

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И МАТЕРИАЛОВ

## SIMULATION OF PROCESSES AND MATERIALS

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2017. Т. 20, № 2. С. 115—121.  
DOI: 10.17073/1609-3577-2017-2-115-121

УДК 621.315.592

### Численное моделирование и выбор светодиодов для фитосветильников

© 2017 г. С. И. Супельняк<sup>1,§</sup>, В. Г. Косушкин<sup>1</sup>

*Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Калужский филиал),  
ул. Баженова, д. 2, Калуга, 248000, Россия*

**Аннотация.** Твердотельная технология освещения на основе светодиодов предлагает широкие возможности в освещении растений. Представлен прототип твердотельной лампы на основе светодиодов InGaN с максимумами излучения 440, 460, 530 нм и AlInGaP с максимумами излучения 590, 630 и 660 нм, оснащенный источником стабилизированного тока и оптимизированным радиатором. Спектр излучения светодиодного осветителя представляет собой результат численного моделирования с применением экспериментально полученного спектра поглощения листа растения. Проведено сравнение эффекта применения светодиодов с воздействием натриевой трубчатой лампы. На основе оценки результатов биометрических измерений, которые проводили на протяжении всего эксперимента, показана возможность воздействия спектра предложенного светодиодного осветителя на рост растений.

**Ключевые слова:** светодиодный осветитель, твердотельный, спектр излучения, спектр поглощения, адаптивный светильник

#### Введение

Одним из важных и экономически целесообразных направлений использования светодиодов является искусственное освещение теплиц. Проблема снижения затрат на электроэнергию в растущем секторе этого производства — важнейший фактор конкурентоспособности.

Известно, что спектральный состав излучения источников света должен в наибольшей степени способствовать протеканию основных физиологических процессов в растениях. Источники света должны быть экономичны и обеспечивать равномерное облучение растений. Традиционные источники света — лампы ДНаТ (дуговые натриевые трубчатые), не отвечают требованиям по спектральному составу света, необходимого для растений. Повышение требований по экологической чистоте источников света в производстве сельскохозяйственных культур стимулирует поиск новых источников их освещения.

Разработка источника света, в полной мере удовлетворяющего этим требованиям, становится максимально возможной с развитием полупроводниковых технологий и повышением коэффициента полезного действия (КПД), а также растущей доступностью широкого спектра светодиодов [1—9].

Цель работы — определение оптимального спектрального состава светодиодного освещения, позволяющего управлять интенсивностью синтеза органического вещества и повысить энергоэффективность процесса.

Известно, что качественный состав спектра излучения адаптивного светодиодного фитосветильника определяется соотношениям участков видимого света от 380 до 700 нм. В зеленой массе спектры поглощения хлорофилла меняются в зависимости от его состояния, степени агрегации, адсорбции на определенных белках. Положение максимума поглощения для каротиноидов также зависит от среды, в которой находится пигмент [10].

Супельняк Станислав Игоревич<sup>1,§</sup> — аспирант, e-mail: supelnyak@gmail.com, Косушкин Виктор Григорьевич<sup>1</sup> — доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение», e-mail: kosushkin@gmail.com

§ Автор для переписки

**Экспериментальное исследование поглощения света зеленой массой растений**

Методика экспериментов. Оценку влияния спектрального состава излучения светодиодов на рост и развитие рассады огурца гибрида «Кураж F1» выполняли в промышленной теплице при постоянных факторах эксперимента: продолжительности светового дня (14 ч), температуре ( $T = 35\text{ }^\circ\text{C}$ ), влажности воздуха (80 %). Питательный субстрат был одинаков при проведении всех экспериментов. Переменным фактором был качественный состав освещения.

Для экспериментов использовали две грядки с пророщенными при одинаковых внешних условиях ростками огурца. Одна грядка, которую освещали ДНаТ 400 Вт Reflux, являлась контрольной. Вторую грядку освещали разработанным адаптивным светодиодным фитосветильником. Для определения эффекта светодиодного освещения с рассчитанным спектром на протяжении 15 дней с интервалом времени проводили измерения габаритов десяти ростков (высота стебля, длина и ширина семядолей).

Особенности конструкции экспериментального светильника. В конструкцию опытного образца светодиодного фитосветильника входят 2 основных узла.

1. Светодиодные панели с монтажным каркасом.
  2. Источник питания.
- В состав источника питания входят:
- входной фильтр с системой защиты от перенапряжений и бросков тока;
  - импульсный источник дежурного питания +5В/+24В;
  - силовые импульсные преобразователи напряжения с управляемой стабилизацией тока до 0,35 А и выходным напряжением не выше 270 В (в данной модели используется 3 модуля).

