

Применение комбинированного облучения в светокультуре

Сергей Анатольевич Ракутько¹,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник,
e-mail: sergej1964@yandex.ru;

Елена Николаевна Ракутько¹,
научный сотрудник;
Марат Равильевич Аюпов²,
генеральный директор

¹Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация;

²НПО «Псковагроинновации», г. Псков, Российская Федерация

Реферат. Эффективное выращивание растений в светокультуре возможно только под оптическим излучением определенного спектрального состава. Наиболее дешевый способ генерирования оптического излучения – с помощью натриевых ламп высокого давления. Однако их спектральный состав не в полной мере приемлем для светокультуры. Светодиоды позволяют задавать практически любой спектр, но их стоимость достаточно высока. (*Цель исследования*) Теоретически и практически обосновать спектральный состав светодиодного излучателя-корректора, используемого в светокультуре дополнительно к натриевым лампам. (*Материалы и методы*) Экспериментально изучили эффективность комбинированного облучения в лаборатории энергоэкологии светокультуры Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства при облучении рассады томата сорта Благовест. Исследовали биометрические показатели растений. Производственный эксперимент проводили в тепличном комбинате Межвиди (Латвия) на взрослых растениях томата сорта *Encore* для трех вариантов: первый – под натриевыми лампами; второй – со светодиодными облучателями; третий – при комбинации натриевых ламп и корректора. Влияние облучателя на растения оценивали по величине флукутирующей асимметрии билатеральных признаков листовой пластинки. (*Результаты и обсуждение*) Определили, что применение корректора улучшило биометрические параметры рассады: увеличило число листьев, их сырую массу, содержание в них хлорофилла и сухого вещества. Отметим, что в теплице наименее благоприятная световая среда формируется под натриевыми лампами, а светодиодные облучатели создают более комфортные условия. Подтвердили, что применение корректора обеспечивает наилучшую световую среду. Выявили повышение урожайности плодов томата и их вкусовых качеств при использовании комбинированного облучения. (*Выводы*) Доказали, что для коррекции спектра лампы ДНат 400 необходим фотонный поток корректора 71,2 микромоля в секунду, при этом отношение потоков синих и дальнекрасных светодиодов должно составлять 64 и 36 процентов соответственно.

Ключевые слова: тепличное производство овощей, светокультура, освещение в теплицах, светодиодные облучатели, комбинированное облучение томатов, натриевая лампа, светодиод.

■ **Для цитирования:** Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Аюпов М.Р. Применение комбинированного облучения в светокультуре // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14. №2. С. 46-52. DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-2-46-52

Use of Combined Irradiation in Grow Light

Sergei A. Rakutko¹,
Dr. Sc.(Eng.), chief researcher,
e-mail: sergej1964@yandex.ru;

Elena N. Rakutko¹,
researcher
Marat R. Ayupov²,
general director

¹Institute of Agroengineering and Environmental Problems of Agricultural Production – a branch of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM, St. Petersburg, Russian Federation;

²Scientific-production association «Pskovagroinnovatsii», Pskov, Russian Federation

Abstract. Effective cultivation of plants with grow light is possible only under optical radiation of a certain spectral composition. The cheapest way to generate optical radiation is with the help of high pressure sodium lamps. However, their spectral composition

is not fully acceptable for grow light. LEDs allow you to set almost any spectrum, but their cost is quite high. (*Research purpose*) To prove the spectral composition of the LED emitter-corrector used in grow light in addition to sodium lamps theoretically and practically. (*Materials and methods*) The authors experimentally studied the effectiveness of combined irradiation in the Laboratory of Energy Ecology of Grow Light at the Institute of Agroengineering and Environmental Problems of Agricultural Production under the irradiation of Blagovest tomato seedlings. They investigated the biometric indicators of plants. The production experiment was carried out in the greenhouse plant Mezhvīdi (Latvia) on adult Encore tomato plants for three options: the first – under sodium lamps; the second – with LED irradiators; the third – with a combination of sodium lamps and corrector. The effect of the irradiator on the plants was evaluated by the magnitude of the fluctuating asymmetry of bilateral signs of the leaf blade. (*Results and discussion*) The authors found out that the use of the corrector improved the seedlings biometric parameters: increased the number of leaves, their wet weight, the content of chlorophyll and dry substance in them. It was noted that in the greenhouse the least favorable light environment was formed under sodium lamps, and LED irradiators created more comfortable conditions. They confirmed that the use of a corrector provided the best light environment. They revealed an increase in the yield of tomato fruits and their taste when using combined irradiation. (*Conclusions*) The authors proved that to correct the spectrum of HPS lamp 400, a corrector photon flux of 71.2 micromoles per second is required, while the ratio of blue and far-red LEDs fluxes should be 64 and 36 percent respectively.

