

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ / ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT

УДК 628.9.041.8:631.344.8

doi: 10.15507/2658-4123.032.202204.600-612

Научная статья

Обоснование применения технологической схемы облучения с разделением энергетических потоков в светокультуре промышленных теплиц

П. П. Долгих*Красноярский государственный аграрный университет**(г. Красноярск, Российская Федерация)**dpp10@yandex.ru*

Аннотация

Введение. Обеспечение требуемых параметров и характеристик электромагнитного излучения светотехнических облучательных установок для теплиц является важной задачей при повышении эффективности использования энергии и улучшении характеристик растениеводческой продукции. Цель работы – определение эффективного режима работы технологической схемы облучения с разделением энергетических потоков в светокультуре промышленных теплиц.

Материалы и методы. В разработанной модели технологической схемы облучения за счет конструктивных решений есть возможности разделить энергетический поток на составляющие и управлять этими потоками. Предложено путем раздельного регулирования напряжения на облучателе и вентиляторе создавать условия для изменения величины отдельных спектральных линий излучения с целью дальнейшей оценки эффекта от данных изменений.

Результаты исследования. Получены результаты по изменению распределения PPFD в зависимости от напряжения на тепличном облучателе от 198 до 242 В и температуры воздуха вблизи лампы от 38 до 47 °С. Сравнение усредненных значений PPFD в исследуемых режимах со значением PPFD в номинальном режиме для этих диапазонов позволило определить режим при напряжении 220 В и температуре воздуха вблизи лампы от 43 до 47 °С как рациональный для практического применения в технологических схемах облучения с разделением энергетических потоков в светокультуре промышленных теплиц.

Обсуждение и заключение. Разработка и применение рациональных режимов работы тепличных облучателей, с учетом режимов работы сети и лампы, является основой для обеспечения тепличного производства альтернативной тепловой энергией.

Ключевые слова: промышленные теплицы, технологическая схема облучения, энергетические потоки, тепличный облучатель, распределение энергии излучения по спектру, регулирование напряжения, низкопотенциальная тепловая энергия

© Долгих П. П., 2022



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Долгих П. П. Обоснование применения технологической схемы облучения с разделением энергетических потоков в светокультуре промышленных теплиц // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 4. С. 600–612. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.600-612>

Original article

Rationale for the Application of the Technological Scheme of Irradiation with Separation of Energy Flows in the Lighting Systems of Industrial Greenhouses

P. P. Dolgikh

Krasnoyarsk State Agrarian University

(Krasnoyarsk, Russian Federation)

dpp10@yandex.ru

Abstract

Introduction. Ensuring the required parameters and characteristics of electromagnetic radiation of lighting irradiation facilities for greenhouses is an important task to improve the efficiency of energy use and the characteristics of crop production. The aim of the work is to determine the effective operation mode of technological irradiation scheme with separation of energy flows in lighting systems of industrial greenhouses.

Materials and Methods. In the developed model of the irradiation technological scheme, constructive decisions make it possible to divide the energy flows into components and to control these flows. It has been proposed that separate regulation of the voltage on the irradiator and the fan can be used to create conditions for changing the values of separate spectral lines of radiation in order to further assess the effect of these changes.

Results. We obtained the results on the change of PPFD distribution depending on the voltage on the greenhouse irradiator from 198 to 242 V and the air temperature near the lamp from 38 to 47°C. The comparison of averaged PPFD values in the studied modes with the PPFD value in the nominal mode for these ranges allowed determining the mode at voltage 220 V and the air temperature near the lamp from 43 to 47°C as a rational for practical use in technological irradiation schemes with energy flows separation in the lighting systems of industrial greenhouses.

Discussion and Conclusion. The development and application of rational modes for operation of greenhouse irradiators, taking into account the modes of network and lamp is the basis for greenhouse production with the use of alternative thermal energy.

Keywords: industrial greenhouses, technological scheme of irradiation, energy flows, greenhouse irradiator, distribution of radiation energy over the spectrum, voltage regulation, low-potential heat energy

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

For citation: Dolgikh P.P. Rationale for the Application of the Technological Scheme of Irradiation with Separation of Energy Flows in the Lighting Systems of Industrial Greenhouses. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(4):600–612. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202204.600-612>

Введение

Технологические операции по облучению растений в тепличной светокультуре являются энергоемкими процессами

и требуют оптимальных решений при разработке мероприятий по повышению эффективности. Применяемые на сегодняшний момент в промышленных теплицах

облучательные установки с газоразрядными лампами высокого давления достигли, путем технического совершенствования, максимальных показателей по критерию эффективной отдачи, но работы по улучшению их характеристик продолжают¹. Однако особенностями, которые необходимо учитывать при эксплуатации, являются повышенные требования к спектральному составу и интенсивности излучения из-за ресурсных изменений, зависящих от срока эксплуатации², отклонения питающего напряжения [1], схем питания источников излучения [2]. Любые отклонения в показателях эффективного потока сказываются как положительно, так и отрицательно на конечном растениеводческом результате и экономических показателях конечной продукции. Также у газоразрядных ламп высокого давления имеется проблема, связанная с неравномерным распределением энергии излучения по спектру. Особенно это касается «синей» части спектра, процент содержания которой низкий, что требует дополнительных мер по коррекции и устранению этого недостатка [3].

Предварительные исследования по повышению энергоэффективности процесса облучения растений позволили установить, что представляется возможным расширить функции светотехнических облучательных установок в теплицах путем использования инфракрасной составляющей излучения облучателя на нужды отопления в системах микроклимата [4].