**Расчет спектра излучения светодиодного фитосветильника.** Для сравнения рассмотрим традиционные источники излучения для культурных растений в сельскохозяйственных теплицах — натриевые лампы высокого давления ДНаТ 400. Эти лампы при всех недостатках излучают достаточное количество фотонов для активации процесса фотосинтеза.

При проектировании количественная характеристика излучения светодиодного фитосветильника рассчитана на основе характеристик ДНаТ фирмы Reflux. Как обсуждалось ранее, пигменты растений поглощают во всем диапазоне видимого излучения (400—700 нм). Основные пигменты, участвующие в фотосинтезе, — хлорофиллы *a* и *b*. Каротиноиды отвечают за трансфер части энергии [10, 11]. Исходя

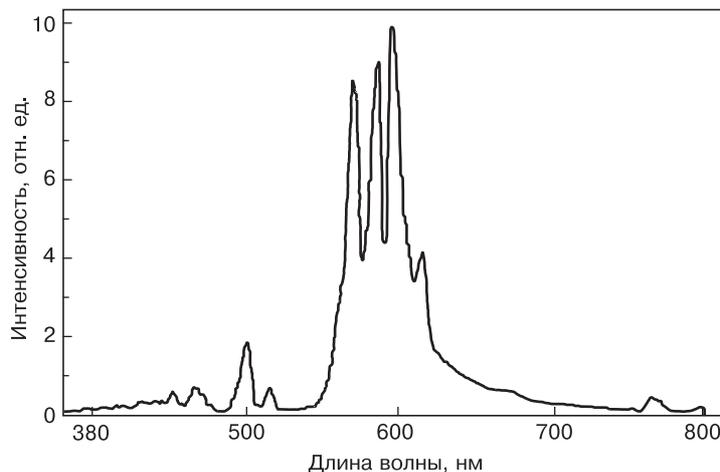


Рис. 1. Спектр излучения ДНаТ 400 Вт  
Fig. 1. The emission spectrum of sodium arc lamp is 400 W

из этого, считаем, что в спектре излучения ДНаТ наиболее важными областями, энергия фотонов которых используется по максимуму, являются области 400—500 и 600—700 нм.

По спектру ДНаТ фирмы Reflux (рис. 1) подсчитана доля полезной для растений энергии. Доля наиболее полезного для растения излучения составляет  $\eta = 0,36$ .

Из паспортных данных ДНаТ 400 Вт фирмы Reflux (см. ниже) известно значение излучаемой такими лампами фотосинтетически активной радиации (**ФАР**).

Мощность, Вт .....	400
Напряжение сети, В.....	220
Срок службы, тыс. ч .....	48
ФАР, мкмоль/с.....	600

Зная долю эффективного излучения, рассчитали значение ФАР:

$$P_{\text{eff}} = \eta P_{\Sigma} = 0,36 \cdot 216 \text{ мкмоль/с.} \quad (1)$$

Расчет количества светодиодов и способа их установки. Анализ рынка промышленно выпускаемых светодиодных приборов показал, что доступны следующие виды мощных светодиодов (рис. 2 и 3): Royal Blue 440 нм, ARPL–Star–1W Blue (14B1N) 460 нм, ARPL–Star–1W Green (2G1E) 530 нм, ARPL–Star–1W Yellow (YEA1E) 590 нм, ARPL–Star–1W Red (1R1N) 630 нм, Grow Red 660 нм. Спектральные характеристики приборов приведены на рис. 2.

Выбор количества светодиодов основывался на необходимом спектральном составе излучения светильника. Светодиоды подобраны под спектр растения на первом этапе развития (рис. 4), когда появляется первая семядоля и необходимо максимальное количество излучения для дальнейшего развития. Требуется, чтобы спектр светодиодного

