

Спектральный аспект при использовании облучателей со светодиодами для выращивания салатных растений в условиях светокультуры

А.А. ЕМЕЛИН, Л.Б. ПРИКУПЕЦ¹, И.Г. ТАРАКАНОВ

ООО «ВНИСИ имени С.И. Вавилова», ООО «БЛ ТРЕЙД», ФГОУ ВПО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва

Аннотация

Утверждая, что в настоящее время нет альтернативы экспериментальному методу поиска наиболее благоприятного спектра оптического излучения для выращивания определённых видов растений, авторы провели фотобиологические исследования в условиях светокультуры салата в фитотроне РГАУ – МСХА. В эксперименте использовались облучатели с НЛВД, а также с белыми и цветными (красно-синими) СД. Полученные результаты позволяют надеяться на снижение в перспективе на 40–45% затрат электроэнергии при использовании красно-синих фитооблучателей со светодиодами для выращивания салата в промышленных теплицах.

Ключевые слова: светодиод, светокультура, облучательная установка, световые кривые, салатно-зеленные культуры, фотобиологический эксперимент, НЛВД, фотосинтезный фотонный поток.

1. Введение

Появление светодиодных источников излучения позволяет надеяться на претворение в жизнь «сокровенной мечты» фотобиологов, светотехников и специалистов в области тепличного растениеводства о создании источников света с «оптимальным» спектром излучения для выращивания определённых видов растений [1–3]. Вполне логичным представляется выбор в качестве первого объекта для решения этой задачи зеленых салатных культур, относящихся к растениям с коротким периодом вегетации (25–30 суток), производящим полезную биомассу в виде листьев.

С определёнными допущениями, скорее, в порядке условной математической иллюстрации, конечную реакцию растений на действие оптического излучения (ОИ) можно записать в виде интегральной функции

$$N = q \cdot \eta_{\text{эф}} \times \int_{400}^{700} E_v(\lambda) \cdot \alpha(\lambda) \cdot K_{\text{ф}}(\lambda) \cdot d\lambda,$$

где $E_v(\lambda)$ – спектральная плотность облучённости на поверхности ценоза от источника излучения области ФАР (400–700 нм), $\alpha(\lambda)$ – спектральный коэффициент поглощения листьев, $K_{\text{ф}}(\lambda)$ – спектр действия фотосинтеза, N – сухой вес растений, T – продолжительность облучения, $\eta_{\text{эф}}$ – КПД синтеза сухой биомассы, q – энергетическая ценность сухой биомассы.

Характерные спектральные функции $K_{\text{ф}}(\lambda)$ и $\alpha(\lambda)$ представлены на рис. 1. Их вид побудил целый ряд производителей предложить для выращивания салатно-зеленных культур облучатели с комбинацией красных и синих СД, причём доля излучения в красной части спектра (630–690 нм) составляет 65–95%, а в синей (430–470 нм) – остальные 5–35% [4–6].

При этом неизменно утверждалось, что использование новых красно-синих облучателей с СД способно обеспечить существенно большую энергоэффективность и продуктивность растений по сравнению с применяемыми в тепличном растениеводстве в настоящее время светильниками с НЛВД.

В связи с этим приходится напомнить, что в практической фотобиологии давно уже доказан факт отсутствия, в большинстве случаев, корреляции между интенсивностью фотосинтеза и продуктивностью растений, а проблема интеграции фотосинтеза и роста в продукционном процессе в значительной мере определяется организацией и регуляцией донорно-акцепторных отношений [7].