В ходе экспериментов был установлен ряд зависимостей, позволяющих делать выводы об эффективности применения в системе микроклимата теплиц облучательных установок с функцией принудительного охлаждения

воздушным способом [5]. Управление потоками утилизированной таким образом тепловой энергии, которая затем используется в системе отопления теплиц и является основой для обеспечения тепличного производства дополнительной альтернативной экологически чистой энергией, дает преимущества [6]. При этом были определены новые дополнительные преимущества использования таких установок, заключающиеся в значительном изменении фотосинтетического потока фотонов в функции температуры воздуха вблизи лампы при регулировании уровня напряжения в пределах, регламентированных стандартом. Однако вопросы смещения в отдельных спектральных областях излучения облучательных установок с функцией принудительного охлаждения при изменении внешних факторов, к которым, в частности, относится уровень напряжения в сети, имеющие важное значение в показателях эффективности технологических процессов растениеводства защищенного грунта, не исследованы. Для жизнедеятельности растений особенно необходимы фотосинтетически активная (ФАР) ($\Delta\lambda = 360\text{--}720$ нм) и физиологически активная радиации ($\Delta\lambda = 300\text{--}800$ нм), зависящие от распределения энергии по спектру. Их регулирование дает дополнительные эффекты в управляемом растениеводстве [7].

Целью работы является определение эффективного режима работы технологической схемы облучения с разделением энергетических потоков в светокультуре промышленных теплиц.

Обзор литературы

Одним из уровней энергоэкологичности светокультуры в современном представлении является модель

¹ Тепличное освещение. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.reflux.ru/catalog/glighting/> (дата обращения: 10.09.2022).

² Долгих П. П., Кунге Я. А., Цугленок Н. В. Энергосберегающие электронные пускорегулирующие аппараты для облучательных установок теплиц : Красноярск : КрасГАУ, 2003. 116 с.

технологического процесса облучения, где частным показателем энергоэкологичности является спектральный состав излучения [8–10]. При этом определена роль каждого спектрального диапазона. Растения чувствуют и реагируют на оптические спектры от ультрафиолетового излучения (UV) до дальнего красного (FR), а качество излучения или длина волны оптического спектра значительно влияет на рост, развитие, морфологию и вторичный метаболизм растений. Реакция растений на качество излучения зависит от вида и сорта растений. В зависимости от условий окружающей среды реакция растений на одно и то же качество излучения может быть изменена «фоновыми» условиями, например, количеством ФАР, которое растение получает в течение дня (DLI).

Красное (R) излучение воспринимается растениями с помощью *phys* и регулирует реакции, связанные с прорастанием семян, удлинением стебля, расширением листьев, индукцией цветения и т. д. А синее (B) излучение воспринимается *CRYs* и *phots* и регулирует такие процессы, как деэтиоляция рассады, фототропизм, движение хлоропластов, циркадные ритмы, рост корней, устьичного отверстия и т. д. Однако излучения R и B действуют антагонистически в регулировании размера и толщины листа. B-излучение способствует сплющиванию листьев за счет усиления фотоактивности, в то время как R-излучение преимущественно способствует ветвлению, активируя *phyB* [11].

Таким образом, необходимо уделять пристальное внимание определению баланса между R- и B-излучением, чтобы архитектура растений регулировалась в соответствии с поставленной целью. Высокую эффективность этих излучений для фотосинтеза и роста растений легко понять, поскольку они идеально соответствуют пикам поглощения хлорофиллов.

Многочисленные исследования были проведены для оценки влияния R- и B-излучения на накопление вторичных метаболитов растений, и результаты в некоторых случаях противоречат друг другу [12].

Красное и дальнее красное излучения являются важными сигналами для растений, а соотношение R:FR влияет на физиологически регулируемые реакции, такие как прорастание семян, деэтиоляция семян, избегание затенения и репродукция. Было установлено, что добавление к FR-излучению излучения с более короткой длиной волны (400–700 нм) может сбалансировать возбуждение между фотосистемой I (PSI) и PSII, что синергетически увеличивает фотохимию и фотосинтез [13]. PSI и PSII работают последовательно для проведения фотохимических реакций, которые предпочтительно возбуждаются FR- и коротковолновым излучением соответственно [14]. Одна из гипотез гласит, что фотосинтетическая эффективность растений, выращенных при комбинированном FR- и коротковолновом излучении, должна быть увеличена из-за лучшего баланса между возбуждением двух фотосистем, в то время как некоторые исследователи предположили, что эффективность фотосинтеза всего растения будет снижена из-за более низкой PFD [15; 16]. Необходимы дальнейшие исследования, чтобы лучше понять влияние FR-излучения на фотосинтез растений.

Зеленое (G) излучение действует как сигнал, регулирующий нефотосинтетические реакции растений, такие как вегетативный рост, накопление антоцианов и инициация цветения посредством *phys* и *cru* [17]. Реакция растений на G-излучение похожа на FR-излучение и имеет общую тенденцию противостоять реакциям, индуцированным B- или R-излучениями [18; 19]. Кроме того, в то время как лучи B и R

сильно поглощаются верхними листьями, излучение G проникает в более глубокие слои растительного покрова, что потенциально может повысить урожайность [17].

UV-излучение обычно рассматривается как фактор стресса для роста растений из-за избыточной энергии возбуждения, неизбежно приводящей к образованию активных форм кислорода в растительных органеллах, таких как хлоропласты, митохондрии и пероксисомы. В последнее время большое внимание уделяется использованию дополнительного УФ-излучения для индукции синтеза фитохимических веществ в растениях, таких как антоцианы, флавоноиды, каротиноиды, глутатион и другие биоактивные метаболиты, которые полезны для здоровья [20; 21]. Дополнительное УФ-В-излучение повышало концентрацию антоцианов, фенолов и флавоноидов в зеленых листьях базилика на 9–18 %, 28–126 % и 80–169 % соответственно, а антиоксидантная способность листьев базилика положительно коррелировала с дозами УФ-В-излучения. Однако дополнительное УФ-В-излучение в целом снижало урожайность как зеленого, так и фиолетового базилика. Поэтому необходимы дальнейшие исследования, чтобы найти точку равновесия между повышением питательных качеств и снижением урожайности.