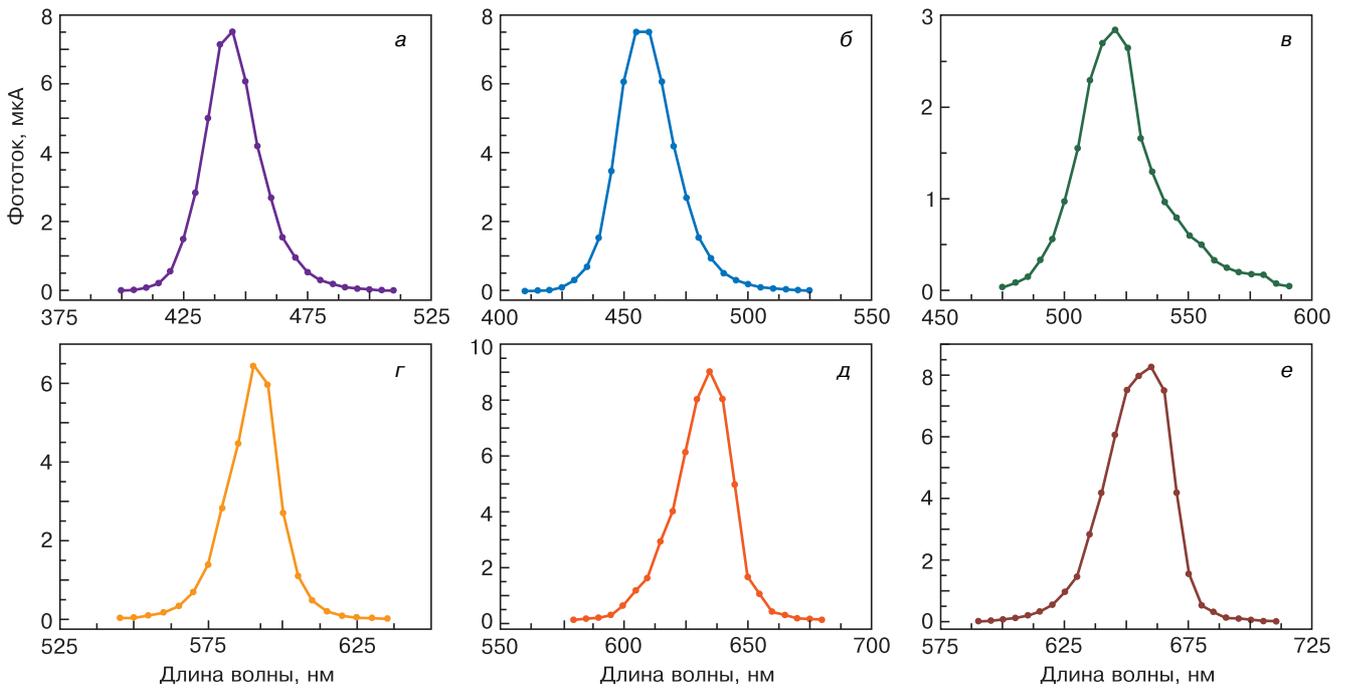


Рис. 2. Спектральные характеристики светодиодов: а — Royal Blue 440 нм; б — ARPL-1W Blue 460 нм; в — ARPL-1W Green 530 нм; г — ARPL-Star-1W 590 нм; д — ARPL-1W Red 630 нм; е — Grow Red 660 нм

Fig. 2. Spectral characteristics of LEDs: (a) Royal Blue 440 nm, (б) ARPL-1W Blue 460 nm, (в) ARPL-1W Green 530 nm, (г) ARPL-Star-1W 590 nm, (д) ARPL-1W Red 630 nm, (е) Grow Red 660 nm

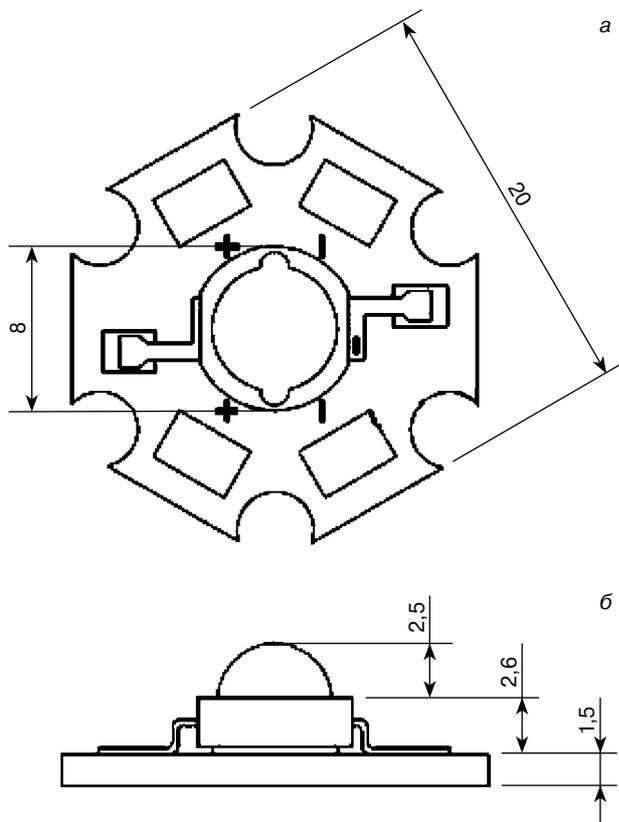


Рис. 3. Внешний вид и габаритные размеры (в мм) светодиода на теплоотводящем основании: а — вид сверху; б — вид сбоку

Fig. 3. Appearance and overall dimensions (mm) of the LED on the heat sink base: (a) top view, (б) side view

фитосветильника перекрывал весь спектр поглощения и максимально был приближен к нему. Последнее условие позволяет достичь максимального энергосбережения.