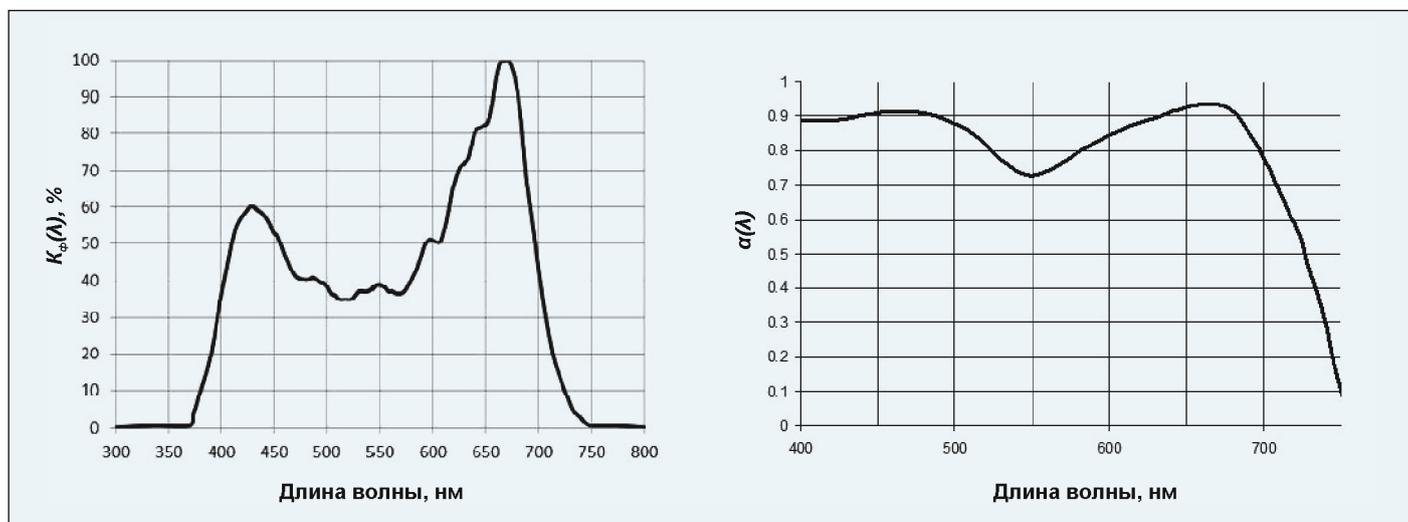


Рис. 1. Относительный спектр действия фотосинтеза (а) и спектральный коэффициент поглощения листьев (б)



Рис. 2. Внешний вид облучателя с красными и синими СД

В решении задачи поиска наиболее благоприятного спектра ОИ для определённого вида растений в настоящее время нет альтернативы экспериментальному пути. Именно он должен обеспечить получение результатов, на основе которых могут быть выработаны обоснованные требования к основным светотехническим параметрам фитооблучателей с СД.

По-видимому, важным и необходимым в этой связи явился этап пробных экспериментов, выполненных в ряде зарубежных исследовательских центров, в которых, как правило, при одном уровне освещённости (облучённости) сравнивалась продуктивность салатных культур при использовании «традиционных» источников света и цветных СД [8, 9]. Полученные при этом результаты не подтверждали радикальных преимуществ «цветных» композиций облучателей с СД и не учитывали энергетические параметры облучательной установки (ОУ).

С учётом изложенного авторами была поставлена задача провести собственные фотобиологические исследования в фитотроне кафедры физиологии растений РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева.

2. Методика и условия исследований и используемое оборудование

План исследований предусматривал проведение фотобиологического эксперимента по классической схеме, позволяющей получать «световые кривые» продуктивности растений салата, то есть зависимости последней от уровня освещённости (облучённости) от источников излучения с раз-



Рис. 3. Относительная спектральная плотность горизонтальной облучённости в 1,5 м от облучателя с белыми СД