Материалы и методы

Объектом исследования являлась технологическая схема, в которой применяется облучательная установка с функцией принудительного охлаждения воздушным способом. Предмет исследования – закономерности влияния напряжения сети и температуры воздуха вблизи лампы на отдельные спек-

ральные линии излучения тепличного облучателя. На рисунке 1 представлена технологическая схема установки для исследования тепличного облучателя.

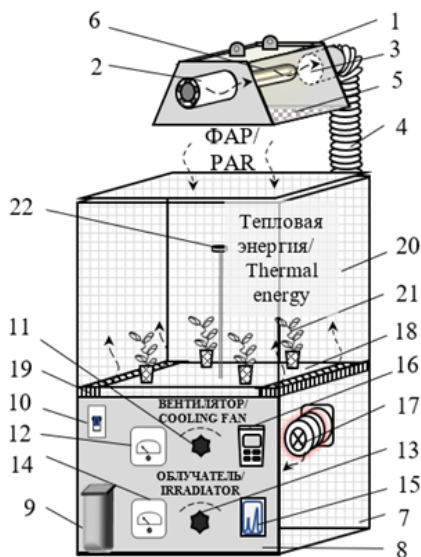
Исследования проводились с тепличным облучателем FitoTech CoolMaster 125 с лампой SON-T 1000 W E40 с номинальным фотосинтезным потоком фотонов (PPF), равным 1 700 мкмоль/с, расположенным над вегетационной камерой с приборной панелью, изображенной на рисунке 1. При работе в номинальном режиме при $U = 220$ В и отсутствии принудительного охлаждения колба лампы может нагреваться до 450 °С³. Для работы лампы использовался электромагнитный независимый пускорегулирующий аппарат 1K1000 ДНаТ46-001 фирмы GALAD.

Стандартный спектр излучения исследуемой лампы в номинальном режиме работы представлен на рисунке 2⁴. Как видно, спектр излучения можно поделить на пять диапазонов с длиной волны λ от 300 до 800 нм и $\Delta\lambda=100$ нм. Большая часть излучения лампы расположена в диапазоне длин волн $\Delta\lambda = 500$ –600 нм (50 %) и $\Delta\lambda = 600$ –700 нм (37 %). В синем диапазоне $\Delta\lambda = 400$ –500 нм спектр излучения составляет 4,5 %.

В качестве вентилятора охлаждения применяли Домовент 100 ВКО D100 мм 14 Вт с производительностью 105 м³/ч. Скорость воздушного потока (v_v , м/с) на выходе из гофрированного теплоотвода 4 и температуру воздуха вблизи лампы (T_v , °С) напротив выпускного фланца 3 измеряли анемометром Мегеон 11002, снимали спектрограммы и определяли плотность фотосинтетического потока фотонов (PPFD, мкмоль/(м²·с)), спектрометром PAR OHSP350P на расстоянии 1 м от тепличного облучателя.

³ SON-T 1000W E40 1SL/4. Технические характеристики [Электронный ресурс]. URL: https://www.lighting.philips.ru/prof/lamps/high-intensity-discharge-lamps/son-high-pressure-sodium/dsont/928154509228_EU/product (дата обращения: 10.09.2022).

⁴ Там же.

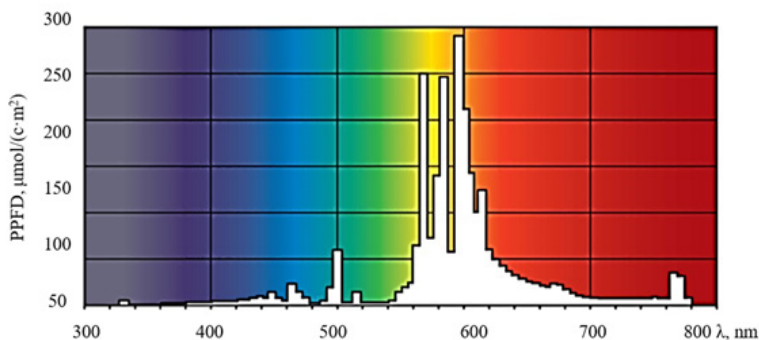


Р и с. 1. Технологическая схема установки для исследования тепличного облучателя:

- 1 – облучатель; 2 – вентилятор канальный в патрубке; 3 – выпускной фланец;
 4 – гофрированный теплоотвод; 5 – закаленное стекло; 6 – лампа; 7 – технологический отсек;
 8 – приборная панель; 9 – пускорегулирующий аппарат; 10 – автоматический выключатель;
 11 – регулировочная ручка для лабораторного автотрансформатора вентилятора;
 12 – вольтметр для вентилятора; 13 – регулировочная ручка для лабораторного
 автотрансформатора облучателя; 14 – вольтметр для облучателя; 15 – спектрофотометр ФАР;
 16 – анемометр; 17 – датчик анемометра; 18 – горизонтальная перегородка;
 19 – вентиляционные каналы; 20 – камера для выращивания; 21 – растения;
 22 – датчик спектрофотометра ФАР

F i g. 1. Technological scheme of the installation for the study of the greenhouse irradiator:

- 1 – irradiator; 2 – duct fan in the nozzle; 3 – outlet flange;
 4 – corrugated heat sink;
 5 – tempered glass; 6 – lamp; 7 – process compartment; 8 – dashboard; 9 – start-up device;
 10 – circuit breaker; 11 – adjustment knob for laboratory autotransformer fan;
 12 – voltmeter for the fan; 13 – adjustment knob for the laboratory autotransformer of the irradiator;
 14 – voltmeter for the irradiator; 15 – spectrophotometer PAR; 16 – anemometer;
 17 – anemometer sensor; 18 – horizontal partition; 19 – ventilation ducts; 20 – growing chamber;
 21 – plants; 22 – spectrophotometer sensor PAR



Р и с. 2. Распределение энергии излучения по спектру⁵

F i g. 2. Distribution of radiation energy in spectrum

⁵ Там же.

