УДК 631.544.45:628.8:628.9.041.9 DOI: 10.17238/issn2071-2243.2019.4.64

# РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ВЕГЕТАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ С УЧЕТОМ РАДИАЦИОННОГО РЕЖИМА LED-ФИТОИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

#### Павел Павлович Долгих Мухаммадикбол Хабибджонович Сангинов

Красноярский государственный аграрный университет

Высокие энергетические издержки в сооружениях защишенного грунта требуют внедрения энергосберегающих технологий. Как показывают мировые тенденции в области светотехники, для вегетационных установок предпочтение в настоящее время отдается светодиодным излучающим модулям. Целью работы являлось исследование теплового режима LED-фитоизлучателей и учет его при разработке стратегии выращивания зеленных овошных культур в вегетационных установках. В работе применялись специально сконструированные облучательные приборы с системами пассивного охлаждения на основе алюминиевых радиаторов. Опыт с двумя типами LED-фитоизлучателей, обеспечивающих облученность 150 мкмоль/(м<sup>2</sup> с), проводился в вегетационной установке, состоящей из двух блоков размерами 800 × 850 × 1000 мм. Облучатели мощностью 92 и 94 Вт обеспечивали удельную установленную тепловую мощность соответственно 134 и 136 Вт/м<sup>2</sup>. Проведенные исследования теплового режима LED-фитоизлучателей позволили установить, что значения их тепловыделения могут рассчитываться по установочной мощности. Доказано, что рабочая температура нагрева облучателей 68 ± 2°С, достигаемая в условиях вегетационной установки в течение 27 минут, позволяет обеспечить количество тепловой энергии, достаточной для выращивания зеленных овощных культур при температуре 20 ± 2°C в блоке вегетационной установки. Для реализации полученных результатов на практике была предложена конструкция вегетационной установки для проведения экспериментальных исследований по разработке технологии эффективного облучения. Новизна установки заключается в том, что каждый источник облучения дополнительно снабжен датчиком температуры, соединенным посредством системы управления с вентилятором с воздуховодом, а датчик влажности установлен в каждом отсеке для выращивания и соединен посредством системы управления с насосом со шлангом и капельницами. КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сельскохозяйственные постройки, вегетационная установка, LED-фитоизлучатель, удельная установленная тепловая мощность, датчик температуры, энергоэффективность.

## DEVELOPMENT OF DESIGN OF VEGETATION UNIT TAKING INTO ACCOUNT THE RADIATION REGIME OF LED-BASED PHYTOEMITTERS

#### Pavel P. Dolgikh Muhammadikbol Kh. Sanginov

Krasnoyarsk State Agrarian University

High energy costs in protected ground facilities require the implementation of energy-saving technologies. Global trends in the field of lighting show that LED emitting modules are currently preferred for growing plants. The objective of this work was to study the thermal regime of LED-based phytoemitters and take it into account to develop a strategy for growing leaf vegetables in vegetation units. For this purpose the authors used specially designed irradiation devices with passive cooling systems based on aluminum radiators. The experiment with two types of LED-based phytoemitters providing the exposure of 150 µmol/(m<sup>2</sup> s) was carried out in a vegetation unit consisting of two blocks with the dimensions of 800 × 850 × 1000 mm. The irradiators with 92 and 94 W of power provided a specific installed thermal power of 134 and 136 W/m<sup>2</sup>, respectively. The conducted studies of the thermal regime of LED-based phytoemitters allowed establishing that the values of their heat release could be calculated from the installed power. It is proved that the operating temperature of heating of irradiators (68  $\pm$  2°C) is achieved within 27 minutes in the conditions of the vegetation unit and provides the amount of thermal energy sufficient for growing leaf vegetables at the temperature of 20 ± 2°C in the vegetation unit. In order to implement the obtained results in practice the authors have proposed a design of a vegetation unit for experimental studies on the development of efficient irradiation technology. The novelty of the unit is that each radiation source is additionally equipped with a temperature sensor connected via the control system to a fan with an air duct; a humidity sensor is also installed in each growing compartment and connected via the control system to a pump with a hose and drippers.

KEYWORDS: agricultural buildings, vegetation unit, LED-based phytoemitter, specific installed thermal power, temperature sensor, energy efficiency.

## ведение

В Суммарные издержки тепличных хозяйств на электричество и тепло составляют в среднем не менее 50 процентов всех расходов. В некоторых теплицах доля затрат на электрическую и тепловую энергию может доходить до двух третей от общего объема расходов [1].