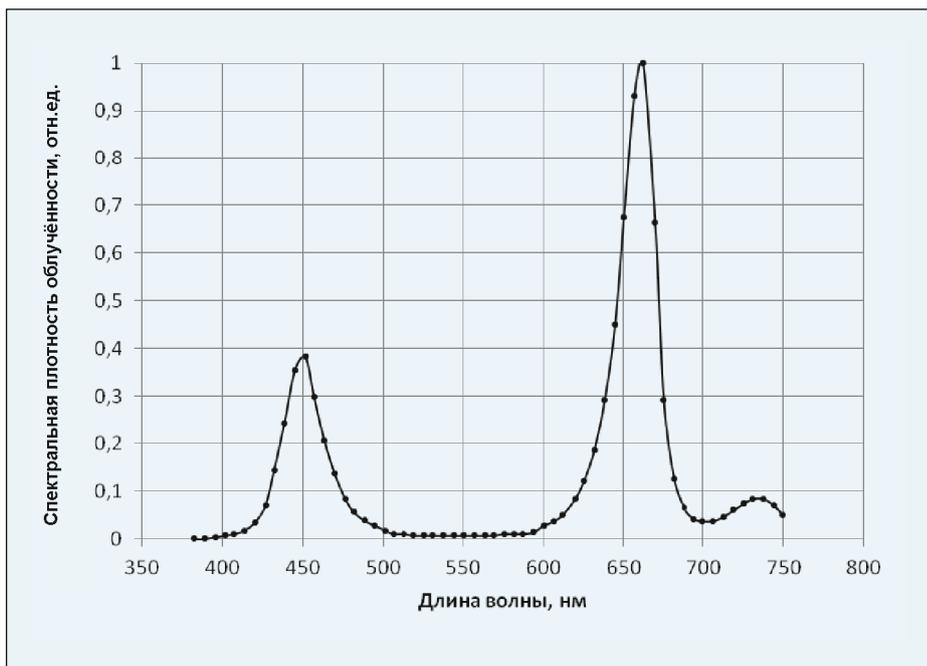


Рис. 4. Относительная спектральная плотность горизонтальной облучённости в 1,5 м от облучателя с красными и синими СД

ными спектрами. С учётом минимизации затрат было решено ограничиться тремя уровнями освещённости (облучённости) для каждого спектрального варианта и провести, соответственно, по три серии вегетаций.

Температура в фитотроне поддерживалась в пределах (24 ± 2) °С днём и (18 ± 2) °С ночью, влажность воздуха – $(85 \pm 5)\%$, фотопериод – 18 ч в сутки. Растения салата по 3 шт. выращивали на субстрате на основе нейтрального верхового торфа, за-

правленного удобрениями. Полив растений вели ежедневно до первой капли.

Сосуды с растениями размещали на столах размером 100×100 см каждый. В эксперименте, как указано выше, использовались три типа облучателей: аналоги используемых в теплицах для выращивания салата облучателей с НЛВД компании Osram серии «PlantaStar» мощностью 400 и 250 Вт (контроль), светильник типа ДОО1–80×1–04 Galad с белыми СД (коррели-

рованная цветовая температура (КЦТ) 5000 К) и изготовленный на его основе экспериментальный облучатель с композицией красных и синих СД.

Данный облучатель (рис. 2) состоит из 4-х «линеек» мощностью по 20 Вт каждая, общая потребляемая мощность – 95 Вт. В нём использовались СД серии «XR-C» мощностью 1 Вт компании Cree (США) красного и синего света, при этом доля красного излучения составляла 70, а синего – 30%. Спектры излучения облучателей приведены на рис. 3 и 4. Угол наклона боковых модулей СД-линеек приборов ДОО1–80×1–04 мог изменяться, что оказалось весьма удобным для обеспечения требуемой равномерности освещения (облучения) технологической поверхности. Облучатели подвешивали на необходимой высоте над поверхностью столов, высота регулировалась в пределах 50–120 см, позволяя обеспечивать требуемую освещённость (облучённость).

Все сорта салатов выращивали в течение 25 дней от рассады, полученной в идентичных условиях, до готовой продукции. По окончании срока вегетации стандартными методами определяли средние сырой и сухой веса полезной биомассы (листьев) на сосуд. Биологическая повторность – четырёхкратная (4 сосуда на вариант).

В репрезентативной технологической зоне выращивания салата изменение освещённости (облучённости) не превышало $\pm 10\%$ от среднего значения. На рис. 5 приведены фотографии фито-установок с разными облучателями.

Для исследования были отобраны 2 сорта салата – Афицион и Кармези, отличающиеся высокой продуктивностью и используемые в промышленных теплицах.

Исходя из собственных экспертных оценок и технологических требований к «салатным линиям» промышленных теплиц, для НЛВД и белых СД был принят диапазон варьирования освещённости в пределах 8–18 клк. В связи с тем, что использование системы световых величин для облучателей с красно-синим спектром едва ли возможно, для измерения облучённости мы пользовались фотосинтетической фотонной системой величин, используемой в Нидерландах, США и ряде других стран, но в России пока не получившей распространения. В этой системе облучённость



Рис. 5. Фотографии фито-установок, смонтированных для проведения эксперимента в РГАУ – МСХА. Слева направо: с «красно-синими» и белыми облучателями с СД и с облучателями с НЛВД