Keywords: greenhouse production of vegetables, grow light, lighting in greenhouses, LED irradiators, combined irradiation of tomatoes, sodium lamp, LED.

For citation: Rakutko S.A., Rakutko E.N., Ayupov M.R. Primenenie kombinirovannogo oblucheniya v svetokul'ture. [Use of combined irradiation in grow light]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2020. Vol. 14. N2. 46-52 (In Russian). DOI 10.22314/2073-7599-2020-14-2-46-52.

Большинство технологических процессов в сельском хозяйстве остаются энерго- и ресурсозатратными, что особенно справедливо для тепличного производства. Это связано с целым комплексом энергопотерь на всех этапах генерации, подвода и потребления энергии в культивационном сооружении. Сегодня энергоэффективное тепличное производство требует внедрения современных инновационных энергоэффективных и экологических технологий [1].

При выращивании растений в искусственных условиях (теплицах, сити-фермах и т.д.) естественная облученность отсутствует или недостаточна для полного раскрытия продукционного потенциала культур. Повышения эффективности тепличного производства можно добиться с помощью технологии выращивания растений с применением искусственных источников света (светокультуры). Фотосенсорный механизм растений обеспечивает восприятие энергии излучения в широком диапазоне длин волн. Однако основное воздействие оказывает поток излучения в области фотосинтетически активной радиации (ФАР). Действие излучения определяется его спектральным составом, который обычно задают долями энергии в спектральных диапазонах ФАР: синем k_B (400-500 нм), зеленом k_G (500-600 нм) и красном k_R (600-700 нм). Отдельно нормируют содержание дальнекрасного излучения k_{FR} (700-780 нм).

Влияние излучения в различных спектральных диапазонах на рост и развитие растений изучено достаточно хорошо. Известно, что синий свет подавляет удлинение гипокотыля и способствует производству биомассы. Добавка синего излучения к потоку

натриевых ламп увеличивает общую биомассу, однако снижает выход плодов у огурцов и томатов [2]. Соотношение количества синего и красного излучения влияет на длину стебля семян томата [3]. Красное излучение удлиняет гипокотыль и увеличивает площади листьев [4]. Исследования роста, фотосинтеза и продуктивности растений показали, что для выращивания светолюбивых растений наиболее благоприятно спектральное соотношение $k_B : k_G : k_R = 30\% : 20\% : 50\%$ [5]. Для анализа применимости спектра используют также соотношения $k_R : k_B$ и $k_R : k_{FR}$. Низкое соотношение $k_R : k_{FR}$ вызывает ряд реакций в растениях, известных как синдром избегания затенения, которые включают удлинение междоузлий, черешков и листьев, усиление апикального доминирования, сокращение разветвления и ускорение цветения. Напротив, высокое соотношение $k_R : k_{FR}$ способствует формированию компактной кроны растений.

Необходимость решения сложных вопросов комплексного повышения энергоэффективности и обеспечения экологичности в светокультуре требует особого внимания к совершенствованию технических средств облучения – облучательных установок.

Традиционно световой режим растений обеспечивают посредством газоразрядных натриевых ламп – одного из самых энергоэффективных источников света. Спектр излучения натриевой лампы в видимой области (совпадающей с областью ФАР) состоит из самообращенных и сильно уширенных D -линий натрия (589,0 и 589,6 нм). При этом в желто-оранжевой области спектра (560-610 нм) сосредоточено 70% видимого излучения. В натриевой лампе мощностью 1000 Вт около 27% потребляемой электроэнергии преобразу-

ется в ФАР, 14% из них приходится на длины волн 400-565 нм, а остальные – до 700 нм [6].