В соответствии с предложенной при выполнении работы методикой, количество светодиодов было определено пропорционально коэффициентам поглощения на длинах волн 440, 460, 530, 590, 630 и 660 нм. Как было рассчитано выше, необходимо обеспечить значение потока фотонов  $P_{\text{eff}} = 216$  мкмоль/с. Исходя из того, что спектр излучения светодиода с характеристическим максимумом при длине волны 530 нм не попадает в область плеча спектральной кривой  $\beta$ -каротина [10], однако, слабое поглощение присутствует, использовали минимальное количество

Таблица 1

**Значения коэффициентов поглощения при максимумах длины волны светодиодов**  
[The values of the absorption coefficients at the maxima of the wavelength of the LEDs]

Длина волны, нм	Коэффициент поглощения, см <sup>-1</sup>	Количество светодиодов, шт
440	0,066	12
460	0,073	10
530	0,033	2
590	0,043	2
630	0,049	6
660	0,073	14

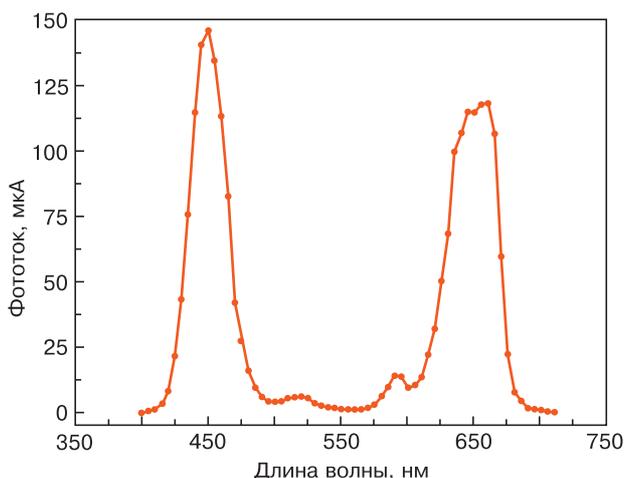


Рис. 4. Спектр излучения светодиодного фитосветильника  
Fig. 4. The emission spectrum of the LED phytolamp

ство таких светодиодов. Учитывая, что максимум излучения светодиодов 590 нм находится в области роста плеча кривой поглощения листа в области красного света, также использовали минимальное количество и этих светодиодов.

В табл. 1 представлены значения коэффициентов поглощения при максимумах длины волны выбранных светодиодов.

В результате наибольшее количество светодиодов наблюдаемая для светодиодов с длинами волн 440, 460, 630 и 660 нм. На рис. 4 представлен конечный спектр излучения светодиодного фитосветильника. В процессе последующих испытаний будет выяснено, необходимо ли добавить большее количество светодиодов с длиной волны 530 и 590 нм.

Результаты расчета ФАР для отдельных групп светодиодов и суммарное значение для адаптивного светильника представлены в табл. 2.

**Моделирование и выбор конструкции радиатора охлаждения кристалла светодиода.** Выбор системы охлаждения является важной проблемой конструирования источников светодиодного освещения, так как до 80 % подводимой энергии рассеивается в виде тепла. Для расчета габаритных характеристик и выбора материала теплоотводящего элемента конструкции была разработана математическая модель

и в системе ANSYS выполнен расчет коэффициентов теплопроводности конвекцией, теплоотдачи излучением и облученности [12—14].

На рис. 5 изображена конструкция радиатора для которого выполнен расчет теплового режима. Основание светодиода радиусом  $r_d$  показано на рис. 5. Однако поверхность основания светодиода в тепловом расчете учитывать не будем, поскольку площадь основания мала ( $55,65 \text{ мм}^2$ ). Кроме того, основание состоит из алюминия и покрыто кольцом из полиамида ПА-6. В результате вклад этой поверхности в конвективный теплообмен и теплообмен излучением незначительный и им можно пренебречь.

Результаты расчетов представлены на рис. 6, 7 и 8.