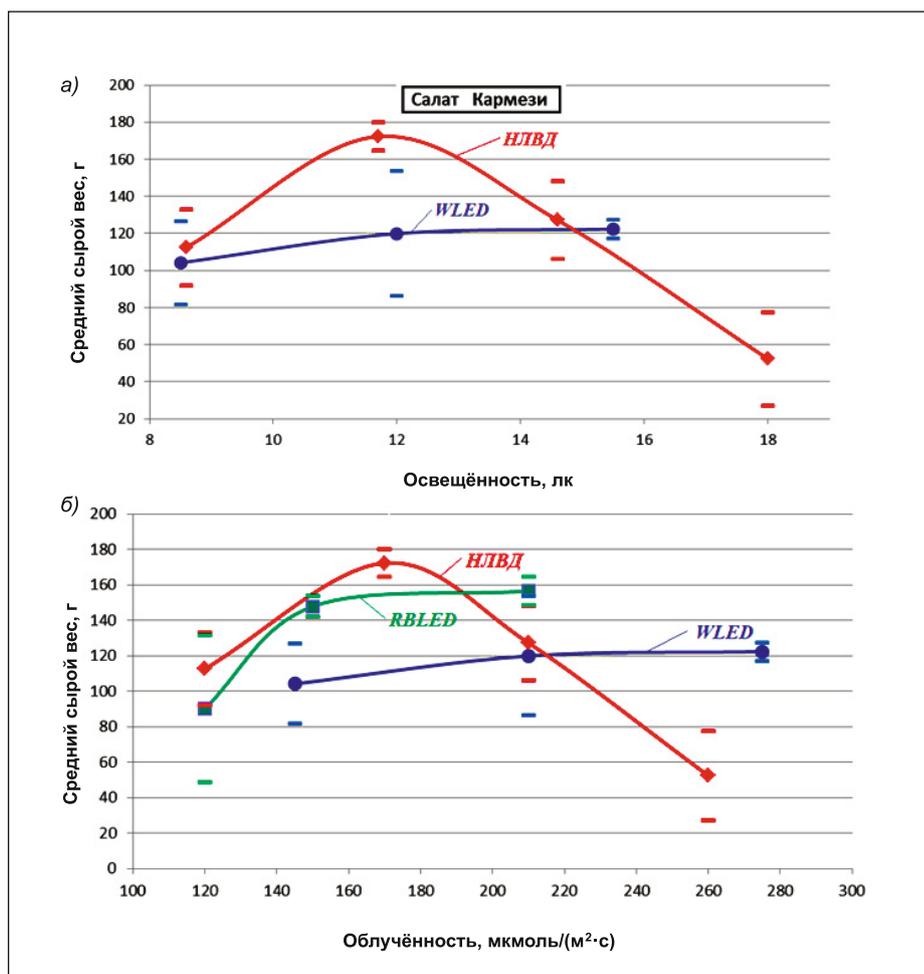


Рис. 6. Зависимость продуктивности салата сорта Кармези (г/сосуд) от освещённости (а) и фотосинтетической фотонной облучённости (б) от белых (WLED) и «красно-синих» (RBLVD) облучателей с СД и облучателей с НЛВД (HЛВД)

определяется как поверхностная плотность потока фотонов и измеряется в единицах мкмоль/(м²·с). На основе анализа данных зарубежных опытов

и собственных оценок в этом случае был выбран диапазон облучённости 100–300 мкмоль/(м²·с). Безусловно, чтобы получить данные для сравне-

Таблица

Вариант облучателя	H , (мкмоль·с ⁻¹)/Вт	$\eta_{обл}$	$u_{ОУ}$
Облучатель с НЛВД	1,85	0,9	0,9
Облучатель с красно-синими СД	2,24	1	0,9