Отдача ФАР современных натриевых ламп составляет до 1,7 мкмоль/Дж при значительном сроке службы. Однако спектр этих ламп не в полной мере удовлетворяет требованиям растений [7]. Причем изменением конструктива установки или внешним управлением существенно изменить спектр излучения натриевых ламп невозможно, что объясняется физикой происходящих в них процессов.

В отличие от широкополосных газоразрядных источников, светодиодные облучатели обеспечивают практически любой спектр суммарного излучения при подборе типов входящих в него светодиодов (СД) и регулировке режима их питания [8]. Узкополосное СД-излучение позволяет гибко управлять ростом и развитием растения. Сегодня СД широко применяют не только в экспериментальных установках (фитотронах) для оценки и оптимизации конкретных систем искусственного облучения, но и в промышленных теплицах. Современные СД имеют отдачу около 2,7 мкмоль/Дж и более с тенденцией уменьшения их стоимости. Общим недостатком таких облучательных установок остаются большие стоимость, материалоемкость радиатора, вес облучателя. Поэтому интегральная экономическая эффективность внедрения светодиодов в теплицах невысока [9]. По некоторым оценкам, в ближайшем будущем СД-облучатели не смогут заменить натриевые лампы в промышленной тепличной светокультуре [10].

Рациональный подход заключается в использовании комбинированных облучательных установок, в которых основной поток излучения генерируется относительно дешевыми натриевыми лампами, а недостаток спектра получаемого излучения корректируется с помощью СД [11]. Однако известные комбинированные облучатели, содержащие в одном корпусе натриевую лампу и СД, имеют существенный недостаток: необходимость замены всех облучателей при реконструкции системы облучения, а также сложность обеспечения теплового режима СД при наличии близко расположенных натриевых ламп.

В результате патентного поиска мы выявили наиболее близкое современное техническое решение от ведущего мирового производителя тепличных источников излучения фирмы *Philips*: система включает источник дополнительного к естественному излучения (натриевую лампу) и отдельные СД-источники синего и дальне-красного излучения (*Крейн М., 2019, заявка 2017137737*). Однако анализ показал, что такое решение имеет и ряд недостатков, проистекающих прежде всего из-за раздельного выполнения источников, дополняющих поток натриевой лампы, что требует раздельных систем управления, удорожает систему и снижает эффективность светокультуры в целом.

Техническая задача созданной в результате исследования комбинированной системы облучения – повышение эффективности светокультуры и качества получаемой продукции в ходе обеспечения требуемого спектрального состава. Технические результаты – оптимизация спектра излучения и конструктивного исполнения дополнительных источников света, повышение равномерности светового поля в теплице, снижение материалоемкости системы облучения, повышение удобства ее эксплуатации.

Цель исследования – обоснование спектрального состава излучения светодиодного корректора, используемого дополнительно к натриевым лампам в светокультуре, и практическая проверка такого решения в лабораторных условиях и промышленной теплице.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. *Устройство и параметры корректора спектра.* В эксперименте использовали разработанный НПО «Псковагроинновации» корректор спектра (рис. 1). Источником излучения служит светодиодная матрица, выполненная по технологии *COB (chip on board)*.



Рис. 1. Внешний вид и составные части корректора: 1 – драйвер; 2 – радиатор; 3 – светодиодная матрица; 4 – линза
Fig. 1. Exterior and components of the corrector: 1 – driver, 2 – radiator, 3 – LED matrix, 4 – lens

Корректор получает электрическое питание через драйвер типа *HVG-100-24*, который на проставках крепится к радиатору сверху. Светодиодная матрица состоит из излучающих в необходимых спектральных диапазонах кристаллов, взятых в определенной пропорции. Через теплопроводящую пасту она крепится к радиатору снизу. Матрица герметично закрыта линзой с углом рассеивания 90°.