Регулирование напряжения осуществляли с помощью двух лабораторных автотрансформаторов, позволяющих независимо друг от друга управлять работой вентилятора охлаждения и тепличного облучателя. Был исследован диапазон напряжений на тепличном облучателе ($U_{об}$, В) от 198 до 242 В с $\Delta U = 22$ В⁶. Эксперимент проходил в следующей последовательности. Первоначально с помощью лабораторного автотрансформатора для тепличного облучателя устанавливали номинальное напряжение $U_{об2} = 220$ В. После этого с помощью лабораторного автотрансформатора для вентилятора охлаждения устанавливали последовательно с временным интервалом в 5 мин три уровня напряжения (U_B): 198, 220, 242 В – с целью регулирования скорости и температуры воздушного потока. При этом измеряли PPFД в пяти спектральных диапазонах: UV, B, G, R, FR. Далее эксперимент проводили при уровне напряжения на тепличном облучателе $U_{об1}=198$ В и $U_{об3}=242$ В.

Результаты исследования

Было установлено, что при одинаковом характере изменения v_B во всех трех режимах при регулировании U_B (так, при $U_{B1} = 198$ В $v_{B1} = 2,7$ м/с; при $U_{B2} = 220$ В $v_{B2} = 3,0$ м/с; $U_{B3} = 242$ В $v_{B3} = 3,4$ м/с) T_B изменялась неравномерно (рис. 3).

На рисунке 3 представлены данные по изменению распределения PPFД в зависимости от исследуемых факторов ($U_{об}$ и T_B). Каждый график содержит для сравнения спектральные линии излучения лампы в номинальном режиме. Графики демонстрируют искажение отдельных спектральных линий излучения по сравнению с номинальным режимом.

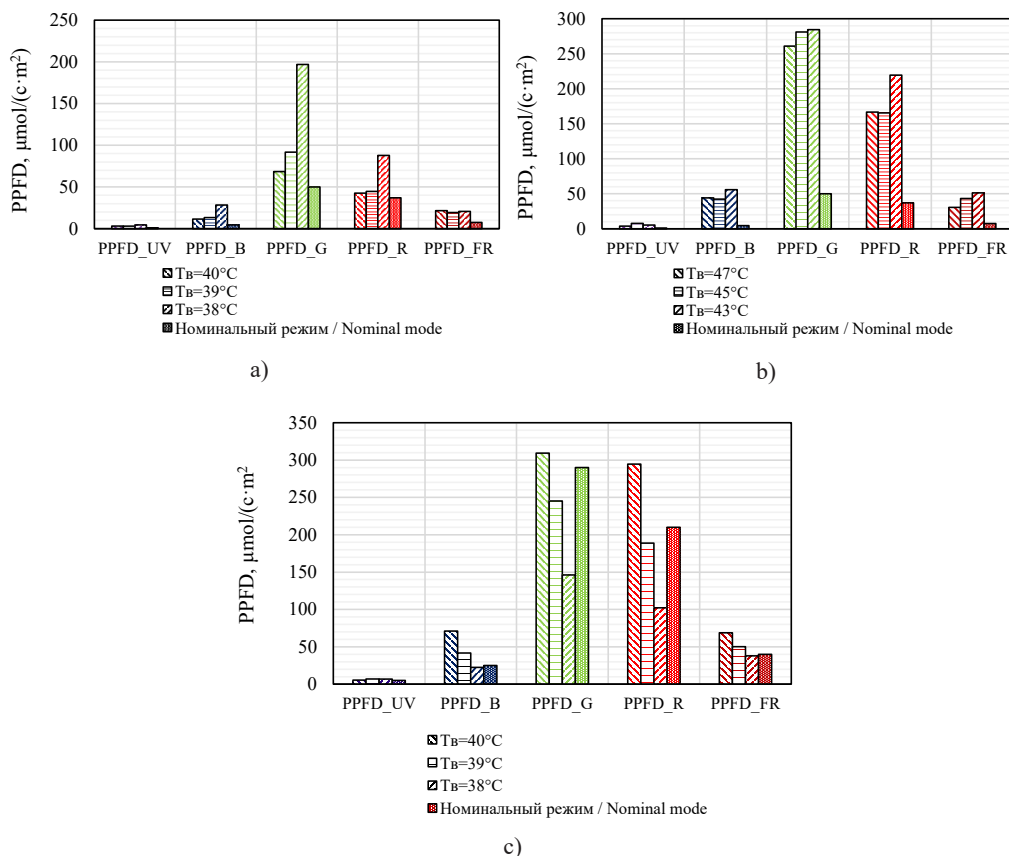
Для оценки степени влияния исследуемых факторов на искажение спектра

сравнивали усредненное значение PPFД в каждом спектральном диапазоне со значением PPFД в номинальном режиме для этих диапазонов (рис. 4).

