

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ / ELECTRICAL TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT


УДК 628.993:631.544.4

doi: 10.15507/2658-4123.033.202304.585-598

Оригинальная статья



Разработка светодиодного фитооблучателя для выращивания растений в теплицах

А. А. Калабкин , Е. А. Кузнецов, С. Н. Ивлиев,
А. А. Ашрятов, В. А. Калабкин, А. С. Мусатов
Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет
(г. Саранск, Российская Федерация)

 sskalabkin@yandex.ru

Аннотация

Введение. Одним из ключевых факторов, влияющих на эффективное выращивание растений в теплицах, является освещение. В контексте этой задачи светодиодные фитооблучатели представляют собой перспективное решение, позволяющее точно регулировать параметры света, необходимые для оптимального фотосинтетического процесса.

Цель статьи. Разработать и исследовать светодиодный фитооблучатель с оптимальным спектром и интенсивностью света для обеспечения эффективного роста, развития и фотосинтеза растений в теплицах.

Материалы и методы. Разработка светодиодного фитооблучателя была выполнена в соответствии с нормативными стандартами, которые определяют основные требования в области светотехники для фитоосвещения: ГОСТ Р 57671-2017 и ГОСТ Р 58461-2019. Приведена последовательность этапов разработки, согласно которой осуществлялась разработка данного фитооблучателя.

Результаты исследования. В качестве источника излучения был выбран светодиод Full Spectrum-1 (Китай) с двумя выраженными максимумами излучения 440 нм и 642 нм. Для фитооблучателя был выбран прожекторный корпус, позволяющий точно направлять свет на растения, обеспечивая тем самым максимальную эффективность фотосинтеза и роста. Анализ результатов трассировки лучей в TracePro показал, что модель светодиодного фитооблучателя имеет створораспределение близкое к косинусному типу кривой силы света (далее – КСС). Энергетический поток излучения составил 4,14 Вт, фотосинтетический поток фотонов – 16,6 мкмоль/с.

Обсуждение и заключение. Разработанный светодиодный фитооблучатель имеет величину фотосинтетического потока фотонов, равную 16,2 мкмоль/с при потребляемой мощности 8,8 Вт. Фотосинтетическая эффективность фитооблучателя составила 1,84 мкмоль/Дж. Таким образом, данный фитооблучатель возможно использовать

© Калабкин А. А., Кузнецов Е. А., Ивлиев С. Н., Ашрятов А. А., Калабкин В. А., Мусатов А. С., 2023



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

для эффективного процесса выращивания растений в теплицах, обеспечивая оптимальные условия освещения и способствуя повышению урожайности и качества сельскохозяйственных культур.

Ключевые слова: светодиодный фитооблучатель, мощность, энергетический поток излучения, спектральное распределение излучения, кривая силы света, фотосинтетический поток фотонов

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Разработка светодиодного фитооблучателя для выращивания растений в теплицах / А. А. Калабкин [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 4. С. 585–598. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.585-598>

Original article

The Development of LED Grow Light for Greenhouse Cultivation

A. A. Kalabkin[✉], E. A. Kuznetsov, S. N. Ivliyev, A. A. Ashryatov, V. A. Kalabkin, A. S. Musatov

National Research Mordovia State University
(Saransk, Russian Federation)

[✉] sskalabkin@yandex.ru

Abstract

Introduction. Lighting is one of the key factors influencing the efficient greenhouse cultivation. In this context, LED grow lights are an innovative solution that allows users to precisely adjust the light parameters necessary for optimal photosynthetic processes.

Aim of the Article. The aim of the work is developing and testing the LED grow light with optimal spectrum and light intensity to ensure efficient growth, development and photosynthesis of plants in greenhouses.

Materials and Methods. The LED grow light was developed in accordance with the regulatory standards that define the basic requirements in light technology for plant growth: GOST R 57671-2017 and GOST R 58461-2019. There is presented the sequence of development stages, according to which this grow light was developed.

Results. As the light source, there was chosen the Full Spectrum-1 LED (China) with two prominent emission peaks at 440 nm and 642 nm. For the grow light, a spotlight housing was selected to direct light precisely onto the plants, thereby ensuring maximum efficiency of photosynthesis and growth. The analysis of ray tracing results in TracePro showed that the LED grow light model has a light distribution close to the cosine type. The radiant flux of emission was 4.14 watts, and the photosynthetic photon flux was 16.6 $\mu\text{mol/s}$.

Discussion and Conclusion. The developed LED grow light has a photosynthetic photon flux of 16.2 $\mu\text{mol/s}$ at a power consumption of 8.8 watts. The photosynthetic efficiency of the grow light was 1.84 $\mu\text{mol/J}$. Thus, this grow light can be used for the efficient greenhouse cultivation, providing optimal lighting conditions and contributing to increased crop yield and the quality of agricultural crops.

Keywords: LED grow light, power, radiant flux, spectral emission distribution, light intensity curve, photosynthetic photon flux

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

For citation: Kalabkin A.A., Kuznetsov E.A., Ivliyev S.N., Ashryatov A.A., Kalabkin V.A., Musatov A.S. The Development of LED Grow Light for Greenhouse Cultivation. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(4):585–598. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.585-598>

Введение

Одним из ключевых факторов, влияющих на эффективное выращивание растений в теплицах, является освещение [1]. Свет – это источник энергии, необходимой для фотосинтеза, процесса, который лежит в основе роста и развития растений [2]. В последние десятилетия светодиодные технологии значительно продвинулись и стали одним из наиболее эффективных и энергосберегающих способов обеспечения растений светом с необходимым спектральным составом [3; 4]. Это стало возможным благодаря разработке светодиодных фитооблучателей, которые адаптированы для фотосинтеза и оптимизированы для выращивания растений в тепличных условиях [5; 6].