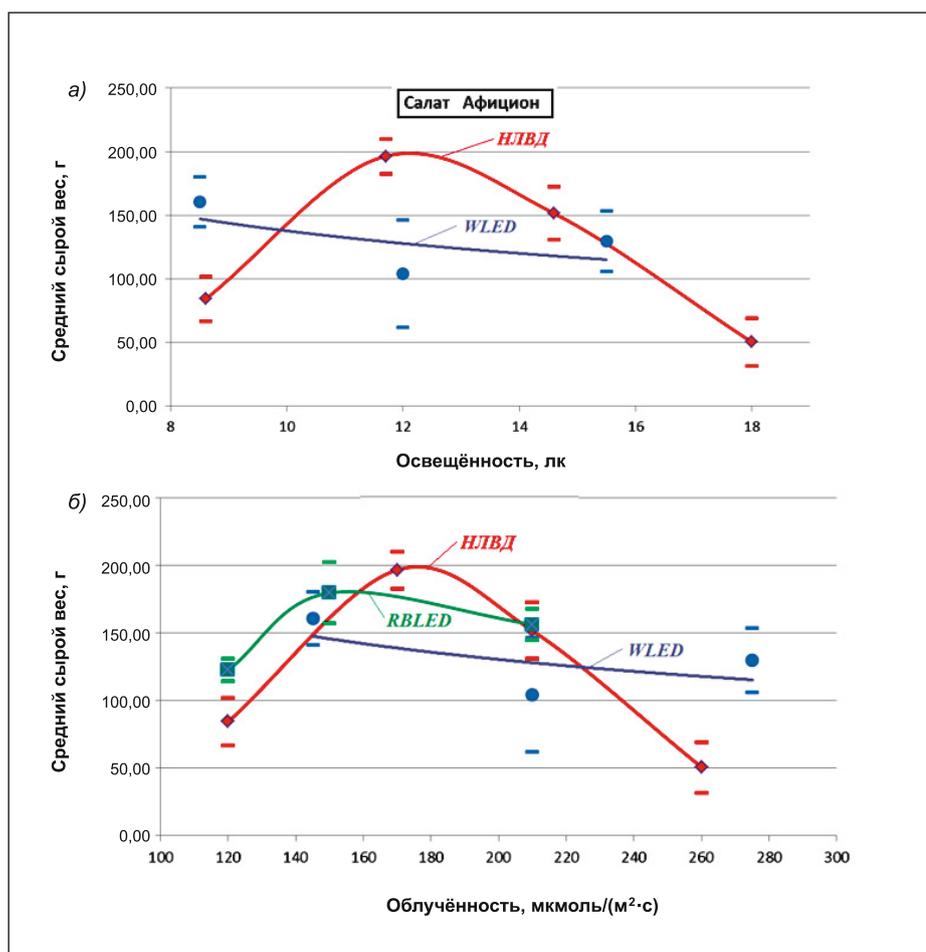


Рис. 7. Зависимость продуктивности салата сорта Афицион (г/сосуд) от освещённости (а) и фотосинтезной фотонной облучённости (б) от белых (WLED) и «красно-синих» (RBLED) облучателей с СД и облучателей с НЛВД (НЛВД)

ний, для измерения облучённости от облучателей с НЛВД и белыми СД наряду с фотометрической использовалась и фотосинтезная фотонная система. Экспериментально установленная связь между освещённостью, измеряемой в клк, и облучённостью, измеряемой в мкмоль/(м²·с), для облучателей с НЛВД и белыми СД описывалась, соответственно, следующими соотношениями:

$$E_v^{НЛВД} [\text{лк}] \approx 68-75 \cdot E_{ppf}^{НЛВД} [\text{мкмоль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})],$$

$$E_v^{\text{бел.СД}(5000\text{К})} [\text{лк}] \approx 55-60 \cdot E_{ppf}^{\text{бел.СД}(5000\text{К})} [\text{мкмоль}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})].$$

Для измерения освещённости мы пользовались люксметром «ТКА-Люкс» (компания «ТКА», Санкт-Петербург), а для измерения фотосинтезной облучённости – прибором «Quantum Meter» (компания Spectrum Technologies, Inc., США).

3. Анализ результатов исследований

Результаты исследований представлены на рис. 6 и 7 в виде серии световых кривых, связывающих продуктивность растений N с освещённостью E_v или фотосинтезной фотонной облучённостью E_{ppf} . Под продуктивностью в нашем случае понимается средний вес полезной биомассы растений салата из одного горшочка, ана-

логичного используемым в промышленных теплицах.

Анализ полученных данных позволяет говорить о наличии как общих закономерностей в реакции растений на уровень освещённости (облучённости) и спектр излучения, так и различий для каждого сорта салата. Отметим, что «классический» (наличие выраженного максимума продуктивности) вид для всех сортов салата имеют только световые кривые, полученные для облучателей с НЛВД и, в какой-то мере, с красными и синими СД.

Несмотря на достаточно длительное использование облучателей с НЛВД в ОУ для светокультуры салата, в литературе практически отсутствуют данные, обосновывающие выбор предпочтительной освещённости для салатных линий в теплицах. Например, в центре России в разных тепличных хозяйствах он может колебаться от 8 до 14–15 клк. В наших экспериментах показано, что наибольшая продуктивность всех трёх сортов салата обеспечивается при использовании облучателей с НЛВД при E_v порядка 12 клк (~170 мкмоль/(м²·с)), что, безусловно, представляет большой интерес для тепличных хозяйств.