В результате моделирования теплового режима светодиодного кристалла было найдено значение

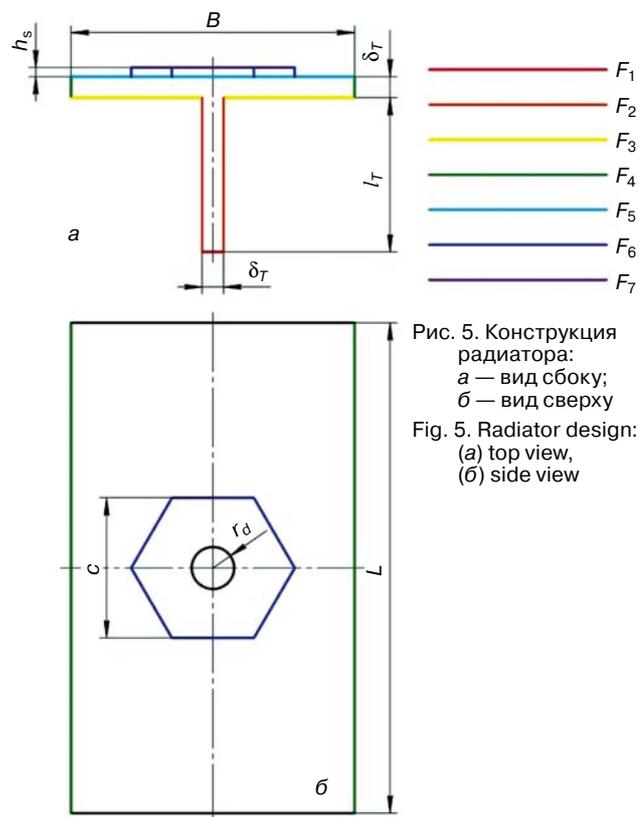


Рис. 5. Конструкция радиатора:  
а — вид сбоку;  
б — вид сверху  
Fig. 5. Radiator design:  
(a) top view,  
(б) side view

Таблица 2

**Значения потока фотосинтетически активной радиации светодиодов**  
[The flux values of photosynthetically active LED radiation]

Длина волны, нм	ФАР ед., мкмоль/с	Количество светодиодов, шт.	ФАР конечная, мкмоль/с	ФАР суммарная, мкмоль/с
440	3,76	12	52,64	218,42
460	3,84	10	38,4	
530	4,42	2	8,84	
590	4,92	2	9,84	
630	5,26	6	31,56	
660	5,51	14	77,14	

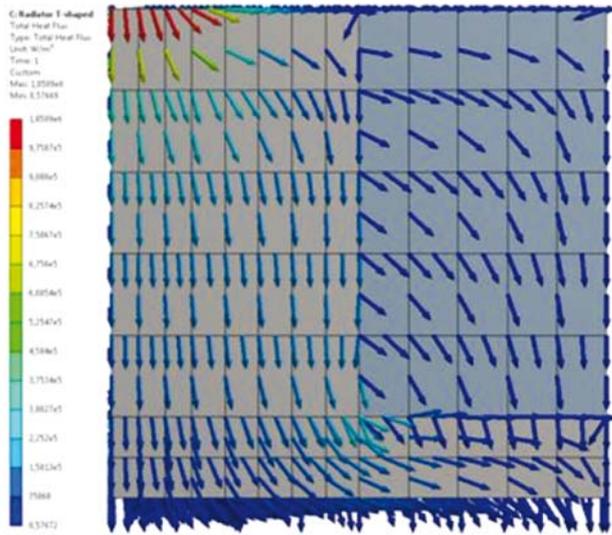


Рис. 6. Плотность теплового потока  
Fig. 6. Heat flux density

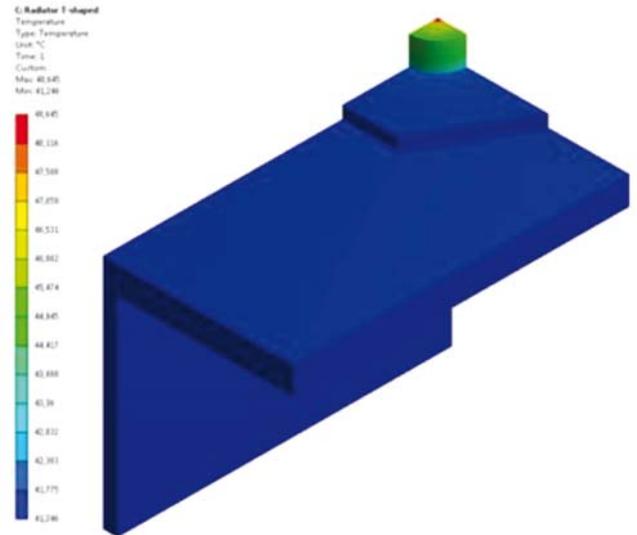


Рис. 7. Температурное распределение секции радиатора  
Fig. 7. Temperature distribution of the radiator section