Спектр излучения светодиодных фитооблучателей представляет собой основополагающий фактор, определяющий эффективность роста и развития растений [7]. Излучение в диапазоне длин волн около 400–500 нм играет важную роль в фотосинтезе, стимулирует образование органических веществ и управляет темпами развития растений. Синее излучение, вызывая образование ингибиторов роста в листьях, замедляет возрастание побегов и способствует формированию низкорослых растений¹.

Излучение в красном диапазоне спектра около 600–700 нм позволяет обеспечить эффективный фотосинтез и достичь высокой продуктивности растений, способствуя увеличению биомассы, ускорению прорастания, цветения и плодоношения.

Современные светодиодные фитооблучатели позволяют обеспечить излучение необходимого спектрального состава с возможностью точного регулирования интенсивности света² [8]. Это позволяет исследователям и агрономам создавать оптимальные условия для разных фаз роста растений, оптимизировать фотосинтетическую активность и повышать урожайность и качество продукции.

Обзор литературы

Основные светотехнические характеристики светодиодных фитооблучателей включают в себя спектральное распределение искусственного излучения, облученность и продолжительность облучения (фотопериод).

Требуемый спектр излучения для выращивания растений можно получить несколькими способами. В одном из исследований [8] осуществляется оценка радиационной среды, формируемой с помощью фитооблучателя на основе узкополосных светодиодов. Спектр излучения фитооблучателя с такими светодиодами представляет собой набор линий излучения, каждая из которых соответствует определенной длине волны. Таким образом, требуемый спектр излучения получается за счет комбинирования излучений узкополосных светодиодов [9; 10]. Интенсивностью узкополосных светодиодов можно управлять по отдельности, что позволяет точно регулировать спектральный состав и интенсивность света, подаваемого на растения. Гибкость в управлении спектром излучения имеет ключевое значение для оптимизации фитооблучения в различных стадиях роста растений и для различных видов культур. Например, в разные периоды роста растений требуется различная комбинация синего и красного света, а также других цветовых диапазонов, чтобы

¹ Справочная книга по светотехнике. М. : Группа компаний Море, 2019. 892 с. URL: http://krispen.ru/knigi/ajzenberg_01.pdf (дата обращения: 01.08.2023).

² Богомолов С. С., Вендин С. В. Влияние излучения светодиодов узкополосного спектра на рост растений // Материалы XXV Международной научно-производственной конференции «Роль науки в удвоении валового регионального продукта». 2021. С. 69. URL: <https://bsaa.edu.ru/upload/Том 1 ППС конференция.pdf#page=69> (дата обращения: 01.08.2023).

стимулировать определенные физиологические процессы: фотосинтез, цветение и формирование плодов [11].

Другой способ получения требуемого спектра излучения заключается в использовании светодиода на основе кристалла синего излучения и красного люминофора. Коротковолновое синее излучение светодиода (в интервале от 400 нм до 480 нм) попадает на люминофор, после чего преобразуется в длинноволновое с максимумом излучения в интервале от 620 нм до 700 нм [12]. Также использование светодиодов с люминофором дешевле, чем использование нескольких узкополосных светодиодов. Однако такая технология имеет ряд недостатков:

- снижение эффективности в области ФАР в результате преобразования света в слое люминофора;

- сложность равномерного нанесения слоя люминофора на поверхность кристалла, что приводит к неравномерному излучению света;

- с течением времени и под воздействием излучения кристалла светодиода происходит деградация люминофора, что приводит к снижению качественных светотехнических параметров светодиода [13].

Фотосинтетическая эффективность современных светодиодных фитооблучателей превышает уровень традиционных натриевых [14]. Согласно данным [15], фотосинтетическая эффективность натриевых ламп низкого давления в трубчатых колбах составляет от 1,7 до 2,1 мкмоль/Дж. В тоже время фотосинтетическая эффективность квазимонохроматических светодиодов ведущих производителей составляет от 0,6 мкмоль/Дж до 3,18 мкмоль/Дж. Это достигается благодаря тому, что светодиоды предоставляют оптимальный спектральный состав излучения, который максимально соответствует потребностям растений в различных фазах их жизненного цикла. В сравнении с натриевыми лампами, светодиодные фитооблучатели более эффективны в использовании энергии, что снижает затраты на освещение и содействует экологической устойчивости сельского хозяйства.

Основным недостатком светодиодных фитооблучателей является то, что начальные инвестиции при покупке светодиодных фитооблучателей могут быть значительными, что в результате может ограничивать доступность данной технологии для небольших сельскохозяйственных предприятий. Однако стоит отметить, что в долгосрочной перспективе эти инвестиции могут окупиться благодаря существенной экономии электроэнергии и продолжительному сроку службы светодиодных фитооблучателей [16].

Материалы и методы

Для разработки светодиодного фитооблучателя были использованы нормативные стандарты, которые определяют основные требования в области светотехники для фитоосвещения: ГОСТ Р 57671-2017³ и ГОСТ Р 58461-2019⁴.

Процесс разработки облучателя был выполнен в соответствии с последовательностью следующих этапов:

- создание трехмерных моделей компонентов облучателя с использованием программы КОМПАС-3D⁵;

³ ГОСТ Р 57671-2017. Приборы облучательные со светодиодными источниками света для теплиц. Общие технические условия : дата введения 2017-12-01. М. : Стандартинформ, 2017. 7 с.