Тепличное производство является энергоемкой отраслью, поэтому вопросы снижения энергоемкости и внедрения энергосберегающих технологий на тепличных предприятиях являются актуальными и стоят более остро, чем в других отраслях агропромышленного комплекса. Это обстоятельство предопределяет необходимость поиска альтернативных и более дешевых источников энергии для данных целей [5]. Но если тепловую энергию можно эффективно получить без использования электрической энергии (например, применение газовых инфракрасных излучателей), то энергию фотосинтетического фотонного потока в искусственных условиях выращивания можно получать лишь с помощью электрических источников излучения [8].

В научно-технической литературе описаны пять различных стратегий управления системами облучения в теплицах, из которых оптимальной является стратегия использования тепла системы облучения [9]. Суть этой стратегии заключается в том, что облучение включается всякий раз, когда в теплицах есть потребность в обогреве. Возможная продолжительность облучения также зависит в этом случае от установленной электрической мощности облучателей.

В России и за рубежом накоплен достаточный опыт разработки и применения конструкций облучательных установок, позволяющих значительно расширить их функциональные возможности путем использования тепловой энергии от облучателей в системе обогрева теплиц [10–17]. Таким образом, в распоряжении тепличных комбинатов появляется возможность снизить удельную установленную мощность системы обогрева.

Как показывают мировые тенденции в области светотехники для вегетационных установок [11, 13, 15, 17], предпочтение в настоящее время отдается светодиодным излучающим модулям.

Согласно [6] бытовые тепловыделения для систем освещения рассчитываются по установочной мощности с учетом рабочих часов в неделю, а по [2] для систем облучения в теплицах коэффициент преобразования электрической энергии в тепловую равен 0,92 для облучателей с натриевыми лампами и 0,94 – с металлогалогенными. Для LED-фитоизлучателей такие данные в литературе отсутствуют.

Целью проведенного исследования являлось изучение теплового режима LED-фитоизлучателей и учет его особенностей при разработке стратегии выращивания зеленых овощных культур в вегетационных установках.

## Материалы и методы

Эксперименты по определению температуры теплового режима проводили с использованием двух LED-фитоизлучателей (рис. 1, 2).

На рисунке 1 представлен LED-фитоизлучатель, установленный в блоке № 1 вегетационной установки, на рисунке 2 – в блоке № 2.

LED-фитоизлучатель (рис. 1) представляет собой жесткую конструкцию из алюминиевого профиля 1 БПО-2595, с линзой из боросиликатного стекла 2 диаметром 100 мм с глубокой кривой силы света класса ( $\Gamma$ ) – 60°, резонансным источником тока 3 на 100 Вт, LED-модулем 4 и хомутом для крепления 5. Мощность облучателя P = 94 Вт. Масса – 2,45 кг.

LED-фитоизлучатель (рис. 2) представляет собой жесткую конструкцию из алюминиевого профиля 1 БПО 3248 с оребрением 2, выполняющим функцию отвода тепла (радиатора). По торцам профиля имеются пластиковые заглушки 3. Светодиодный модуль представлен шестью пластинами со светодиодами 4, закрепленными с помощью термопасты к основанию алюминиевого профиля 1 и закрытыми защитным стеклом 5. Управление работой светодиодного модуля 4 осуществляется LED-драйвером 6. Крепление облучателя обеспечивается с помощью подвижного узла подвеса 7. Мощность облучателя P = 92 BT.



Рис. 1. LED-фитоизлучатель, установленный в блоке № 1 вегетационной установки: *a*) – вид спереди; *б*) – вид снизу; *в*) – вид сбоку; *г*) – вид сверху



Рис. 2. LED-фитоизлучатель, установленный в блоке № 2 вегетационной установки: *a*) – вид спереди; *б*) – вид снизу; *в*) – вид сбоку; *г*) – вид сверху

Представленные на рисунках 1 и 2 LED-фитоизлучатели изготовлены авторами для использования в вегетационной установке по одному в каждом блоке (рис. 3), имеют размеры  $800 \times 850 \times 1000$  мм (Д × Ш × В) и обеспечивают облученность E = 150 мкмоль/(м<sup>2</sup>·c) при высоте подвеса h = 0,6 м.

## ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

Вегетационная установка расположена в неотапливаемом подвальном помещении с температурой окружающей среды  $10 \pm 2^{\circ}$ С и предназначена для выращивания зеленных культур (салат) при температуре  $20 \pm 2^{\circ}$ С в дневное время и  $10 \pm 2^{\circ}$ С – в ночное [4].