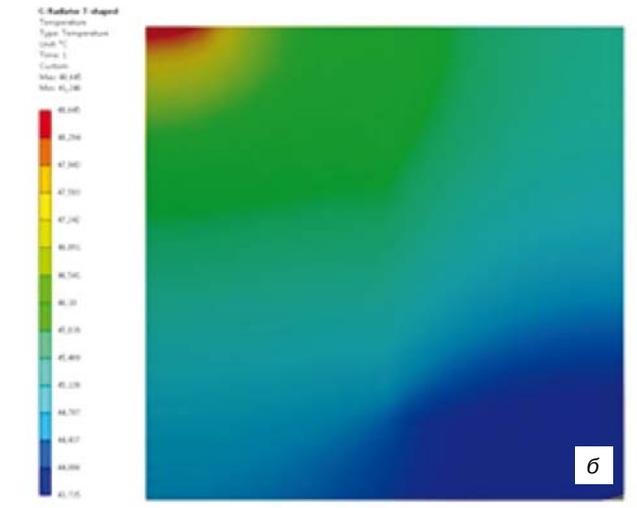
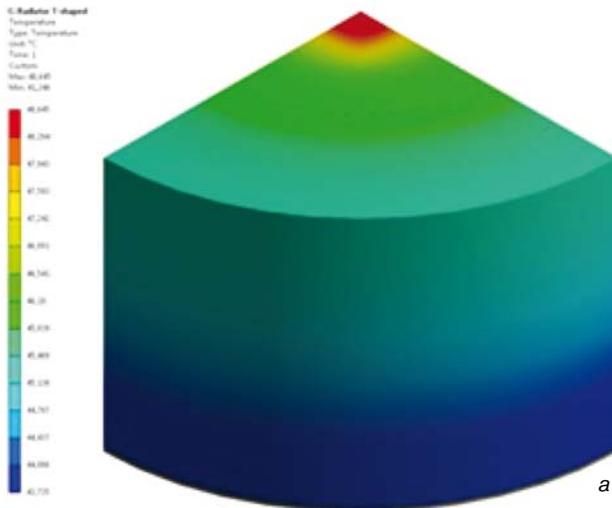


Рис. 8. Температурное распределение кристалла, закрепленного на основании светодиода общий вид (а) и фрагмент (б)  
Fig. 8. Temperature distribution of the crystal, fixed on the basis of the LED (a) general view and (б) fragment

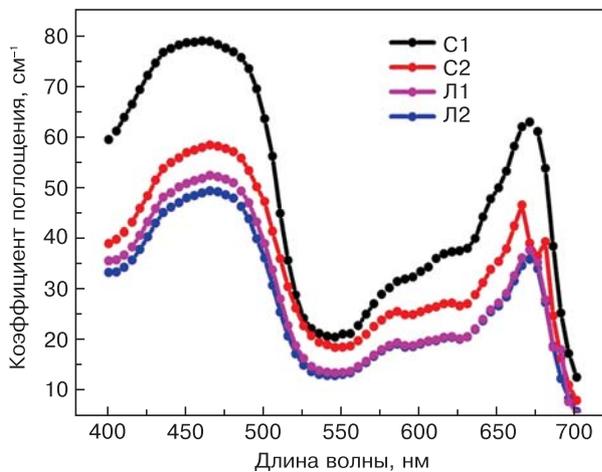


Рис. 9. Зависимость спектра поглощения света листа от возраста. Каждая кривая представляет среднее значение десяти измерений. Кривые C1 и C2 соответствуют семядолю 1 и 2 соответственно; Л1 и Л2 — взрослому листу 1 и 2 соответственно

Fig. 9. The dependence of the absorption spectrum of light sheet from age. Each curve represents the average of ten measurements. Curves C1 and C2 correspond to the cotyledon 1 and 2, respectively; Л1 and Л2 adult leaf 1 and 2, respectively

температуры светодиодного кристалла  $T_{cr}$  при использовании радиатора рассмотренной конструкции. В результате  $T_{cr} = 41,671 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Согласно паспортным данным максимально допустимая температура кристалла светодиода составляет  $T_{lim} = 105 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Следовательно,  $T_{cr} < T_{lim}$  и предложенная конструкция радиатора удовлетворяет необходимым требованиям и может использоваться для охлаждения светодиода мощностью 1 Вт.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 9 представлена зависимость спектра поглощения света листа от его возраста. Каждая