⁴ ГОСТ Р 58461-2019. Освещение растений в сооружениях защищенного грунта. Термины и определения : дата введения 2020-01-01. М. : Стандартинформ, 2019. 20 с.

⁵ Система трехмерного моделирования КОМПАС-3D // АСКОН. URL: <https://ascon.ru/products/7/review> (дата обращения: 06.08.2023).

- импорт полученных трехмерных моделей в программу TracePro⁶ и задание оптических свойств материалам и поверхностям облучателя;
- трассировка лучей и анализ полученных результатов;
- осуществление сравнительного анализа светотехнических характеристик, полученных в ходе трассировки лучей и лабораторных измерений реального прототипа.

Процесс трассировки лучей в программе TracePro был осуществлен с помощью метода Монте-Карло. Данный метод является численным подходом, используемым для решения сложных задач, включая моделирование световых и оптических явлений. Метод Монте-Карло позволяет эффективно моделировать сложные оптические системы и рассчитывать основные светотехнические параметры [17].

Исследование характеристик прототипа фитооблучателя было проведено в лаборатории Центра коллективного пользования «Светотехническая метрология» (при Институте электроники и светотехники МГУ им. Н. П. Огарёва)⁷. Для измерения светотехнических характеристик ламп согласно ГОСТ Р 55702-2020⁸ была использована фотоколориметрическая измерительная установка от фирмы Gooch & Housego. Данная установка включает фотометрический шар OL IS7600, многоканальный спектрорадиометр OL 770 UV/VIS, оптоволоконный кабель 770-7G-3.0, прецизионный источник постоянного тока OL410-200 PRECISION LAMP SOURCE (используемый для питания вспомогательной лампы AUX LAMP A180), арматуру для крепления ламп, регулируемый автотрансформатор (для изменения напряжения питающей сети), блок мультиметров UNI-T UTD890D и компьютер [18].

Фитофотометрическая оценка излучения фитооблучателя была основана на эффективной системе величин, оценивающей излучение с помощью селективной функции фотосинтезной эффективности.

Расчет фотосинтетического потока фотонов фитооблучателя $F_{\text{ФАР}}$ был выполнен по формуле 1, а эффективность в области фотосинтетически активной радиации (далее – ФАР) $\eta_{\text{ФАР}}$ – по формуле 2 согласно ГОСТ Р 57671-2017.

$$F_{\text{ФАР}} = \int_{400}^{700} \varphi_{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{hc \cdot N_A} \cdot d\lambda = K \cdot \int_{400}^{700} \varphi_{\lambda} \cdot \lambda \cdot d\lambda, \quad (1)$$

где $F_{\text{ФАР}}$ – фотосинтетический поток фотонов, мкмоль/с; φ_{λ} – спектральная плотность распределения мощности излучения прибора (в области ФАР), Вт/нм; λ – длина волны, нм; $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; $c = 3 \cdot 10^{17}$ нм/с – скорость света; $N_A = 6,022 \cdot 10^{17}$ мкмоль⁻¹ – число Авогадро; $K = 8,36 \cdot 10^{-3}$ мкмоль · нм⁻¹ · Дж⁻¹ – коэффициент.

$$\eta_{\text{ФАР}} = F_{\text{ФАР}} / P, \quad (2)$$

где $\eta_{\text{ФАР}}$ – эффективность в области ФАР, (мкмоль/с)/Вт; $F_{\text{ФАР}}$ – фотосинтетический поток фотонов, мкмоль/с; P – потребляемая мощность, Вт.

⁶ Software for design and analysis of illumination and optical systems // Lambda Research Corporation. Available at: <https://lambdaresearch.com/tracepro/> (accessed 06.08.2023).

⁷ Научная деятельность института // Национальный исследовательский Мордовский государственный университет. URL: <https://mrsu.ru/ru/university/institute/ielis/activity/sec/nauchnaya-deyatelnost/> (дата обращения: 02.09.2023).

⁸ ГОСТ Р 55702-2020. Источники света электрические. Методы измерений электрических и световых параметров : дата введения 2021-03-01. М. : Стандартинформ, 2020. 31 с.

Результаты исследования

В качестве источника излучения был выбран светодиод *Full Spectrum-1* (Китай) на основе технологии *chip on board (COB)* (рис. 1). Спектр светодиода *Full Spectrum-1* соответствует типу *double peak* и содержит две выраженные области (максимума), расположенные в диапазонах длин волн 400–500 нм (синий свет) и 600–700 нм (красный свет).



Р и с. 1. Светодиод *Full Spectrum-1*
Fig. 1. LED *Full Spectrum-1*

В таблице 1 представлены измеренные светотехнические характеристики светодиода *Full Spectrum-1* после 15 минут непрерывной работы. Фотосинтетический поток фотонов светодиода (*PPF*) был определен согласно ГОСТ Р 57671-2017.