С учетом спектрального состава и интенсивности излучения натриевой лампы мощностью 400 Вт рассчитали необходимый спектральный состав матрицы, который гарантирует исправление несоответствия спектра натриевой лампы под требования светокультуры.

Как уже упоминалось, поток натриевых ламп характеризуется малой долей энергии в синей области

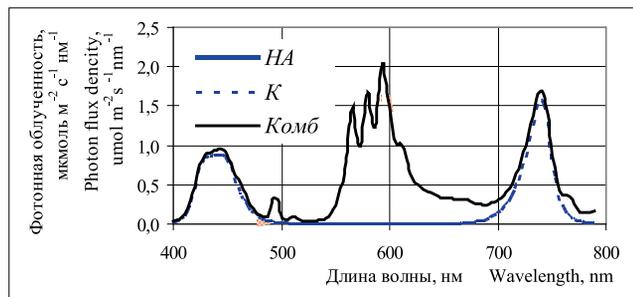


Рис. 2. Спектры излучения натриевой лампы (НА), корректора (К) и комбинированного потока (Комб)

Fig. 2. Emission spectrum of sodium lamp (НА), corrector (К) and combined flux (Комб)

спектра, очень большой – в зеленой и недостаточной – красной и дальнекрасной (кривая НА на рис. 2). Соотношение $k_R : k_B$, которое при оптимальном спектре должно приближаться к 1,7 отн. ед., составляет для ламп различной мощности в среднем 6,2 отн. ед. Соотношение $k_R : k_{FR}$, которое должно быть примерно 2,0 отн. ед., равно в среднем 3,8 отн. ед., то есть имеет место критичный недостаток потока в синем и дальнекрасном диапазонах. Следовательно, в составе матрицы корректора необходимо наличие кристаллов, излучающих в этих диапазонах.

Результаты моделирования выявили, что для лампы ДНат 400 необходим фотонный поток матрицы корректора $71,2 \text{ мкмоль} \cdot \text{с}^{-1}$, при этом пропорция потоков синих и дальнекрасных кристаллов должна составлять $k_B : k_{FR} = 64\% : 36\%$. На рисунке 2 показан спектральный состав излучения изготовленной матрицы корректора (кривая К) и получаемого комбинированного потока (Комб) при соотношении в облучательной установке количества натриевых ламп и корректоров 1 : 1.

Лабораторные исследования. Сравнительный эксперимент проводили в условиях световой комнаты, где выращивали рассаду томата сорта Благовест F_1 . Предварительно подготовленные семена растений в количестве 40 шт. замочили в растворе эпина, посеяли в торфогрунт в контейнерах и выдержали в течение 3 дней в темноте. После появления всходов, на четвертый день, каждый контейнер выставили под свой облучатель. Подкормку рассады проводили растворами удобрений K_2SO_4 ; $MgSO_4$; KH_2PO_4 и $Ca(NO_3)_2$. Концентрацию питательного раствора удобрений поддерживали в пределах ЕС 1,8-2,5 мСм/см. Фенологические учеты и наблюдения за ростом и развитием растений проводили через каждые 3-4 дня. Влажность субстрата в горшочках – 75-80% НВ поддерживали дозированным поливом. Температуру воздуха в помещении на уровне 23-25°C обеспечивали с помощью принудительной системы вентилирования воздуха. Выращивание растений закончили на 36 день.

Контрольная и экспериментальная установки находились в двух зонах комнаты и были разделены све-

тонепроницаемой шторой. Контрольная облучательная установка состояла из двух облучателей с натриевыми лампами, соединенных между собой боковыми поверхностями так, что лампы располагались в противоположных направлениях. У экспериментальной установки дополнительно в перпендикулярной оси имелась штанга с двумя корректорами.

У рассады измеряли стандартные биометрические показатели. Содержание сухого вещества в листьях определяли высушиванием до постоянной массы при температуре 105°C. Эксперименты проводили в трехкратной повторности, с вычислением среднего значения биометрических параметров по пяти растениям в каждой повторности.