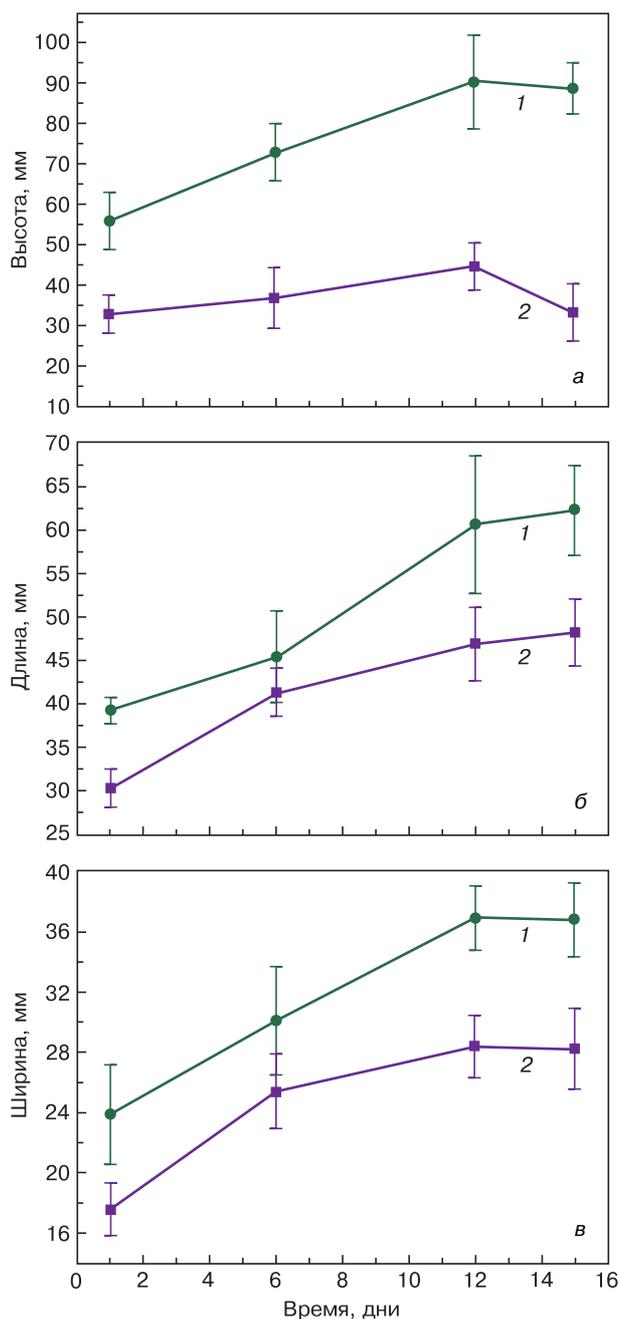


Рис. 10. Изменение высоты стебля (а), длины листа (б) и ширины стебля (в) во времени в зависимости от типа источника излучения: 1 — ДНАТ; 2 — светодиодный светильник

Fig. 10. (a) Change in stem height, (б) leaf length and (в) stem width in time depending on the type of radiation source: (1) sodium arc lamp, (2) LED lamp

кривая представляет среднее значение десяти измерений. Кривые С1 и С2 соответствуют семядоле 1 и 2 соответственно; кривые Л1 и Л2 — взрослому листу 1 и 2 соответственно.

По результатам измерений параметров ростков рассады построены кривые, отражающие развитие растений на начальном этапе вегетативной стадии. На рис. 10 представлены графики изменения параметров ростков во времени в зависимости от типа источника излучения.

Результаты экспериментов позволяют подтвердить ранее высказанное предположение [10, 11, 15] о том, что хлорофилл в зеленой массе имеет две основные линии поглощения в красных и сине-фиолетовых лучах. Это дает возможность сделать вывод о том, что источник света должен охватывать красную и сине-фиолетовую области спектра поглощения хлорофиллов (420—640 нм) для достижения максимального эффекта фотосинтеза.

### Заключение

Установлен оптимальный спектральный состав освещения, обеспечивающий возможность эффективного управления формированием зеленой массы растений, выращиваемых в закрытом грунте.

Предложена методика расчета конструкции и параметров светодиодного осветителя, с использованием 6 типов светодиодов с длинами волн: 440, 460, 530, 590, 630 и 660 нм.

Определено значение потока фотосинтетически активной радиации — 218,45 мкмоль/с.