Таблица 1
Table 1

Измеренные характеристики светодиода типа *Full Spectrum-1* «*double peak*»
Measured characteristics of a *Full Spectrum-1* “*double peak*” LED

Параметры / Options	Значения / Meanings
Мощность, Вт / Power, W	7,7
Напряжение, В / Voltage, V	28
Сила тока, мА / Current, mA	274
Энергетический поток излучения, Вт / Energy radiation flux, W	4,62
Оптический КПД, % / Optical efficiency, %	60
<i>PPF</i> , мкмоль/с / <i>PPF</i> , μmol/s	18,48
Фотосинтетическая эффективность, мкмоль/Дж / Photosynthetic efficiency, μmol/J	2,4

Для фитооблучателя был выбран прожекторный корпус из алюминия⁹, позволяющий точно направлять свет на растения, обеспечивая тем самым максимальную эффективность фотосинтеза и роста. Алюминиевый корпус обладает хорошей

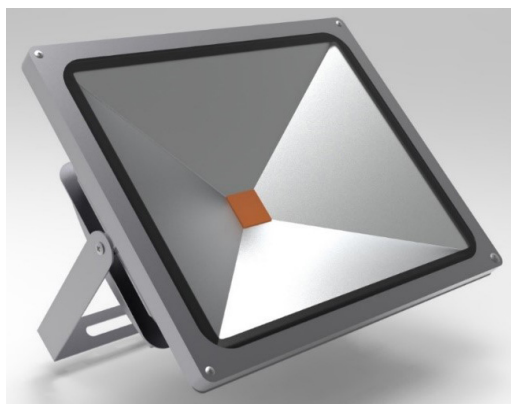
⁹ Корпус светодиодного прожектора мощностью 30 ватт, FLH30 // Светодиодный интернет-магазин ТАУРЭЙ. URL: <https://www.tauray.ru/catalog/flh30.html> (дата обращения: 06.08.2023).

теплопроводностью, что способствует эффективному охлаждению светодиодов и поддержанию их оптимальной рабочей температуры.

Крепление фитооблучателя осуществляется с помощью лиры, которая позволяет надежно установить облучатель и гибко отрегулировать угол направления потока излучения, обеспечивая оптимальное освещение для растений на разных этапах их развития.

С целью защиты светодиодов и отражателя от механических повреждений, пыли, влаги и других неблагоприятных воздействий было использовано защитное стекло толщиной 4 мм и коэффициентом пропускания 0,9.

На рисунке 2 представлена 3D модель светодиодного фитооблучателя, выполненная в системе КОМПАС-3D.



Р и с. 2. 3D модель светодиодного фитооблучателя
F i g. 2. 3D model of LED grow light

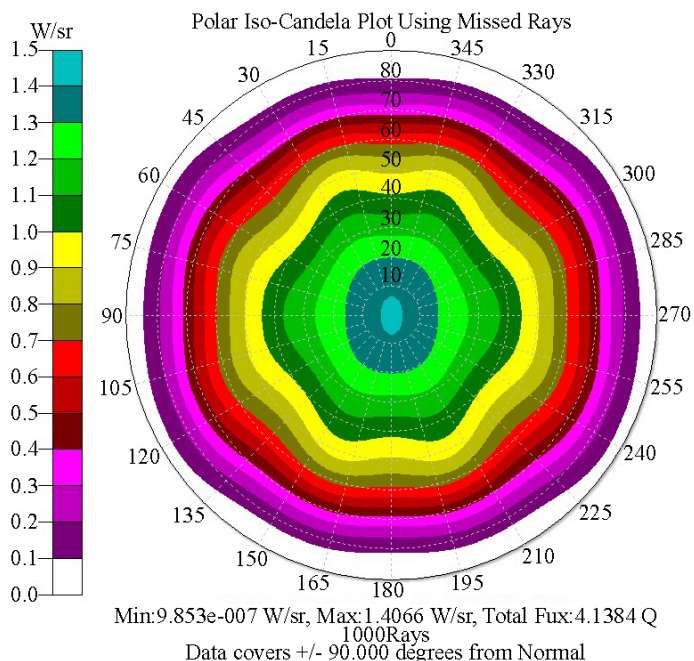
На рисунках 3 и 4 представлены результаты трассировки лучей в программе *TracePro*.

Анализ полученных данных показал, что модель светодиодного фитооблучателя имеет светораспределение близкое к косинусному типу КСС. Энергетический поток излучения составил 4,14 Вт, фотосинтетический поток фотонов – 16,6 мкмоль/с.

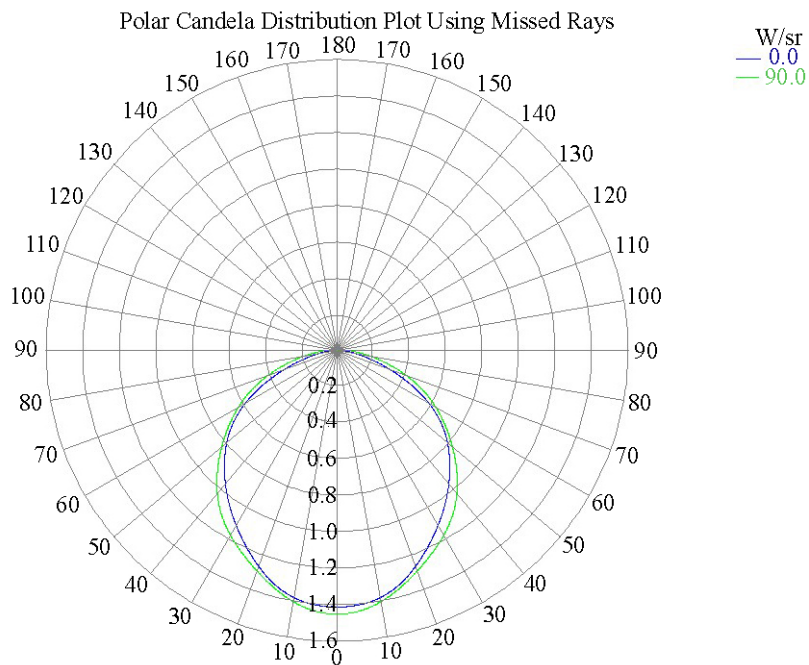
На рисунках 5 и 7 представлены лабораторные испытания прототипа светодиодного фитооблучателя.