Стоимость единицы фотонного потока C_M , руб./моль, генерируемого источником света за срок его службы, определяли по формуле:

$$C_M = \frac{\mathcal{E} \cdot T \cdot P \cdot 10^{-3} + \mathcal{C}}{3600 \cdot \Phi \cdot T}, \quad (1)$$

где \mathcal{E} – стоимость электроэнергии, принято $\mathcal{E} = 4 \text{ руб./кВт} \cdot \text{ч}$;

T – срок службы источника, ч;

P – электрическая мощность источника света, Вт;

\mathcal{C} – стоимость источника света, руб.;

Φ – фотонный поток источника света, мкмоль/с.

Исследования в условиях теплицы. Оценку влияния облучения на взрослые растения томата проводили в теплице Межвиди (Латвия) на взрослых растениях томата сорта *Encore* для трех вариантов:

1 – под натриевыми лампами *Master Green Power CG 230V 400W (PPF 725 μmol/c)*;

2 – под СД-облучателями *Philips GreenPower DR/B LB 400V 190W (PPF 440 μmol/c)*;

3 – под комбинированным излучением.

Во всех вариантах применяли интерлайтинг: два ряда облучателей *GreenPower DR/B LB 230V 115W*.

Влияние типа облучателя на растения оценивали по стабильности развития, характеризуемой величи-



Рис. 3. Расположение корректора в ряду натриевых ламп в комбинированной облучательной установке в теплице

Fig. 3. The location of the corrector in a row of sodium lamps in the combined irradiation unit in the greenhouse

ной флуктуирующей асимметрии билатеральных признаков (ФА) листовой пластинки. В наших предварительных экспериментах выявлено влияние параметров световой среды на величину ФА [12].

Статистическому анализу были подвергнуты два билатеральных признака: первый – длина первых от верхушечной доли листочков сложного листа томата слева и справа (L_L и L_R); второй – содержание в них хлорофилла (C_L и C_R).

Длину листочков определяли с помощью прозрачной мерной линейки (цена деления 1 мм), накладывая ее вдоль рахиса. Результаты фиксировали с точностью до 0,5 мм.

Неразрушающее определение относительного содержания хлорофилла *CCI* (*Chlorophyll Content Index*) проводили оптическим методом, учитывающим значительное поглощение света листом в синем и красном диапазонах и отсутствие поглощения в зеленом и инфракрасном, с помощью прибора *ССМ-200* (*Opti-Science*, США).

Значение показателя ФА для билатерального признака B слева и справа вычисляли по формуле:

$$\Phi A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|B_L^i - B_R^i|}{2 \cdot (B_L^i + B_R^i)}, \quad (2)$$

где i – номер растения;

N – количество измерений.

Полученные данные обрабатывали с помощью пакетов программ *Statistica 6.0* и *Excel 2003*. Статистические различия анализировали с использованием методов дисперсионного анализа. Значимость различий оценивали на уровне $p \leq 0,05$ с помощью критерия Фишера. Статистическая обработка результатов оценки уровня ФА включала проверку данных: нормальное распределение разницы между двусторонними признаками; наличие направленной асимметрии и антисимметрии; зависимость величины асимметрии признака от его размера; сравнение уровня ФА у растений, выращенных при разном качестве облучения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Рассада томата, выращенная под различными источниками света, после окончания лабораторного эксперимента различалась по внешнему виду (рис. 4).

Применение комбинированного облучения улучшает биометрические параметры рассады томата (таблица). Количество листьев увеличилось на 7,1%. Растения выросли более крепкими и коренастыми: высота меньше на 20%. Значительно повысилось содержание хлорофилла в листьях, их сырая масса увеличилась на 2,8%, а содержание сухого вещества – на 10,5%.