В экспериментах с красно-синей комбинацией СД максимальная или близкая к ней продуктивность достигалась при несколько меньшей фотонной облучённости (порядка 150 мкмоль/(м²·с)) для обоих исследуемых сортов салата. Результаты по продуктивности, достигнутые при использовании излучения СД белого света с КЦТ 5000 К, уступали достигнутым в случаях НЛВД и красно-синей комбинации СД.

В целом вариант спектра, соответствующий НЛВД, оказался более эффективным, обеспечивая самую высокую продуктивность растений. Это несколько противоречит возникшим в последнее время поверхностным представлениям, что оптимальный спектр источника излучения должен быть по форме близок к спектру действия фотосинтеза. Напомним в связи с этим, что на процесс фотосинтеза уходит не больше 5–8% энергии поглощённого излучения, а продуктивность растений – сложный продукт воздействия излучения широкого спектрального диапазона. В частности, весьма важным для листовых растений, к которым относятся салатные культуры, является ближнее ИК

излучение НЛВД, поглощаемое листьями и влияющее на температуру и транспирацию последних.

Полученные зависимости продуктивности салата от спектральных характеристик и интенсивности падающего на ценоз излучения (рис. 6 и 7) – в известной мере «рафинированные»: не учитывают энергетические затраты по обеспечению определённого уровня освещения (облучения).

Задача практического использования результатов исследования делает необходимым выполнение соответствующих расчётных оценок для основных сравниваемых вариантов, то есть облучателей с НЛВД и комбинацией красных и синих СД. Данные оценки выполнялись по выражению

$$P_1 = \frac{E_{ppf}}{H \cdot \eta_{obl} \cdot u_{OU}}$$

где P_1 – установленная удельная мощность ОУ в теплице, Вт/м²; E_{ppf} – фотосинтезная фотонная облучённость, мкмоль/(м²·с); H – фотосинтезный фотонный поток источника излучения, отнесённый к сумме мощности и активных потерь в ПРА (фотосинтезная фотонная отдача), (мкмоль·с⁻¹)/Вт; η_{obl} – КПД облучателя; u_{OU} – коэффициент использования ОУ.

При расчётах использовались самые высокие из достигнутых значений H , как для НЛВД «PlantaStar» мощностью 600 Вт [10], так и для аналогичного параметра «красно-синего» облучателя с СД [11], а также данные по η_{obl} и u_{OU} , достигнутые на практике. Указанные значения приведены в таблице.

На рис. 8 приведены зависимости N от P_1 для двух основных сравниваемых вариантов для салатов Кармези и Афицион.

Как видно, замена шкалы E_{ppf} на шкалу P_1 приводит к определённой трансформации световых кривых. Становится более очевидным, что близкие, с учётом погрешности эксперимента, данные по продуктивности салатных культур могут получаться при использовании облучателей с красными и синими СД при установленной мощности на 30–35% меньшей, чем в случае облучателей с НЛВД. Это существенно повышает энергоэкономичность технологии светокультуры салата, где затраты на электроэнергию в себестоимости до-