Рис. 3. Вегетационная установка с облучателями в работе: а) – блок № 1; б) – блок № 2

Измерения температуры поверхности радиатора (корпуса) проводились гигрометром CENTER 311 с термопарой. Температура отслеживалась через каждые 5 минут от момента включения в сеть до установившегося режима, характеризующегося стабильной температурой радиатора. Далее LED-фитоизлучатель отключался от сети, и температура также измерялась через каждые 5 минут до установившегося значения.

## Результаты и их обсуждение

На рисунке 4 показаны кривые нагрева и охлаждения для LED-фитоизлучателей. Из графиков видно, что среднее значение температуры при переходном режиме для облучателя в блоке 1 составит 45°C, для облучателя в блоке 2 – 42°C. Время выхода на рабочий режим составляет в обоих случаях 27 минут. Максимальная температура рабочего режима для облучателя в первом блоке – 67°C, во втором – 70°C.





Определяли количество тепловой энергии, Вт·ч, поступающей в вегетационную камеру от LED-фитоизлучателя отдельно по блокам [7]. Исходные данные и результаты представлены в таблице 1.

$$Q = -\alpha \frac{\partial t}{\partial n} F \tau, \tag{1}$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

 $\frac{\partial t}{\partial n}$  – градиент температуры, °C;

F – площадь изотермической поверхности, м<sup>2</sup>;

 $\tau$  – промежуток времени, ч.

При расчете *F* принимаем, что оба LED-фитоизлучателя имеют форму, близкую к параллелепипеду.

Показатель	LED- фитоизлучатель для блока № 1	LED- фитоизлучатель для блока № 2
Размеры (Д × Ш × В), мм	150 × 113 × 120	460 × 120 × 70
Продолжительность работы облучателя в сутки, т, ч.	16	16
Средняя температура LED-фитоизлучателя за период работы с учетом переходных режимов, <i>t</i> , °C	66	69
Коэффициент теплопроводности, α, Вт/(м·К)	210	210
Количество тепловой энергии от одного LED-фитоизлучателя, Q, Вт·ч	92,8	91,2
Удельная установленная тепловая мощность, q <sub>yð</sub> , Вт/м <sup>2</sup>	136	134
Количество тепловой энергии за 16 часов работы, Q <sub>16</sub> , Вт·ч	1485	1459

Таблица 1.	Исходные данные	для расчета	и результаты
------------	-----------------	-------------	--------------

Из таблицы 1 видно, что общее количество тепловой энергии, поступающей от LED-фитоизлучателей, за 16 часов работы в сутки составит 2944 Вт·ч.

Тепловой баланс вегетационной установки рассчитывали по уравнению [3]

$$\Phi_{om} = \Phi_{op} + \Phi_{BeHm} + \Phi_{p}, \qquad (2)$$

где  $\Phi_{orp}$  – тепловой поток, теряемый через ограждения культивационного помещения, Вт;

 $\Phi_{\text{вент}}$  – тепловой поток, теряемый на естественную вентиляцию, Вт;

 $\Phi_{cp}$  – тепловой поток, теряемый в грунт, Вт.

При расчетах учитываем общий объем всей вегетационной установки (оба бло-ка). Результаты расчета представлены в таблице 2.

Показатель	Значение
Тепловой поток, теряемый через ограждения культивационного помещения, Ф <sub>огр</sub> , Вт	62
Тепловой поток, теряемый на естественную вентиляцию, ${\pmb \phi}_{\!\scriptscriptstyle \! \! \! eem}$ , Вт	9,3
Тепловой поток, теряемый в окружающий грунт, ${\pmb \sigma}_{\! e\! p}$ , Вт	2,1
Тепловой поток на обогрев культивационного помещения, $\pmb{\Phi}_{om}$ , Вт	73,4
Количество тепловой энергии на обогрев культивационного сооружения за 16 часов эксплуатации, Q <sub>от16</sub> , Вт·ч	1174

### Таблица 2. Результаты расчета энергетических показателей

Из таблицы 2 следует, что за 16 часов эксплуатации количество тепловой энергии, необходимой для поддержания температуры 20°С внутри вегетационной установки, составит 1174 Вт. Очевидно, что в ночное время дополнительный обогрев вегетационной установки не потребуется, так как температура помещения, где расположена вегетационная установка, и температура, необходимая для выращивания салата, в ночное время совпадают и тепловой баланс равен нулю.