Стоимость единицы генерируемого источниками потока для светодиодных источников составила 2,2 руб./моль, для натриевых ламп – 1,8 руб./моль, то есть на 22% меньше. Это означает, что экономически эффективно генерировать основной поток излучения



Рис. 4. Рассада томата под натриевыми лампами (слева) и комбинированным излучением (справа)

Fig. 4. Tomato seedlings under sodium lamps (left) and combined radiation (right)

Таблица		Table	
СРАВНЕНИЕ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАССАДЫ COMPARISON OF BIOMETRIC INDICATORS OF SEEDLINGS			
Показатели Indicators	Эксперимент Experiment	Контроль Control	Δ , %
Количество листьев, шт. The number of leaves, pcs	9,6 ± 0,19	9,0 ± 0,13	7,1
Высота растения, мм Plant height, mm	207 ± 7,6	259 ± 11,2	-19,9
CCI, отн. ед. CCI relative unit	12,9 ± 0,43	7,5 ± 0,48	70,7
Сырая масса листьев, г Leaves wet weight, g	5,09 ± 0,25	4,95 ± 0,29	2,8
Содержание сухого в-ва, % Dry substance content, %	11,2 ± 0,2	10,1 ± 0,35	10,5

с помощью натриевых ламп. Для исправления спектра их излучения рационально применять относительно маломощный корректор, который генерирует поток только в дефицитных диапазонах.

Статистический анализ закона распределения значений асимметрии двусторонних признаков листьев взрослых растений томата, выполненный с использованием согласованных критериев Колмогорова – Смирнова, Шапиро – Уилка и Лиллиефорса, показал, что характер распределения полученных образцов отличается от нормального, поэтому были использованы непараметрические методы статистического анализа. Проверку направленности асимметрии проводили с использованием теста Уилкоксона. Анализ выявил колебания асимметрии признака вокруг нулевого среднего, что является диагностическим признаком ФА. Антисимметрия в анализируемых признаках не выявлена. Для сопоставимости полученных результатов асимметрию нормировали на размер признаков. Отсутствие антисимметрии определили по эксцессу распределения различий между сторонами ($L-R$). Принята гипотеза о флуктуирующем харак-

тере асимметрии.

На интенсивность фотосинтеза влияют два типа факторов: внешние, включая условия освещения, и внутренние, в число которых входит содержание хлорофилла. Количество хлорофилла в листьях варьируется в зависимости от генетики растений, содержания минеральных элементов, факторов окружающей среды и т.д. Эта величина – прямой показатель здоровья и состояния растений. Ее определение неразрушающими методами анализа дает исследователям и агрономам ценную диагностическую информацию, которая может использоваться для многих целей, таких как оценка питательных веществ, управление орошением, борьба с вредителями, оценка экологического стресса, селекция растений. Определение содержания хлорофилла неразрушающими методами хорошо разработано для основных полевых культур и листовых овощей. Наши предыдущие исследования показали, что асимметрия содержания хлорофилла в симметричных частях листа растения томата может служить оценкой стабильности его развития [12].

При анализе влияния типа источника света на стабильность развития растений томата прослеживается определенная тенденция (рис. 5).

Можно констатировать, что наименее благопри-

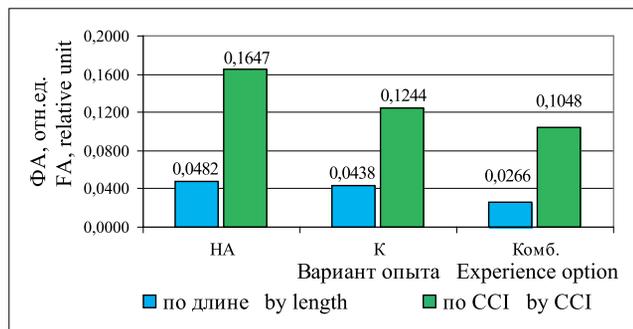


Рис. 5. Значения уровня флуктуирующей асимметрии, рассчитанные по длине листовок и содержанию хлорофилла для разных типов источников света

Fig. 5. The values of the fluctuating asymmetry level, calculated by the leaves length and chlorophyll content for different types of light sources

ятная световая среда формируется под натриевыми лампами. Величина FA, рассчитанная по длине листочков, составляет FA_L = 0,0482 отн. ед., по содержанию хлорофилла FA_C = 0,1647 отн. ед. Примем эти значения за 100% при оценке.