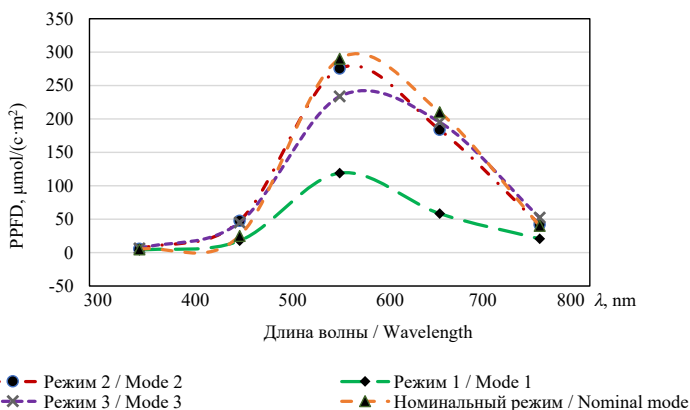
Графики демонстрируют существенное влияние $U_{об}$ и T_B на количественное распределение энергии по отдельным спектральным линиям и, как следствие, на технологию процесса выращивания, учитывая роль каждого спектрального диапазона по отдельности в эффективности процессов, определяющих физиологию и продуктивность растений. Так, в режиме 1 значение PPFД снижается во всем исследуемом диапазоне длин волн по сравнению с номинальным режимом: $\Delta\lambda = 300\text{--}400$ нм на 1,44 мкмоль/(м²·с); $\Delta\lambda = 400\text{--}500$ нм на 7,3 мкмоль/(м²·с); $\Delta\lambda = 500\text{--}600$ нм на 171 мкмоль/(м²·с); $\Delta\lambda = 600\text{--}700$ нм на 151,6 мкмоль/(м²·с); $\Delta\lambda = 700\text{--}800$ нм на 19,5 мкмоль/(м²·с). В режиме 3 значение PPFД держится в допустимых пределах во всем исследуемом диапазоне, однако снижается в $\Delta\lambda = 500\text{--}600$ нм на 56 мкмоль/(м²·с). Полученные результаты позволяют сделать вывод о невозможности применения на практике режимов работы облучателя при напряжении 198 и 242 В.

В режиме 2 значение PPFД стабильно во всем исследуемом диапазоне, что делает этот режим наиболее рациональным для практического применения в технологических схемах облучения с разделением энергетических потоков в светокультуре промышленных теплиц. Важным преимуществом этого режима является увеличение доли PPFД в «синей» области излучения ($\Delta\lambda = 400\text{--}500$ нм), по сравнению с номинальным режимом, в 1,9 раза: с 25 до 47 мкмоль/(м²·с). Данное обстоятельство позволяет сделать вывод

⁶ ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М. : ФГУП «Стандартинформ». 2014. 19 с. URL: https://cenerg.ru/files/Norm_lab/gost-32144-2013.pdf (дата обращения: 10.09.2022).



Р и с. 3. Изменение распределения PPFD в зависимости от U_{06} и T_B :
 a) $U_{061} = 198 \text{ V}$ (режим 1); b) $U_{062} = 220 \text{ V}$ (режим 2); c) $U_{063} = 242 \text{ V}$ (режим 3)
 F i g. 3. Change in PPFD distribution depending on the U_{06} and T_B :
 a) $U_{061} = 198 \text{ V}$ (mode 1); b) $U_{062} = 220 \text{ V}$ (mode 2); c) $U_{063} = 242 \text{ V}$ (mode 3)



Р и с. 4. Графики усредненных значений PPFD в исследуемых режимах
 F i g. 4. Graphs of averaged PPFD values in the studied modes

о повышении эффективности излучения исследуемой лампы без внесения изменений в конструкцию самой лампы, что является новым способом, в отличие от известных⁷.

Полученные данные являются основанием для определения качественного влияния изменения распределения PPFD в среднем на эффективность процесса облучения с учетом спектра действия фотосинтеза по К. Дж. Маккри, а также функции спектрального распределения интенсивности рассеянного солнечного излучения.

Для оценки спектральных характеристик источника оптического излучения на основе процентного распределения в спектральных участках ФАР используем методику, изложенную в другом исследовании⁸. Расчет производили для двух режимов: номинальный режим и режим 2.

Условное представление усредненной спектральной плотности оптического излучения исследуемой лампы SON-T 1000 W E40 в номинальном режиме и режиме 2 приведено на рисунке 5. Новым, в отличие от известной методики, является то, что оценка проводится не по

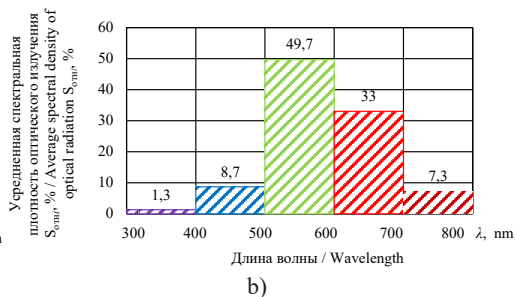
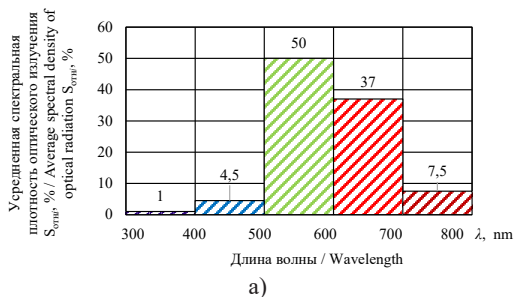
трем спектральным диапазонам, учитывая только ФАР, а по пяти, с учетом физиологического воздействия.

Расчет относительного спектрального распределения, с учетом физиологического воздействия, произведем по формуле (1):

$$\sum_{300}^{800} S_{\text{отн}} K_{\phi}(\lambda_i) = S_{\text{отн1}} K_{\phi}(\lambda_1) + S_{\text{отн2}} K_{\phi}(\lambda_2) + S_{\text{отн3}} K_{\phi}(\lambda_3) + \dots + S_{\text{отн4}} K_{\phi}(\lambda_4) + S_{\text{отн5}} K_{\phi}(\lambda_5), \quad (1)$$

$K_{\phi}(\lambda_i)$ – функция спектральной фотосинтетической эффективности излучения; λ_i – условные характерные длины волн, существенные для основных процессов в растениях.