Таким образом, излишки тепловой энергии могут определяться как разность между общим количеством тепловой энергии, поступающей от LED-фитоизлучателей, и количеством тепловой энергии, необходимой для поддержания требуемой температуры внутри вегетационной установки, и составят 1770 Вт.ч.

В результате для реализации полученных данных на практике была предложена конструкция вегетационной установки для проведения экспериментальных исследований по определению технологии эффективного облучения (рис. 5).



Рис. 5. Вегетационная установка для проведения экспериментальных исследований по определению технологии эффективного облучения: 1 – отсеки для выращивания; 2 – дверцы; 3 – ручки; 4 – посевные поддоны; 5 – рассадные кассеты; 6 – емкости с культурой; 7 – капельницы; 8 – насос; 9 – водонагреватель; 10 – емкость с питательным раствором; 11 – шланг; 12 – баллон с углекислым газом; 13 – газопровод; 14 – форсунки; 15 – штанг; 16 – источники облучения; 17 – вентилятор; 18 – воздуховод; 19 – отверстия для вентиляции; 20 – датчик температуры; 21 – датчик влажности; 22 – система управления

Вегетационная установка функционирует следующим образом.

В начальный момент времени ручки 3 дверцы 2 опускаются вниз и отсеки для выращивания 1 закрываются. При включении источников облучения 16 генерируется лучистый поток, часть которого в виде фотосинтетически активной радиации (ФАР) поступает к емкостям с культурой 6, а другая часть в виде тепловой энергии накапливается в отсеках для выращивания 1. В это же самое время система управления 22 включает подачу углекислого газа (СО<sub>2</sub>) из баллона 12 по газопроводу 13 с форсунками 14 в отсеки для выращивания 1. Протекает световая фаза фотосинтеза. Постепенно источ-

ники облучения 16 нагреваются (рис. 4), тепловая энергия создает повышенную температуру, и включается в работу датчик температуры 20, подающий сигнал через систему управления 22 на вентилятор 17, который нагнетает приточный воздух по воздуховоду 18, распределяющийся по отсекам для выращивания 1 с помощью отверстий для вентиляции 19. Движение приточного воздуха создает условия для интенсивного испарения влаги внутри отсеков для выращивания 1, что, в свою очередь, является сигналом для датчика влажности 21, который подает сигнал через систему управления 22 на насос 8, и подогретый водонагревателем 9 питательный раствор из емкости 10 посредством шланга 11 подается по капельницам 7 в посевные поддоны с рассадными кассетами 5 и емкостями с культурой 6. Происходит полив. В это время датчик температуры 20, охлажденный приточным воздухом, подает сигнал через систему управления 22 на отключение вентилятора 17. При выключении источников облучения 16 через систему управления 22 подается сигнал на отключение подачи углекислого газа из баллона 12, и тепловая энергия перестает поступать, что приводит к снижению температуры в отсеках для выращивания 1. Наступает темновая фаза фотосинтеза. При включении источников облучения 16 процесс повторяется.

Так осуществляется зависимое от облучения регулирование микроклиматических процессов в вегетационной установке и достигается повышение эффективности работы оборудования.

## Выводы

Проведенные исследования теплового режима LED-фитоизлучателей позволили установить следующее.

1. Режим работы LED-фитоизлучателя оказывает существенное влияние на составляющие уравнения теплового баланса вегетационной установки.

2. Тепловыделение может быть рассчитано по установочной мощности.

3. Рабочая температура нагрева облучателей  $68 \pm 2^{\circ}$ С, достигаемая в условиях вегетационной установки в течение 27 минут, позволяет обеспечить количество тепловой энергии, достаточное для выращивания зеленных овощных культур при температуре  $20 \pm 2^{\circ}$ С.

#### Библиографический список

<sup>1.</sup> Долгих П.П. Анализ технологий и оборудования для управления системой микроклимата в теплицах на базе утилизированной тепловой энергии от систем облучения / П.П. Долгих, Н.В. Кулаков, М.В. Самойлов // Вестник НГИЭИ. – 2016. – № 8 (63). – С. 80–94.

<sup>2.</sup> Долгих П.П. Расширение функций облучательных установок при использовании в системе регулирования микроклимата теплиц / П.П. Долгих, М.В. Самойлов // Вестник ИрГСХА. – 2016. – № 72. – С. 130–138.