Применение СД-облучателей улучшает стабильность развития растений на 9%, если оценивать по признаку длины листа (FA_L = 0,0438 отн. ед.), и на 25%, если оценивать по признаку содержания хлорофилла (FA_C = 0,1244 отн. ед.). Комбинированное облучение по сравнению с натриевыми лампами улучшает стабильность развития растений на 45%, если оценивать по признаку длины листа (FA_L = 0,0266 отн. ед.), и на 36%, если оценивать по признаку содержания хлорофилла (FA_C = 0,1048 отн. ед.).

При использовании комбинированного облучателя также отмечена большая урожайность плодов томата и лучшие вкусовые качества.

Конечная цель исследований в этом направлении – создание наилучших доступных технологий светокультуры по критерию энергоэкологичности как системному интегративному критерию оптимальности.

Реализация предложенного подхода и продвижение технологии комбинированного облучения позволят достичь максимального эффекта при модернизации и техническом перевооружении теплиц.

Выводы. Выявили положительное биологическое действие комбинированного облучения на растения. Впервые разработана и внедрена технология корректировки спектра традиционной системы досвечивания в тепличных комплексах на базе натриевых ламп путем добавления дефицитных спектральных диапазонов отдельными устройствами – корректорами. Расчеты показали, что стоимость генерирования фотонного потока натриевыми лампами на 22% меньше, чем с помощью светодиодов. Для исправления спектра излучения натриевых ламп разработали корректор, который генерирует поток только в дефицитных диапазонах – синем и дальнекрасном, с соотношением генерируемых потоков 64 и 36% соответственно.

Его общий поток выбирается в зависимости от мощности применяемых ламп и для ДНаТ 400 составляет 71,2 мкмоль/с.

По представленной в работе методике коррекция производится только синими и дальнекрасными светодиодами. При этом обеспечиваются оптимальные соотношения между фотосинтетически активными диапазонами – синим, красным и дальнекрасным. Рассмотренные спектральные соотношения предполагают отсутствие естественной составляющей облучения. При совместном действии солнечного излучения необходимо учитывать его вклад, что ставит задачу адаптивного управления спектром корректора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дорохов А.С., Гришин А.П., Гришин А.А. Принципы синергетики и эксергетического моделирования для управления производственными процессами в закрытых искусственных агроэкосистемах (ЗИАЭС) // *Агротехника и энергообеспечение*. 2019. №3(24). С. 128-139.
2. Menard C., Dorais M., Hovi T., Gosselin A. Developmental and physiological responses of tomato and cucumber to additional blue light. *Acta Hort*. 2006. Vol. 711. 291-296.
3. Nanya K., Ishigami Y., Hikosaka S., Goto E. Effects of blue and red light on stem elongation and flowering of tomato seedlings.

Acta Hort. 2012. Vol. 956. 261-266.

4. Johkan M., Shoji K., Goto F., Hahida S., Yoshihara T. Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*. *Environmental and Experimental Botany*. 2012. Vol. 75. 128-133.

5. Прикупец Л.Б., Тихомиров А.А. Оптимизация спектра излучения при выращивании овощей в условиях интенсивной светокультуры // *Светотехника*. 1992. N3. С. 5-7.

6. Nelson J., Bugbee B. Supplemental greenhouse lighting: Return on investment for LED and HPS fixtures. *Controlled Environments*. 2013. Paper 2. 216-221.

7. Wheeler R.M. A historical background of plant lighting: an introduction to the workshop. *HortScience*. 2008. Vol. 43(7). 1942-1943.

8. Folta K.M., Koss L.L., McMorro R., Kim H.H., Kenitz J.D., Wheeler R., Sager J.C. Design and fabrication of adjustable red-green-blue LED light arrays for plant research. *BMC Plant*

Biology. 2005. Vol. 5. 17.

9. Прикупец Л.Б., Емелин А.А., Тараканов И.Г. Светодиодные облучатели: из фитотрона в теплицу? // *Теплицы России*. 2015. N2. С. 52-56.