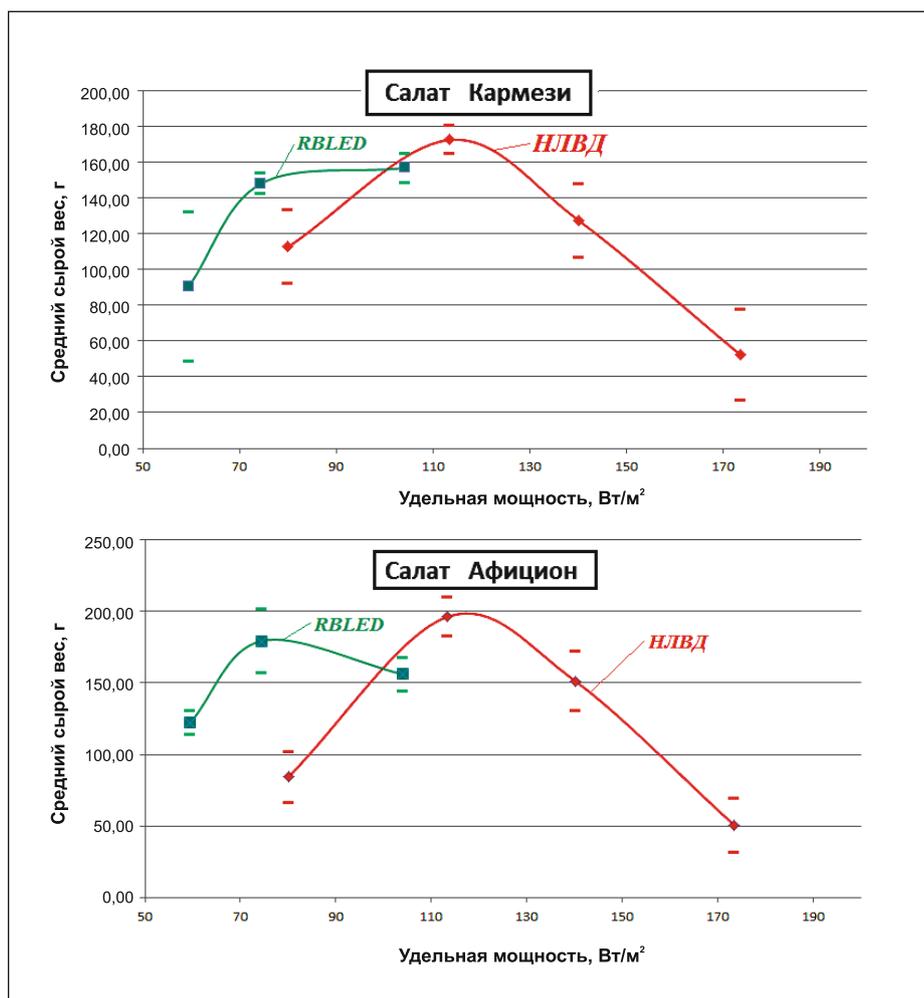


Рис. 8. Зависимость продуктивности разных сортов салата от удельной установленной мощности фито-установки с «красно-синими» облучателями с СД (RBLED) и с облучателями с НЛВД (НЛВД)

стигают 50%. Отметим, что, по существующим прогнозам [11], фотонная отдача красных и синих СД в ближайшие годы может возрасти ещё на 30%, что позволит снизить удельную установленную мощность в ОУ с СД, в сравнении с НЛВД, на 40–45%.

Ответ на вопрос, что препятствует в таком случае массовому внедрению облучателей с СД в тепличное растениеводство, очевиден. Разница цен облучателей с СД и существующих облучателей с НЛВД столь высока, что срок окупаемости подобной замены – не менее 6–7 лет [12]. Финансовые события последнего времени только усугубляют эту ситуацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прикупец Л.Б., Тихомиров А.А. Оптимизация спектра излучения при выращивании овощей в условиях интенсивной светокультуры // Светотехника. – 1992. – № 3. – С. 5–7.

2. Тихомиров А.А., Лисовский Г.М., Сидько Ф.Я. Спектральный состав света и продуктивность растений. – Новосибирск: «Наука», 1991. – 167 с. 3.

3. Tarakanov, I., Yakovleva, O., Kononova, I., Paliutina, G., Anisimov, A. Light-emitting diodes: on the way to combinatorial lighting technologies for basic research and crop production // Acta Horticulturae. – 2012. – Vol. 956. – P. 171–178.

4. Освещение светодиодами для теплиц. Каталог Phillips, изд. 09/2013.

5. URL: <http://kodosvet.ru/led-light-fixtures> от 25.02.2015 (дата обращения: 15.03.2015).

6. Plant Growth with LED Lighting. Каталог Parus (Южная Корея), изд. 05/2014.

7. Мокронос А.Т. Взаимосвязь фотосинтеза и функции роста // В кн.: Фотосинтез и производственный процесс. М.: Наука, 1988. – С. 109–121.

8. Sase, S., Mito, C., Okushima, L., Fukuda, N., Kanetsaka, N., Sekiguchi, K.,

Odawara, N. Effect of overnight supplemental lighting with different spectral LEDs on the growth of some leafy vegetables // *Acta Horticulturae* – 2012. – Vol. 956. – P. 327–333.

9. *Lee, J.S., Lim, T.G., Kim, Y.H.* Growth and phytochemicals in lettuce as affected by different ratios of blue to red radiation // *Acta Horticulturae*. – 2014. – Vol. 1037. – P. 843–848.

10. Лампы «PlantaStar». Каталог Osram, 2014.

11. *Тон тен Хааф* (Light Interaction (Holland)), Всё о лампах досвечивания / Доклад на научно-техническом семинаре Ассоциации «Теплицы России», г. Малоярославец, 13.03.2014 г.