3. Драганов Б.Х. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве / Б.Х. Драганов, А.В. Кузнецов, С.П. Рудобашта. – Москва : Агропромиздат, 1990. – 132 с.

4. Овощеводство / Г.И. Тараканов, В.Д. Мухин, К.А. Шуин и др. ; под ред. Г.И. Тараканова, В.Д. Мухина. – 2-е изд., перераб., доп. – Москва : КолосС, 2003. – 472 с.

5. Павлов М.В. Разработка моделей тепломассообмена и методов расчета тепловлажностного режима теплицы при лучистом отоплении : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.03 / М.В. Павлов. – Москва, 2018. – 23 с.

6. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 (с Изменением № 1). – Введ. 2013–07–01. Москва : ФАУ «ФЦС», 2012. – 100 с.

7. Теплотехника, отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха : учебник для вузов / В.М. Гусев, Н.И. Ковалев, В.П. Попов, В.А. Потрошков ; под ред. В.М. Гусева. – Ленинград : Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1981. – 343 с.

8. Тихомиров А.А. Светокультура растений: биофизические и биотехнологические основы : учеб. пособие / А.А. Тихомиров, В.П. Шарупич, Г.М. Лисовский. – Новосибирск : Изд-во Сибирского отделения Российской академии наук, 2000. – 213 с.

9. Dolgikh P.P. Technology for managing thermal energy flows in industrial greenhouses / P.P. Dolgikh, D.V. Parshukov, Z.E. Shaporova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Scientific Workshop «Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering MIP: Engineering-2019» within the framework of XXIV International Scientific and Research Open Conference Modern Informatization Problems (Yelm, WA, USA). Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations (Russia, Krasnoyarsk, 04–06 April, 2019). – Institute of Physics and IOP Publishing Ltd, 2019. – Vol. 537, No. 62041. DOI: org/10.1088/1757-899X/537/6/62041.

10. Du J. Simulation model of a greenhouse with a heat-pipe heating system / J. Du, P. Bansal, B. Huang // Applied Energy. – 2012. – Vol. 93. – Pp. 268–276.

11. Gupta S.D. Fundamentals and applications of light-emitting diodes (LEDs) in *in vitro* plant growth and morphogenesis / S.D. Gupta, B. Jatothu // Plant Biotechnology. – 2013. – Vol. 7. – Pp. 211–220. DOI: org/10.1007/s11816-013-0277-0.

12. HydroFarm Radiant Air Cooled Reflector [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.walmart.com/ip/Hydrofarm-Radiant-Reflector-AC-Unit/39403694 (дата обращения: 18.07.2019).

13. LEDs: the future of greenhouse lighting / C.A. Mitchell, A.J. Both, C.M. Bourget, J.F. Burr, C. Kubota, R.G. Lopez, R.C. Morrow, E.S. Runkle // Chronica Horticulturae. – 2012. – Vol. 52. – Pp. 6–10.

14. Morrow R.C. 2008. LED lighting in horticulture / R.C. Morrow // Horticultural Science. - Vol. 43. - Pp. 1947-1950.

15. Olle M. The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality / M. Olle, A. Viršilė // Agricultural and Food Science. – 2013. – Vol. 22, No. 2. – Pp. 223–234.

16. Plant productivity in response to LED lighting / G.D. Massa, H. Kim, R.M. Wheeler, C.A. Mitchell // Horticultural Science. – 2008. – Vol. 43. – Pp. 1951–1956.

17. Sethi V.P. Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications / V.P. Sethi, S.K. Sharma // Solar Energy. – 2008. – Vol. 82. – Pp. 832–859.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Павел Павлович Долгих – кандидат технических наук, доцент кафедры системоэнергетики ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет», Россия, Красноярск, e-mail: dpp10@yandex.ru. Мухаммадикбол Хабибджонович Сангинов – аспирант кафедры системоэнергетики ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет», Россия, Красноярск, e-mail: energy1989@bk.ru.

Дата поступления в редакцию 06.09.2019

Дата принятия к печати 25.10.2019

#### AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Pavel P. Dolgikh, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Systemic Energetics, Krasnoyarsk State Agrarian University, Russia, Krasnoyarsk, e-mail: dpp10@yandex.ru.

Mukhammadikbol Kh. Sanginov, Postgraduate Student, the Dept. of Systemic Energetics, Krasnoyarsk State Agrarian University, Russia, Krasnoyarsk, e-mail: energy1989@bk.ru.

Received September 06, 2019

Accepted after revision October 25, 2019