Спектральное распределение излучения имеет два максимума, соответствующих 440 нм и 642 нм. При этом интенсивность максимума синего излучения больше максимума красного в 1,25. Такое соотношение способствует вегетативному росту растений и быстрому приросту зеленой массы, а также замедляет процессы цветения [19].

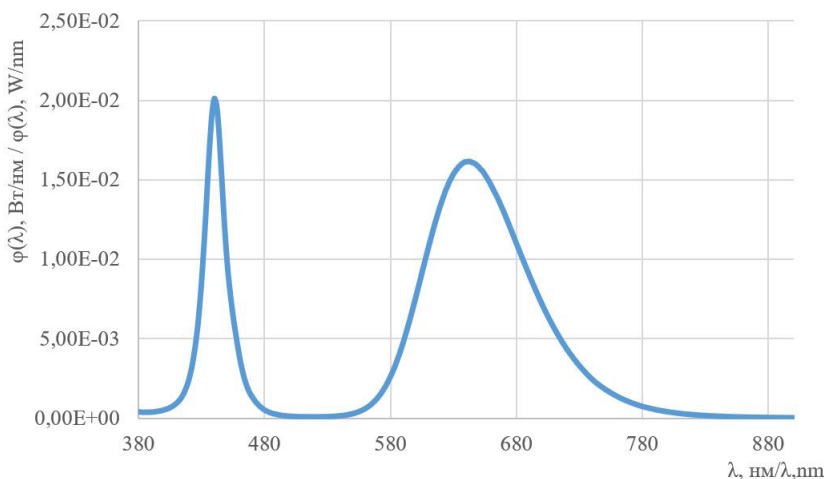
Исследование светораспределения фитооблучателя в пространстве показало, что КСС, измеренная с помощью гониофотометра (рис. 6), близка по форме к КСС, полученной в программе *TracePro* (рис. 4), и соответствует косинусному типу. Двойной угол половинной яркости ($2\Theta_{0,5}$) составил 106,1 град., что позволяет обеспечить равномерное освещение больших площадей. При этом вся энергия излучения фитооблучателя направляется в одну полусферу, что способствует эффективному освещению растений, обеспечивая им необходимую интенсивность света для фотосинтеза и роста.



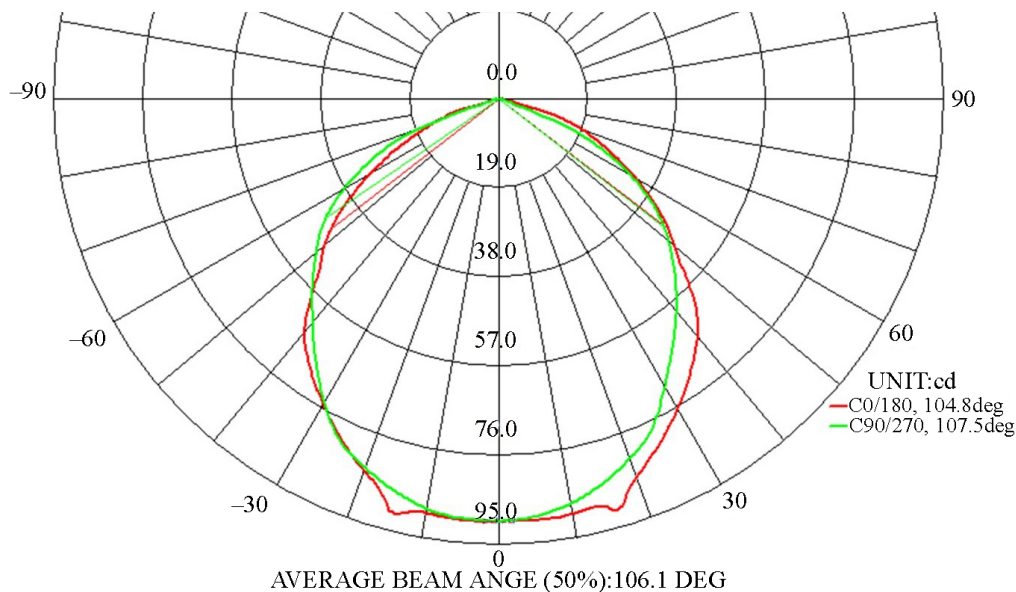
Р и с. 3. Диаграмма светораспределения светодиодного фитооблучателя
 F i g. 3. Light distribution diagram of LED grow light



Р и с. 4. Кривые силы света (КСС) светодиодного фитооблучателя
 F i g. 4. Luminous intensity curves (LIC) of the LED grow light

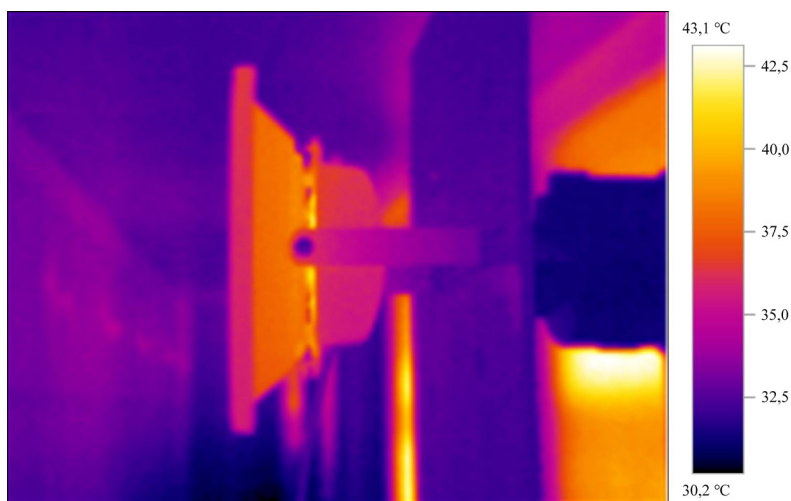


Р и с. 5. Спектральная интенсивность энергетического потока излучения светодиодного фитооблучателя
 F i g. 5. Spectral intensity of the energy flux of radiation from the LED grow light