Приближенно можно принять, учитывая спектр действия фотосинтеза по К. Дж. Маккри [22], $K_{\phi}(\lambda_1) = 0,4$; $K_{\phi}(\lambda_2) = 0,55$; $K_{\phi}(\lambda_3) = 0,75$; $K_{\phi}(\lambda_4) = 1$; $K_{\phi}(\lambda_5) = 0,3$ при $\lambda_1 = 320$ нм; $\lambda_2 = 445$ нм; $\lambda_3 = 570$ нм; $\lambda_4 = 680$ нм; $\lambda_5 = 760$ нм. Учитывая функцию спектрального распределения интенсивности рассеянного солнечного излучения⁹,



Р и с. 5. Условное представление усредненной спектральной плотности оптического излучения лампы SON-T 1000 W E40: а) в номинальном режиме; б) в режиме 2

Fig. 5. Conditional representation of the averaged spectral density of optical radiation of the SON-T 1000 W E40 lamp: a) in nominal mode; b) in mode 2

⁷ Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю. Б. Айзенберга, Г. В. Бооса. 4-е изд. перераб. и доп. М., 2019. 892 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26707983> (дата обращения: 10.09.2022); Рохлин Г. Н. Разрядные источники света. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1991. 720 с.

⁸ Цугленок Н. В., Долгих П. П., Кунгс Я. А. Энергетическое оборудование тепличных хозяйств. Красноярск: КрасГАУ, 2001. 139 с.

⁹ Справочная книга по светотехнике...

$K_{\phi}(\lambda_1) = 0,4$; $K_{\phi}(\lambda_2) = 0,65$; $K_{\phi}(\lambda_3) = 0,8$; $K_{\phi}(\lambda_4) = 0,7$; $K_{\phi}(\lambda_5) = 0,6$ при $\lambda_1 = 380$ нм; $\lambda_2 = 420$ нм; $\lambda_3 = 540$ нм; $\lambda_4 = 680$ нм; $\lambda_5 = 740$ нм.

На рисунке 6 представлены графические зависимости, построенные по данным, полученным по формуле (1), с учетом физиологического воздействия излучения лампы в исследуемых режимах.

Из рисунка 6 видно, что за счет смещения относительного спектрального распределения эффективность физиологического воздействия излучения от лампы в режиме 2, в сравнении с номинальным режимом, изменяется незначительно. Так, при обоих режимах работы при оценке физиологического воздействия по кривой К. Дж. Маккри эффективность составляет около 78–80 %. При оценке эффективности рассматриваемой технологической схемы с учетом функции спектрального распределения интенсивности рассеянного солнечного излучения значение относительного спектрального распределения составляет около 74 % в обоих режимах.

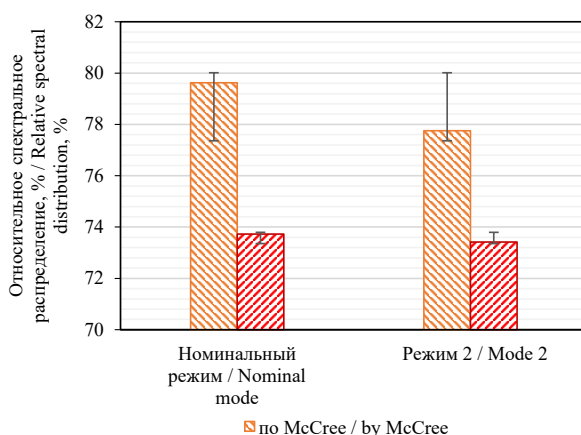
Обсуждение и заключение

Полученные результаты позволяют сделать выводы о возможности практического применения технологической

схемы облучения с разделением энергетических потоков в светокультуре промышленных теплиц. В ходе исследования было установлено, что снижение тепловой нагрузки на источнике излучения воздушным принудительным способом позволит обеспечить промышленные теплицы низкопотенциальной экологически чистой тепловой энергией с температурой теплоносителя 43–47 °С, одновременно не искажая в целом спектральную составляющую излучения облучательной установки при напряжении 220 В, получая дополнительное преимущество в виде увеличения доли «синей» составляющей в общем спектре излучения лампы.

Произведенная оценка физиологического воздействия, с учетом спектра действия фотосинтеза по К. Дж. Маккри и функции спектрального распределения интенсивности рассеянного солнечного излучения, подтвердила гипотезу о применимости разрабатываемых способов облучения с разделением энергетических потоков от облучателя для повышения энергоэкологичности светокультуры.

В дальнейшем разработка и применение рациональных режимов и схем работы тепличных облучателей может



Р и с. 6. Относительное спектральное распределение
F i g. 6. Relative spectral distribution

стать основой для обеспечения тепличного производства дополнительной альтернативной энергией. Стабилизация режимов работы сети с одновременным регулированием температуры теплоносителя при воздушном способе отвода тепловой нагрузки является еще одним способом управления спектральными характеристиками источника

