фотосинтеза, $\text{сек}^{-1}/\text{кал} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{мин}^{-1}$; $M_{\text{л}}$ – биомасса листа растения, г; φ – площадь поверхности единицы массы листа растения, $\text{см}^2/\text{г}$; E_0 – общая облучённость, $\text{кал} / (\text{см}^2 \cdot \text{мин}^{-1})$; k_i – коэффициент, учитывающий долю облучённости растения в i -ом спектральном диапазоне; λ_{CO} – концентрация углекислого газа, $\text{г}/\text{см}^3$; $Q_{\text{в}}$ – расход воды через корневую поверхность, $\text{см}^3/\text{с}$; b – коэффициент молекулярной диффузии воды и углекислого газа; γ – коэффициент, определяющий изменение суммарного сопротивления устьиц листьев и воздуха на их поверхности к воде; ω – весовой коэффициент заданного спектрального состава облучения, учитывающий его биологическую значимость (определяется экспериментально).

Используя выражение (1), можно проанализировать изменение биомассы растения при различных спектральных составах облучения. Здесь следует отметить, что биологическая значимость спектрального состава определяется только весовым коэффициентом, варьируемым в диапазонах от 0 до 1. Чем выше величина этого показателя, тем эффективнее процесс облучения. Так, например, оптимальным для растения можно считать спектральный состав излучения при приближении весового коэффициента к единице.

Зависимости биомассы, интегральной и дифференциальной энергоёмкости от времени для случая применения светодиодного светильника представлены на рисунке 2. Как видно из рисунка, динамика роста растений существенно коррелирована с дифференциальной и интегральной энергоёмкостями. Поэтому по характерным изменениям этих показателей можно определить время фазовых переходов растений, которое является одним из важных показателей при регулировании спектрального состава и режимов досвечивания. Так, например, время, при котором дифференциальная энергоёмкость имеет минимальное значение, соответствует началу этапа вегетативной фазы (25-е сутки), в котором рост растения замедляется, и оно становится более восприимчивым к спектральному составу излучения и дозе облучения. Учитывая радиационный режим на стадии роста растений, необходимо выполнить корректировку спектра излучения с учётом специфики поглощения излучения, в частности, повысить мощность зелёной составляющей спектра и ослабить мощность синей.

Интегральная энергоёмкость имеет минимальное значение, которое достигается в точке созревания (55-е сутки) с переходом на генера-

тивную фазу, что свидетельствует о прекращении роста растений, и не требуются затраты энергии на развитие вегетативной части растений, следовательно, можно сократить фотопериод досветки уменьшением мощности искусственного облучения.

Рисунок 2

Зависимости биомассы растения, интегральной и дифференциальной энергоёмкости от времени при использовании светодиодного светильника (индексы 1 и 2 соответствуют весовым коэффициентам 1 и 0,9): 1 – биомасса растения; 2, 3 – интегральная и дифференциальная энергоёмкости

Из рисунка 2 видно, что величина весового коэффициента оказывает существенное влияние на биомассу растения. Так, например, при изменении этого коэффициента с 1,0 до 0,9 резко уменьшаются параметры роста растений (в 1,5 раза), что показывает чувствительность растений к уровням спектральной облучённости и дозам облучения.

Интегральная энергоёмкость в какой-то степени является объективным индикатором созревания растения. Так, например, когда отношение текущих значений дифференциальной и интегральной энергоёмкостей к их минимальным значениям превысит заданное пороговое значение, например, в 50 раз (на рисунке 2 соответствует приблизительно 80 суткам), можно определить полное созревание плодов. Таким образом, определяя минимальное значение показателя интегральной энергоёмкости, можно выдавать сигнал о необходимости сбора урожая или продолжить процесс облучения с регулированием его параметров.

Для подтверждения результатов теоретических расчётов было проведено экспериментальное исследование (рисунок 3), в котором проводились измерения длины и диаметра стебля, сформировавшегося под светодиодным светильником при произвольном спектральном составе в течение двух суток после высадки на аэропонную установку. До конца вегетации растений спектральный состав не изменялся.

Рисунок 3

Зависимости энергоёмкости (1) и биомассы (2) в зависимости от времени суток: сплошные кривые — теоретические; пунктирные — экспериментальные

В целом экспериментальные исследования подтвердили адекватность теоретических расчетов с использованием предложенного выражения по определению биомассы и энергоёмкости процесса облучения. При этом погрешность не

превысила 5 %, что позволяет сделать вывод о достоверности результатов расчетов.

Выводы. Предложенное в работе аналитическое выражение описывает взаимосвязь между параметрами растений (рост стебля, биомасса) и характеристиками светодиодного светильника (электрическая мощность, спектральное распределение мощности излучения), а также позволяет идентифицировать фазу развития растений. Так, например, при снижении весового коэффициента с 1 до 0,9 резко в 1,5 раза уменьшаются параметры роста растений, что свидетельствует о чувствительности растений к значениям спектральной составляющей и дозам облучения. Использование светодиодных светильников вместо традиционных источников излучения способствует снижению интегральной энергоёмкости, что дополнительно подтверждает эффективность их применения. Так, например, замена натриевых на светодиодные светильники снижает значение интегральной энергоёмкости в 4,2 раза (с 5,4 до 1,3 кВт · ч/г).