10. Пчелин В.М., Макарова И.Е. Об экономической целесообразности массового внедрения светодиодов в тепличном освещении в настоящее время // *Теплицы России*. 2017. N4. С. 62-66.

11. Moerkensa R., Vanlommel W., Vanderbruggen R. Van Delm T. The added value of LED assimilation light in combination with high pressure sodium lamps in protected tomato crops in Belgium. *Acta Hortica*. 2016. 1134.

12. Rakutko S., Alsina I., Avotins A., Berzina K. Manifestation of effect of fluctuating asymmetry of bilateral traits of tomato growing in industrial greenhouses. *Engineering for rural development proceedings*. 2018. 186-191.

REFERENCES

1. Dorokhov A.S., Grishin A.P., Grishin A.A. Printsipy sinergetiki i eksergeticheskogo modelirovaniya dlya upravleniya produktivnyimi protsessami v zakrytykh iskustvennykh agroekosistemakh (ZIAES) [The principles of synergetics and exergetic modeling for managing production processes in closed artificial agroecosystems]. *Agrotehnika i energoobespechenie*. 2019. N3(24). 128-139 (In Russian).

2. Menard C., Dorais M., Hovi T., Gosselin A. Developmental and physiological responses of tomato and cucumber to additional blue light. *Acta Hort*. 2006. Vol. 711. 291-296.

3. Nanya K., Ishigami Y., Hikosaka S., Goto E. Effects of blue and red light on stem elongation and flowering of tomato seedlings. *Acta Hort*. 2012. Vol. 956. 261-266 (In English).

4. Johkan M., Shoji K., Goto F., Hahida S., Yoshihara T. Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*. *Environmental and Experimental Botany*. 2012. Vol. 75. 128-133 (In English).

5. Prikupets L.B., Tikhomirov A.A. Optimizatsiya spektra izlucheniya pri vyrashchivani ovoshchej v usloviyakh intensivnoy svetokul'tury. [Optimization of the emission spectrum when growing vegetables in conditions of intense grow light]. *Svetotekhnika*. 1992. N3. 5-7 (In Russian).

6. Nelson J., Bugbee B. Supplemental greenhouse lighting: Return on investment for LED and HPS fixtures. *Controlled Environments*. 2013. Paper 2. 216-221 (In English).

7. Wheeler R.M. A historical background of plant lighting: an introduction to the workshop. *HortScience*. 2008. Vol. 43(7). 1942-1943 (In English).

8. Folta K.M., Koss L.L., McMorro R., Kim H.H., Kenitz J.D., Wheeler R., Sager J.C. Design and fabrication of adjustable red-green-blue LED light arrays for plant research. *BMC Plant Biology*. 2005. Vol. 5. 17 (In English).

9. Prikupets L.B., Emelin A.A., Tarakanov I.G. Svetodiodye obluchateli: iz fitotrona v teplitsu? [LED irradiators: from a phytotron to a greenhouse. Greenhouses of Russia]. *Teplitsy Rossii*. 2015. N2. 52-56 (In Russian).

10. Pchelin V.M., Makarova I.E. Ob ekonomicheskoy tselesoobraznosti massovogo vnedreniya svetodiodov v teplichnom osveshchenii v nastoyashchee vremya. [About the economic feasibility of the massive introduction of LEDs in greenhouse lighting today. Greenhouses of Russia]. *Teplitsy Rossii*. 2017. N4. 62-66 (In Russian).

11. Moerkensa R., Vanlommel W., Vanderbruggen R. Van Delm T. 2016. The added value of LED assimilation light in combination with high pressure sodium lamps in protected tomato crops in Belgium. *Acta Hortica*. 2016. 1134 (In English).

12. Rakutko S., Alsina I., Avotins A., Berzina K. Manifestation of effect of fluctuating asymmetry of bilateral traits of tomato growing in industrial greenhouses. *Engineering for rural development proceedings*. 2018. 186-191 (In English).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 29.01.2020
The paper was submitted
to the Editorial Office on 29.01.2020

Статья принята к публикации 07.02.2020
The paper was accepted
for publication on 07.02.2020