Р и с. 6. КСС светодиодного фитооблучателя
 F i g. 6. LIG of the LED grow light

Температура нагрева корпуса светодиодного фитооблучателя (рис. 7) не превышает 41,7 °С, что говорит об эффективном отводе тепла. Максимальный нагрев наблюдается в области крепления *COB* – светодиода к корпусу. Такой отвод тепла важен для обеспечения стабильной и долгосрочной работы светодиодного фитооблучателя. Важно отметить, что превышение максимальной температуры в данной области может привести к перегреву и снижению срока службы светодиодов, а также снижению их эффективности излучения.



Р и с. 7. Термограмма
F i g. 7. Thermogram

В таблице 2 представлены измеренные характеристики разработанного светодиодного фитооблучателя.

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

Характеристики разработанного светодиодного фитооблучателя
Characteristics of the developed LED grow light

Параметры / Options	Значения / Meanings
Мощность, Вт / Power, W	8,8
Напряжение сети, В / Mains voltage, V	220
Сила тока, мА / Current, mA	87,3
Энергетический поток излучения, Вт / Energy radiation flux, W	4,05
Оптический КПД, % / Optical efficiency, %	46
PPF, мкмоль/с / PPF, $\mu\text{mol/s}$	16,2
Фотосинтетическая эффективность, мкмоль/Дж / Photosynthetic efficiency, $\mu\text{mol/J}$	1,84
Тип КСС / LIG type	Косинусная / Cosine
Способ монтажа / Installation method	Ли́ра / Lyra

Обсуждение и заключение

Разработанный светодиодный фитооблучатель имеет величину фотосинтетического потока фотонов, равную 16,2 мкмоль/с при потребляемой мощности 8,8 Вт. Фотосинтетическая эффективность фитооблучателя составила 1,84 мкмоль/Дж. Этот показатель подтверждает высокую способность фитооблучателя обеспечивать растения необходимой энергией для эффективной фотосинтетической активности. Множество светильников, оснащенных лампами типа ДНаТ, имеют фотосинтетическую эффективность на уровне 1,3 мкмоль/Дж или ниже. Для некоторых из

лучших светильников с лампами этот показатель может достигать 1,7 мкмоль/Дж¹⁰.

Таким образом, описанный фитооблучатель можно использовать для процесса выращивания растений в теплицах, обеспечивая оптимальные условия освещения и способствуя повышению урожайности и качества сельскохозяйственных культур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мерзлякова В. М., Русских И. Т., Стрелкова Е. И. Определение спектральных характеристик фитосветильников // *Аграрная наука – сельскохозяйственному производству*. 2019. С. 262–268. EDN: ZBJBXS
2. Чиков В. И. Эволюция представлений о связи фотосинтеза с продуктивностью растений // *Физиология растений*. 2008. Т. 55, № 1. С. 140–154. EDN: IBWWWJ
3. Кунгс Я. А., Угренинов И. А. Перспективы внедрения светодиодного освещения в теплицах // *Вестник КрасГАУ*. 2015. № 3 (102). С. 53–55. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-vnedreniya-svetodiodnogo-osvescheniya-v-teplitsah> (дата обращения: 01.08.2023).
4. Katzin D., Marcelis L. F. M., van Mourik S. Energy Savings in Greenhouses by Transition from High-pressure sodium to LED Lighting // *Applied Energy*. 2021. Vol. 281, Issue 1. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116019>
5. LEDs for Energy Efficient Greenhouse Lighting / D. Singh [et al.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 49, Issue 4. P. 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.117>
6. Development of an Ecological Lighting Device to Reduce the growth Time of Agricultural plants in Greenhouses / A. V. Cheremisin [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. 1942. 2021. Article no. 012094. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1942/1/012094>
7. Olle M., Viršile A. The Effects of Light-Emitting Diode Lighting on Greenhouse Plant Growth and Quality // *Agricultural and food science*. 2013. Vol. 22, Issue 2. P. 223–234. <https://doi.org/10.23986/afsci.7897>
8. Ракутько Е. Н., Ракутько С. А., Васькин А. Н. Методика расчета параметров радиационной среды от светодиодного фитооблучателя // *АгроЭкоИнженерия*. 2019. № 1 (98). С. 71–82. <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10123>
9. Товстыко Д. А. Изучение роста и развития растений салата под влиянием узкополосных светодиодов // *Безопасность и качество сельскохозяйственного сырья и продовольствия*. 2020. С. 254–255. EDN IUPUQG
10. Research into Influence from Different Ranges of Par Radiation on Efficiency and Biochemical Composition of Green Salad Foliage Biomass / L. B. Prikupets [et al.] // *Light & Engineering*. 2018. Vol. 26, Issue 4. P. 38–47. EDN: YRVHVB
11. Ouzounis T., Rosenqvist E., Ottosen C. O. Spectral Effects of Artificial light on Plant Physiology and Secondary Metabolism: A Review // *HortScience*. 2015. Vol. 50, Issue 8. С. 1128–1135. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.50.8.1128>
12. Светоизлучающее устройство, источник света на основе СИДА (светоизлучающего диода) для растениеводства и промышленное предприятие по выращиванию растений : патент № 2580325 С2 Российской Федерация. № 2013126797/07 ; заявл. 15.11.2011 ; опубл. 10.04.2016.
13. Singh P., Tan C. M. Degradation Physics of High Power LEDs in Outdoor Environment and the Role of Phosphor in the Degradation Process // *Scientific reports*. 2016. Vol. 6, Issue 1. Article no. 24052. <https://doi.org/10.1038/srep24052>