Библиографический список

1. Большина, Н.П. Оценка эффективности металлгалогенных ламп при выращивании овощных и цветочных культур закрытого грунта [Текст] / Н.П. Большина, Е.М. Фомин, А.В. Невский // Применение оптических излучателей в с. х. Саранск, 1985. С. 65–68.
2. Большин, Р.Г. Повышение эффективности облучения меристемных растений картофеля светодиодными (LED) фитоустановками [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / Р.Г. Большин. М., 2016. 148 с.
3. Валеев, Р.А. Светодиодные облучательные установки для меристемных растений [Текст] / Р.А. Валеев, Н.П. Кондратьева, Р.Г. Кондратьев // Известия Международной академии аграрного образования (МАО). 2013. Выпуск № 16. Том 1. С. 23–25.
4. Галиуллин, Р.Р. Разработка и исследование энергосберегающей автоматизированной системы освещения теплицы на основе светодиодных технологий [Текст] / Р.Р. Галиуллин, С.М. Яковлев, И.И. Каримов и др. // Отчёт по научно-исследовательской работе. Уфа: Башкирский ГАУ, 2014. 97 с.
5. Каримов, И.И. Энергосберегающая светодиодная система облучения растений [Текст] / И.И. Каримов, С.М. Яковлев // Электротехнические и информационные комплексы и системы. Уфа: Уфимский государственный университет экономики и сервиса, 2014. С. 18–25.
6. Каримов, И.И. Повышение эффективности облучения растений с использованием светодиодных светильников в сооружениях закрытого грунта (на примере семенного картофеля) [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / И.И. Каримов. Челябинск, 2016. 139 с.
7. Каримов, И.И. Энергосберегающее управление ростом растений в теплицах [Текст] / И.И. Каримов, Р.Р. Галиуллин // Сельский механизатор. 2016. № 5. С. 15–18.
8. Романов, П.С. Устройство освещения в станции технического обслуживания автомобилей с использованием энергосберегающих технологий [Текст] / П.С. Романов // Вестник Московского государственного областного социально-гуманитарного института. 2010. № 1 (9). С. 112–118.
9. Протасова, Н.Н. Свет как фактор регуляции фотосинтеза и роста растения [Текст] / Рост растений и дифференцировка. М.: Наука, 1981. С. 245–253.
10. Степанчук, Г.В. Оптические электротехнологии переменного облучения растений в культивационных сооружениях [Текст]: монография / Г.В. Степанчук, Е.П. Ключка, Н.Е. Пономарева. Зерноград: АЧГАА, 2013. 208 с.
11. Спектрофотометр «ТКА-Спектр» (ФАР). Руководство по эксплуатации [Текст]. Санкт-Петербург, 2016. 24 с.
12. Тихомиров, А.А. Светокультура растений [Текст]: учебное пособие / А.А. Тихомиров, В.П. Шарупич, Г.М. Лисовский. Новосибирск: Изд-во Сиб. отд. АН, 2000. 213 с.

1. **Галиуллин Рустам Рифович**, доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения и автоматизации технологических процессов, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, 450001, г. Уфа, 50-летия Октября, 34, тел.: +7 (347) 278-59-48, e-mail: rustam6274@mail.ru.

2. **Аипов Рустам Сагитович**, доктор технических наук, профессор кафедры электрических машин и электрооборудования, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, 450001, г. Уфа, 50-летия Октября, 34, тел.: +7 (347) 228-36-55, e-mail: aipovrs@mail.ru.

3. **Яруллин Ринат Бариевич**, доктор технических наук, профессор кафедры электрических машин и электрооборудования, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, 450001, г. Уфа, 50-летия Октября, 34, тел.: +7 (347) 228-36-55, e-mail: jarullin_rb@mail.ru.

Описано преимущество светодиодных светильников перед традиционными источниками облучения растений. Предложено аналитическое выражение, описывающее взаимосвязь между характеристиками светодиодного светильника и параметрами растений – рост стебля

и биомасса, а также позволяющее идентифицировать фазу развития растений, что является важным при создании автоматизированных энергосберегающих облучательных светодиодных установок для тепличных хозяйств.

R. Galiullin, R. Aipov, R. Yarullin

EFFICIENCY OF PLANT IRRADIATION IN PROTECTED GROUND STRUCTURES

Key words: *protected ground structures; LED lamps; HPS lamps; irradiation facility; spectral composition; vegetation cycle; differential and integrated energy capacities; biomass; weight coefficient; efficiency.*

Authors' personal details

1. **Galiullin Rustam**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Power Supply and Process Automation Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», 450001, Ufa, 50-letiya Otyabrya St., 34, e-mail: rustam6274@mail.ru.

2. **Aipov Rustam**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Electric Machines and Equipment Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», 450001, Ufa, 50-letiya Otyabrya St., 34, e-mail: aipovrs@mail.ru.

3. **Yarullin Rinat**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Electric Machines and Equipment Department, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», 450001, Ufa, 50-letiya Otyabrya St., 34, e-mail: jarullin_rb@mail.ru.

The advantage of LED lamps over conventional means of plant irradiation is described. An analytic expression is proposed to determine the relationship between LED lamp characteristics and plant param-

eters such as the stem growth and biomass. The formula also identifies the plant growth phase, which is crucial in development of automated energy-saving LED irradiation facilities for greenhouses.

© Галиуллин Р.Р., Аипов Р.С., Яруллин Р.Б.

УДК 621.321

DOI: 10.31563/1684-7628-2019-52-4-105-111

Р.Р. Галиуллин, Р.Б. Яруллин, И.Р. Кафиев

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОБЛУЧЕНИЯ РАСТЕНИЙ В СООРУЖЕНИЯХ ЗАЩИЩЁННОГО ГРУНТА

Ключевые слова: *оптимизация; процесс облучения; светодиодная облучательная установка; микропроцессорные технологии; энергоёмкость; солнечная радиация; алгоритм управления; стоимость электроэнергии.*

Введение. Оптимизация режимов облучения растений представляет собой весьма важ-

ную задачу, особенно в сооружениях защищённого грунта. Решение задачи требует детальной