излучения, а вместе с этим и ростовыми процессами растений. Снижение температуры элементов тепличного облучателя позволит более рационально распределять энергетический поток в пространстве, а также создавать дополнительный поток тепловой энергии, необходимый для отопления промышленных теплиц.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гулин С. В., Пиркин А. Г. Оценка влияния нестабильности питающего напряжения на эффективность функционирования облучательных установок в сооружениях защищенного грунта // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2015. № 40. С. 256–261. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24853415> (дата обращения: 10.09.2022).
2. Гулин С. В., Карпов В. Н., Карлин В. И. О работе разрядных ламп с регулируемым питанием в селекционных установках // Светотехника. 1986. № 6. С. 11–13. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29267226> (дата обращения: 10.09.2022).
3. Аюпов М. Р., Ракутько С. А. О возможности коррекции спектра натриевой лампы с помощью светодиодного источника под требования светокультуры // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2018. № 1. С. 5–13. URL: <https://clck.ru/32djen> (дата обращения: 10.09.2022).
4. Долгих П. П., Самойлов М. В. Расширение функций облучательных установок при использовании в системе регулирования микроклимата теплиц // Вестник ИрГСХА. 2016. № 72. С. 130–138. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27422680> (дата обращения: 10.09.2022).
5. Долгих П. П., Доценко Д. С. Оценка эффективности тепличного облучателя с принудительным охлаждением // Вестник НГИЭИ. 2018. № 10. С. 29–44. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36386537> (дата обращения: 10.09.2022).
6. Dolgikh P. P., Parshukov D. V., Shaporova Z. E. Technology for Managing Thermal Energy Flows in Industrial Greenhouses [Электронный ресурс] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 537, Issue 6. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/6/062041>
7. Kozai T., Niu G., Takagaki M. Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production. 2nd ed. Academic press, 2020. 516 p. doi: <https://doi.org/10.1016/C2018-0-00969-X>
8. Энергоэкология светокультуры – новое междисциплинарное научное направление / С. А. Ракутько [и др.] // АгроЭкоИнженерия. 2016. № 90. С. 14–27. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27530042> (дата обращения: 10.09.2022).
9. Ракутько С. А. Энергоэкологические основы наилучших доступных технологий светокультуры // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2019. № 1. С. 44–60. URL: <https://clck.ru/32dnLp> (дата обращения: 10.09.2022).
10. Ракутько С. А. Энергоэкологичность как свойство искусственной биоэнергетической системы светокультуры // АгроЭкоИнженерия. 2018. № 2. С. 78–89. doi: <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10121>
11. Anpo M., Fukuda H., Wada T. Plant Factory Using Artificial Light: Adapting to Environmental Disruption and Clues to Agricultural Innovation. Amsterdam : Elsevier, 2018. 434 p. doi: <https://doi.org/10.1016/C2017-0-00580-3>
12. Meng X., Xing T., Wang X. The Role of Light in the Regulation of Anthocyanin Accumulation in Gerbera Hybrida // Plant Growth Regulation. 2004. Vol. 44. P. 243–250. doi: <https://doi.org/10.1007/s10725-004-4454-6>
13. Zhen S., Van Iersel M. W. Far-Red Light Is Needed for Efficient Photochemistry and Photosynthesis // Journal of Plant Physiology. 2017. Vol. 209. P. 115–122. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jplph.2016.12.004>

14. Finding the Optimal Growth-Light Spectrum for Greenhouse Crops / S. W. Hogewoning [et al.] // ISHS Acta Horticulturae 956: VII International Symposium on Light in Horticultural Systems. 2012. Vol. 956. P. 357–363. doi: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.956.41>
15. Plant Responses to Red and Far-Red Lights, Applications in Horticulture / S. Demotes-Mainard [et al.] // Environmental and Experimental Botany. 2016. Vol. 121. P. 4–21. doi: <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2015.05.010>
16. Park Y., Runkle E. S. Far-Red Radiation Promotes Growth of Seedlings by Increasing Leaf Expansion and Whole-Plant Net Assimilation // Environmental and Experimental Botany. 2017. Vol. 136. P. 41–49. doi: <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2016.12.013>
17. Wang Y., Folta K. M. Contributions of Green Light to Plant Growth and Development // American Journal of Botany. 2013. Vol. 100, Issue 1. P. 70–78. doi: <http://dx.doi.org/10.3732/ajb.1200354>
18. Reversal by Green Light of Blue Light-Stimulated Stomatal Opening in Intact, Attached Leaves of Arabidopsis Operates Only in the Potassium-Dependent, Morning Phase of Movement / L. D. Talbott [et al.] // Plant Cell Physiol. 2006. Vol. 47, Issue 3. P. 332–339. doi: <https://doi.org/10.1093/pcp/pci249>
19. Folta K. M., Maruhnich S. A. Green Light: a Signal to Slow Down or Stop // Journal of Experimental Botany. 2007. Vol. 58, Issue 58. P. 3099–3111. doi: <https://doi.org/10.1093/jxb/erm130>
20. Bantis F., Ouzounis T., Radoglou K. Artificial LED Lighting Enhances Growth Characteristics and Total Phenolic Content of Ocimum Basilicum, but Variably Affects Transplant Success // Scientia Horticulturae. 2016. Vol. 198. P. 277–283. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2015.11.014>
21. The Effects of Different UV-B Radiation Intensities on Morphological and Biochemical Characteristics in Ocimum Basilicum L. / J. Sakalauskaite [et al.] // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2013. Vol. 93. P. 1266–1271. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.5879>
22. McCree K. J. The Action Spectrum, Absorbance and Quantum Yield of Photosynthesis in Crop Plants // Agricultural Meteorology. 1972. Vol. 9. P. 192–216. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0002-1571\(71\)90022-7](http://dx.doi.org/10.1016/0002-1571(71)90022-7)

Поступила 12.09.2022; одобрена после рецензирования 13.10.2022; принята к публикации 03.11.2022

Об авторе:

Долгих Павел Павлович, доцент кафедры системознергетики Института инженерных систем и энергетики Красноярского государственного аграрного университета (660049, Российская Федерация, г. Красноярск, пр-т Мира, д. 90), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3443-5726>, Researcher ID: GRJ-9791-2022, dpp10@yandex.ru