¹⁰ Поезжалов В. М., Нупирова А. М. Исследование эффективности светодиодного освещения для закрытого грунта // *Материалы LIV международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству»*. 2015. С. 50. URL: <https://panor.ru/articles/issledovanie-effektivnosti-svetodiodnogo-osveshcheniya-dlya-zakrytogo-grunta/74422.html#> (дата обращения: 01.08.2023).

14. Evaluation of Photobiological Efficiency of Spectrum-Combined LED Phyto-Irradiators in Photo-Culture Cucumber Growing / A. E. Kurshev [et al.]// Light & Engineering. 2022. Vol. 30, Issue 3. P. 93–100. <https://doi.org/10.33383/2022-028>

15. Efficiency of an Alternative LED-based Grow Light System / E. G. Kulikova [et al.]// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2019. Vol. 288, Issue 1. Article no. 012064. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/288/1/012064>

16. Эффект от применения светодиодных тепличных облучателей при выращивании культуры огурца в промышленных теплицах / С. И. Олонина [и др.] // Вестник НГИЭИ. 2020. № 9 (112). С. 31–40. <https://doi.org/10.24411/2227-9407-2020-10082>

17. Байнева И. И., Комаров Н. С. Исследование оптики для светодиодных световых приборов и методов ее компьютерного моделирования // Инженерный журнал с приложением. 2020. № 6. С. 27–31. <https://doi.org/10.14489/hb.2020.06.pp.027-031>

18. Микаева С. А., Железникова О. Е., Сеницына Л. В. Комплекс современного исследовательского оборудования для световых измерений // Автоматизация и современные технологии. 2012. № 12. С. 33–36. EDN: PUWORLD

19. Свешников А. Г., Степанова А. В., Белов В. В. Искусственное освещение теплиц // Студенческая наука – первый шаг в академическую науку. 2018. С. 118–121. EDN: XMVIKT

Поступила в редакцию 22.05.2023; поступила после рецензирования 31.07.2023; принята к публикации 10.08.2023

Об авторах:

Калабкин Александр Андреевич, аспирант 3 курса направления подготовки «Информатика и вычислительная техника» Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2975-6449>, sskalabkin@yandex.ru

Кузнецов Евгений Александрович, аспирант 3 курса направления подготовки «Электроника и теплотехника» Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4199-0931>, kuznecov_ea@mail.ru

Ивлиев Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности и сервиса института электроники и светотехники Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6101-3388>, Researcher ID: E-1697-2014, ivliev_sn@mail.ru

Ашрыатов Альберт Аббясович, доктор технических наук, доцент кафедры источников света института электроники и светотехники Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5674-7259>, Researcher ID: D-8971-2014, ashryatov@rambler.ru

Калабкин Вениамин Андреевич, аспирант 2 курса направления подготовки «Частная зоотехния, кормление, технологии приготовления кормов и производства продукции животноводства» Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7824-5432>, wkalabkin@yandex.ru

Мусатов Андрей Сергеевич, магистр 2 курса направления подготовки «Электроника и наноэлектроника» Национального исследовательского Мордовского государственного университета (430005, Российская Федерация, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9076-3929>, musatov.andrei181998@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

А. А. Калабкин – анализ литературных данных, подготовка первоначального варианта и доработка текста, постановка задачи исследования, формирование частных и общих выводов.

Е. А. Кузнецов – разработка трехмерных моделей и сборка конструктивных частей фитооблучателя, осуществление светотехнического расчета, формирование частных и общих выводов, проведение измерений светотехнических параметров фитооблучателя.

С. Н. Ивлиев – научное руководство, формулирование основной концепции исследования.

А. А. Ашратов – проведение измерений светотехнических параметров фитооблучателя.

В. А. Калабкин – разработка трехмерных моделей конструктивных частей фитооблучателя, проведение расчетов и обработка их результатов.