12. *Прикупец Л.Б., Емелин А.А.* Использование облучателей на основе светодиодов для светокультуры салата: экономический аспект// Теплицы России. – 2013. – № 2. – С. 66–68.



Емелин Андрей Александрович, магистр. Окончил с отличием в 2014 г. магистратуру кафедры «Светотехника» НИУ «МЭИ». Инженер ООО «ВНИСИ имени С.И. Вавилова»

и технический консультант ООО «БЛ ТРЕЙД»



Прикупец Леонид Борисович, канд. тех.наук. Окончил с отличием в 1970 г. МЭИ. Зав. лабораторией ООО «ВНИСИ имени С.И. Вавилова» и ведущий

технический консультант ООО «БЛ ТРЕЙД»



Тараканов Иван Германович, доктор биол. наук, профессор. Окончил в 1978 г. МСХА имени К.А. Тимирязева. Зав. кафедрой «Физиология растений» ФГОУ ВПО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА НА ПМЭФ – 2015

С 18 по 20 июня 2015 г. в выставочном комплексе «Ленэкспо» с большим успехом прошёл 19-й ежегодный ПЕТЕРБУРГСКИЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ФОРУМ. Его девиз – «ВРЕМЯ ДЕЙСТВОВАТЬ: СОВМЕСТНЫМИ УСИЛИЯМИ К СТАБИЛЬНОСТИ И РОСТУ!» Несколько цифр касательно этого мероприятия: 7500 участников из 114 стран, 42 делегации, 190 глав крупнейших корпораций, 72 мероприятия, на которых выступило около 500 докладчиков, 205 соглашений на сумму 293,3 млрд руб. В подготовке Форума участвовало 25000 человек. Аккредитовано 2000 журналистов.

Программа ПМЭФ – 2015 была обширна и разносторонняя и затрагивала ключевые вопросы мировой экономики. Большое внимание на Форуме было уделено и сердцу хозяйственной деятельности любой страны – её электроэнергетике. Краткие и принципиальные сообщения о некоторых её аспектах. Одним из кульминационных событий Форума, начиная с 2003 г., является вручение Президентом России МЕЖДУНАРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПРЕМИИ «ГЛОБАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ». В этом году премии были удостоены двое учёных из США:

Сюдзи Накамура – профессор Калифорнийского университета, «За изобретение, коммерциализацию и развитие энергоэффективного белого освещения светодиодами». До 1990-х годов производители светодиодов могли выпускать только красные, жёлтые и зелёные диоды.

Джанаянт Балига – профессор университета Северной Каролины «За изобретение, разработку и коммерциализацию биполярного транзистора

с изолированным затвором, который является одной из наиболее важных инноваций в области управления и распределения управления и распределения электроэнергии».

С 2003 г. лауреатами премии стали 33 учёных из 10 стран. В 2015 г. премиальный фонд составил 33 млн руб.. Решение по выбору лауреатов принимает Международный комитет по присуждению премии «ГЛОБАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ», в состав которого входят 25 авторитетных учёных из 13 стран.

На других многочисленных мероприятиях форума – деловых круглых столах, панельных сессиях, брифингах, саммите информационных агентств, арене, деловых завтраках, теледебатах «Россия 24» и др. – в той или иной степени затрагивались и вопросы электроэнергетики. Например: Минэнерго РФ и ОАО «Роснано» договорились о совместной работе по внедрению инновационных технологий и новых материалов в российскую энергетическую отрасль и по снижению зависимости топливно-энергетической отрасли от импорта технологий и оборудования; при поддержке ОАО «Россети» обсуждалась проблема энергоинтеграции Европы, России и Азии; значительное внимание было уделено росту и развитию атомной энергетики в условиях меняющегося глобального рынка, новым реалиям нефтегазовой отрасли, старту проекта «Федеральный испытательный центр» в п. Белоостров; не остался без внимания и вопрос энергосбережения.

Е.А. Лесман, инженер, корреспондент журнала «Светотехника» в Санкт-Петербурге, участник ПМЭФ - 2015

Подписывайтесь на журнал

Светотехника

На 2-е полугодие 2015 года

Индекс журнала 70808
в каталоге «Пресса России»,
отдел «АРЗИ».
Редакция также оформляет
подписку на журнал

Адрес: 129626, г. Москва,
проспект Мира, 106,
ВНИСИ, оф. 327, 334
Тел/факс: 8 (495) 682-58-46
E-mail: journal.svetotekhnika@mail.ru