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Gulin S.V., Pirkin A.G. Assessing the Impact of Unstable Voltage on the Performance of the Irradiation Facilities in Buildings Protected Ground. *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University*. 2015;(40):256–261. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24853415> (accessed 10.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
2. Gulin S.V., Karpov V.N., Karlin V.I. [On the Operation of Discharge Lamps with Regulated Power Supply in Breeding Facilities]. *Svetotekhnika*. 1986;(6):11–13. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29267226> (accessed 10.09.2022). (In Russ.)
3. Ayupov M.R., Rakutko S.A. O Led-Based Correction of Sodium Lamp Light Quality for Indoor Plant Lighting Demands. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2018;(1):5–13. Available at: <https://clck.ru/32djcn> (accessed 10.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
4. Dolgikh P.P., Samoilov M.V. Function Enhancement of Irradiation Facility for Using in Microclimate Regulation System of Greenhouses. *Vestnik IRGSHA*. 2016;(72):130–138. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27422680> (accessed 10.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
5. Dolgikh P.P., Dotsenko D.S. Evaluation of the Effectiveness of a Hothouse Irradiator with Forced Cooling. *Vestnik NGIEI*. 2018;(10):29–44. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36386537> (accessed 10.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

Electrical technologies and equipment

6. Dolgikh P.P., Parshukov D.V., Shaporova Z.E. Technology for Managing Thermal Energy Flows in Industrial Greenhouses. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;537(6). doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/6/062041>
7. Kozai T., Niu G., Takagaki M. Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production. 2nd ed. Academic press; 2020. 516 p. doi: <https://doi.org/10.1016/C2018-0-00969-X>
8. Rakutko S.A., Markova A.E., Mishanov A.P., Rakutko E.N. Energy and Ecological Efficiency of Indoor Plant Lighting as a New Interdisciplinary Research Area. *AgroEkoInzheneriya*. 2016;(90):14–27. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27530042> (accessed 10.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
9. Rakutko S.A. Energy and Ecological Basis of Best Available Techniques of Plant Lighting. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktivii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2019;(1):44–60. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27530042> (accessed 10.09.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
10. Rakutko S.A. Energy and Ecological Basis of Best Available Techniques of Plant Lighting. *AgroEkoInzheneriya*. 2018;(2):78–89. doi: <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10121>
11. Anpo M., Fukuda H., Wada T. Plant Factory Using Artificial Light: Adapting to Environmental Disruption and Clues to Agricultural Innovation. Amsterdam: Elsevier; 2018. 434 p. doi: <https://doi.org/10.1016/C2017-0-00580-3>
12. Meng X., Xing T., Wang X. The Role of Light in the Regulation of Anthocyanin Accumulation in Gerbera Hybrida. *Plant Growth Regulation*. 2004;44:243–250. doi: <https://doi.org/10.1007/s10725-004-4454-6>
13. Zhen S., Van Iersel M.W. Far-Red Light Is Needed for Efficient Photochemistry and Photosynthesis. *Journal of Plant Physiology*. 2017;209:115–122. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jplph.2016.12.004>
14. Hogewoning S.W., Trouwborst G., Meinen E., van Ieperen W. Finding the Optimal Growth-Light Spectrum for Greenhouse Crops. In: ISHS Acta Horticulturae 956: VII International Symposium on Light in Horticultural Systems. 2012. Vol. 956. p. 357–363. doi: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.956.41>
15. Demotes-Mainard S., Péron T., Corot A., et al. Plant Responses to Red and Far-Red Lights, Applications in Horticulture. *Environmental and Experimental Botany*. 2016;121:4–21. doi: <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2015.05.010>
16. Park Y., Runkle E.S. Far-Red Radiation Promotes Growth of Seedlings by Increasing Leaf Expansion and Whole-Plant Net Assimilation. *Environmental and Experimental Botany*. 2017;136:41–49. doi: <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2016.12.013>
17. Wang Y., Folta K.M. Contributions of Green Light to Plant Growth and Development. *American Journal of Botany*. 2013;100(1):70–78. doi: <http://dx.doi.org/10.3732/ajb.1200354>
18. Talbott L.D., Hammad J.W., Harn L.C., et al. Reversal by Green Light of Blue Light-Stimulated Stomatal Opening in Intact, Attached Leaves of Arabidopsis Operates Only in the Potassium-Dependent, Morning Phase of Movement. *Plant Cell Physiol*. 2006;47(3):332–339. doi: <https://doi.org/10.1093/pcp/pci249>
19. Folta K.M., Maruhnich S.A. Green Light: a Signal to Slow Down or Stop. *Journal of Experimental Botany*. 2007;58(58):3099–3111. doi: <https://doi.org/10.1093/jxb/erm130>
20. Bantis F., Ouzounis T., Radoglou K. Artificial LED Lighting Enhances Growth Characteristics and Total Phenolic Content of Ocimum Basilicum, but Variably Affects Transplant Success. *Scientia Horticulturae*. 2016;198:277–283. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2015.11.014>
21. Sakalauskaite J., Viskelis P., Dambrauskienė E., et al. The Effects of Different UV-B Radiation Intensities on Morphological and Biochemical Characteristics in Ocimum Basilicum L. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2013;93:1266–1271. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/jsfa.5879>
22. McCree K.J. The Action Spectrum, Absorbance and Quantum Yield of Photosynthesis in Crop Plants. *Agricultural Meteorology*. 1972;9:192–216. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0002-1571\(71\)90022-7](http://dx.doi.org/10.1016/0002-1571(71)90022-7)

Submitted 12.09.2022; approved after reviewing 13.10.2022; accepted for publication 03.11.2022

About the author:

Pavel P. Dolgikh, Associate Professor of the Chair of Systems Power Engineering, Institute of Engineering Systems and Power Engineering, Krasnoyarsk State Agrarian University (90 Prospekt Mira, Krasnoyarsk 660049, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3443-5726>, Researcher ID: GRJ-9791-2022, dpp10@yandex.ru

The author has read and approved the final manuscript.