А. С. Мусатов – анализ литературных данных, доработка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Merzlyakova V.M., Russkih I.T., Strelkova E.I. Determination of the Spectral Characteristics of Phyto-lamps. *Agrarian Science for Agricultural Production*. 2019. p. 262–268. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: ZBJBXS
2. Chikov V.I. Evolution of Ideas About the Relationship Between Photosynthesis and Plant Productivity. *Plant Physiology*. 2008;55(1):140–154. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: IBWWWJ
3. Kungs Y.A., Ugreninov I.A. Prospects for the Implementation of LED Lighting in Greenhouses. *Bulletin of KrasGAU*. 2015;(3):53–55. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-vne-dreniya-svetodiodnogo-osvescheniya-v-teplitsah> (accessed 01.08.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
4. Katzin D., Marcelis L.F.M., van Mourik S. Energy Savings in Greenhouses by Transition from High-Pressure Sodium to LED Lighting. *Applied Energy*. 2021;281(1):1–14. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116019>
5. Singh D., Basu C., Meinhardt-Wollweber M., Roth B. LEDs for Energy Efficient Greenhouse Lighting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015;49(4):139–147. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.117>
6. Cheremisin A.V., Gureeva I.M., Briushinin A.A., Savin D.D., Mozhayko A.A. Development of an Ecological Lighting Device to Reduce the Growth Time of Agricultural Plants in Greenhouses. *Journal of Physics: Conference Series*. 1942. 2021;012094. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1942/1/012094>
7. Olle M., Viršile A. The Effects of Light-Emitting Diode Lighting on Greenhouse Plant Growth and Quality. *Agricultural and Food Science*. 2013;22(2):223–234. <https://doi.org/10.23986/afsci.7897>
8. Rakutko E.N., Rakutko S.A., Vaskin A.N. Methodology for Calculating the Parameters of the Radiation Environment From an LED Phytoirradiator. *AgroBioEngineering*. 2019;(1):71–82. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10123>
9. Tovstyko D.A. Study of the Growth and Development of Lettuce Plants under the Influence of Narrow-Band LEDs. In: Safety and Quality of Agricultural Raw Materials and Food: Collection of Articles of the All-Russian Scientific and Practical Conference. 2020. p. 254–255. (In Russ., abstract in Eng.) EDN IUPUQG
10. Prikupets L.B., Boos G.V., Terekhov V.G., Tarakanov I.G. Research Into Influence From Different Ranges of Par Radiation on Efficiency and Biochemical Composition of Green Salad Foliage Biomass. *Light & Engineering*. 2018;26(4):38–47. EDN YRVHVB
11. Ouzounis T., Rosenqvist E., Ottosen C.O. Spectral Effects of Artificial Light on Plant Physiology and Secondary Metabolism: A Review. *HortScience*. 2015;50(8):1128–1135. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.50.8.1128>
12. Light Emitting Device, Light Source Based on LED (Light Emitting Diode) For Plant Growing and Industrial Plant Growing Plant. Patent 2580325 C2 Russian Federation. 2016.
13. Singh P., Tan C.M. Degradation Physics of High Power LEDs in Outdoor Environment and the Role of Phosphor in the Degradation Process. *Scientific Reports*. 2016;6(1):24052. <https://doi.org/10.1038/srep24052>
14. Kurshev A.E., Bogatyrev S.D., Zheleznikova O.E., Gorbunov A.A., Myshonkov A.B., Prytkov S.V., et al. Evaluation of Photobiological Efficiency of Spectrum-Combined Led Phyto-Irradiators in Photo-Culture Cucumber Growing. *Light & Engineering*. 2022;30(3):93–100. <https://doi.org/10.33383/2022-028>
15. Kulikova E.G., Efremova S.Y., Politaeva N., Smyatskaya Y. Efficiency of an Alternative LED-Based Grow Light System. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;288(1):012064. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/288/1/012064>

16. Olonina S.I., Filatov D.A., Kislyakov V.G., Olonin I.Yu. Effect of Using Led Greenhouse Irradiators When Growing Cucumber Crops in Industrial Greenhouses. *Bulletin of NGIEI*. 2020;(9):31–40. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24411/2227-9407-2020-10082>

17. Bayneva I.I., Komarov N.S. Study of Optics for LED Luminaires and Methods of Its Computer Modeling. Reference. *Engineering Journal with Application*. 2020;(6):27–31. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.14489/hb.2020.06.pp.027-031>

18. Mikaeva S.A., Zheleznikova O.E., Sinitsyna L.V. Complex of Modern Research Equipment for Light Measurements. *Automation and Modern Technologies*. 2012;(12):33–36. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: PUWORLD

19. Sveshnikov A.G., Stepanova A.V., Belov V.V. Artificial Lighting in Greenhouses. In: Student Science – The First Step into Academic Science. 2018. p. 118–121. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: XMVIKT

Submitted 22.05.2023; revised 31.07.2023; accepted 10.08.2023

About the authors:

Alexandr A. Kalabkin, Post Graduate Student of the 3rd year of the direction of training Informatics and Computer Engineering of the National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2975-6449>, sskalabkin@yandex.ru

Evgeniy A. Kuznetsov, Post Graduate Student of the 3rd year of training in Electrical and Thermal Engineering of the National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4199-0931>, kuznecov_ea@mail.ru

Sergey N. Ivliyev, Cand.Sci (Engr.), Associate Professor of the Chair of Information Security and Service of the Institute of Electronics and Lighting Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6101-3388>, Researcher ID: E-1697-2014, ivliev_sn@mail.ru

Albert A. Ashryatov, Associate Professor of the Chair of Light Sources at the Institute of Electronics and Lighting Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5674-7259>, Researcher ID: D-8971-2014, ashryatov@rambler.ru

Veniamin A. Kalabkin, Post Graduate Student of the 2nd year of the direction of training Private Animal Husbandry, Feeding, Technologies of Feed Preparation and Production of Livestock Products, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7824-5432>, wkalabkin@yandex.ru

Andrey S. Musatov, Master's Degree Student of the 2nd year in Electronics and Nanoelectronics, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9076-3929>, musatov.andrei181998@yandex.ru

Authors contribution:

A. A. Kalabkin – literature data analysis, preparation of the initial draft and text refinement, research task formulation, formulation of specific and general conclusions.

E. A. Kuznetsov – development of three-dimensional models and assembly of the structural components of the grow light, photometric calculations, formulation of specific and general conclusions, measurement of the photometric parameters of the grow light.

S. N. Ivliyev – scientific supervision, formulation of the main research concept.

A. A. Ashryatov – measurement of the photometric parameters of the grow light.

V. A. Kalabkin – developing three-dimensional models of the grow light structural components, conducting calculations, and processing their results.

A. S. Musatov – literature data analysis, text refinement.

All authors have read and approved the final manuscript.