### Библиографический список

1. Massa G. D., Kim H.-H., Wheeler R. M., Mitchell C. A. Plant productivity in response to LED lighting // *HortScience*. 2008. V. 43, N 7. P. 1951—1956. DOI: 10.21273/HORTSCI.43.7.1951
2. Singh D., Basu C., Meinhardt-Wollweber M., Roth B. LEDs for energy efficient greenhouse lighting // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. V. 49. P. 139—147. DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.117
3. Yano A., Fujiwara K. Plant lighting system with five wavelength-band light-emitting diodes providing photon flux density and mixing ratio control // *Plant Methods*. 2012. V. 8, N 1. P. 46 (12 pp.). DOI: 10.1186/1746-4811-8-46
4. Urbonavičiūtė A., Duchovskis P., Brazaitytė A., Samuolienė G. Photophysiological investigations using light emitting diode illumination // *Rural Development*. 2009. V. 4, N 1. P. 414—417.
5. Morrow R. C. LED lighting in horticulture // *HortScience*. 2008. V. 43, Iss. 7. P. 1947—1950. DOI: 10.21273/HORTSCI.43.7.1947
6. Novičkovas A., Brazaitytė A., Duchovskis P., Jankauskienė J., Samuolienė G., Virsilė A., Sirtautas R., Bliznikas Z., Zukauskas A. Solid-state lamps (LEDs) for the short-wavelength supplementary lighting in greenhouses: experimental results with cucumber // XXVIII International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People (IHC2010): International Symposium on Greenhouse 2010 and Soilless Cultivation. 2010. Art. No. 927. P. 723—730. DOI: 10.17660/ActaHortic.2012.927.90
7. Olle M., Viršile A. The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality // *Agricultural and Food Science*. 2013. V. 22, N 2. P. 223—234. DOI: 10.23986/afsci.7897
8. Tennissen D. J., Bula R. J., Sharkey T. D. Efficiency of photosynthesis in continuous and pulsed light emitting diode irradiation // *Photosynthesis research*. 1995. V. 44, N 3. P. 261—269. DOI: 10.1007/BF00048599
9. Соколов А. В., Юферев Л. Ю. Моделирование спектров светодиодных матричных светильников // *Иновации в сельском хозяйстве*. 2014. № 2. С. 65—72.
10. Lichtenthaler H. K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes // In: *Methods in enzymology*. V. 148. N.-Y.: Academic Press Inc., 1987. P. 350—382. DOI: 10.1016/0076-6879(87)48036-1
11. Alkema J., Seager S. L. The chemical pigments of plants // *J. Chem. Educ.* 1982. V. 59, N 3. P. 183. DOI: 10.1021/ed059p183
12. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
13. Найвельт Г. С., Мазель К. Б., Хусаинов Ч. И., Затицян Г. П., Шаров Л. Н., Кузнецов С. А., Алексеев В. А., Киселев Л. М., Тихонов В. И., Шуваев Ю. Н. Источники питания

радиоэлектронной аппаратуры: справочник. М.: Радио и связь, 1985. 576 с.

14. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача: учебник для вузов. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.

15. Супельняк С. И., Адарчин С. А., Стрельченко С. С., Косухин В. Г. Разработка методики определения спектра поглощения биологических систем на примере растений // Инженерный журнал: наука и инновации. 2014. № 12(36). DOI: 10.18698/2308-6033-2014-12-1290

Статья поступила в редакцию 23 марта 2017 г.

*Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering.* 2017, vol. 20, no. 2, pp. 115—121. DOI: 10.17073/1609-3577-2017-2-115-121

## Numerical simulation and LEDs adaptation for grow lamp

S. I. Supelnyak<sup>1,§</sup>, V. G. Kosushkin<sup>1</sup>

*Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, 2 Bazhenova str, 248000, Kaluga, Russia*

**Abstract.** Solid-state lighting technology based on LEDs offers ample opportunities in plant lighting. This article presents a prototype of a solid-state lamp based on InGaN LEDs with radiation peaks of 440, 460, 530 and AlInGaP with radiation peaks at 590, 630 and 660 nm, equipped with a source of stabilized current and an optimized radiator. The emission spectrum of the LED illuminator is the result of numerical simulation using an experimentally obtained absorption spectrum of a leaf of a plant. The effect of using LEDs was compared to the effect of a sodium tubular lamp. Evaluation of the results of biometric measurements that were made throughout the experiment showed the possibility of the effect of the spectrum of the proposed LED illuminator on plant growth.

**Keywords:** light-emitting diode, solid-state lighting, illumination spectrum, absorption spectrum, adaptive lamp

### References

1. Massa G. D., Kim H.-H., Wheeler R. M., Mitchell C. A. Plant productivity in response to LED lighting. *HortScience*, 2008, vol. 43, no. 7, pp. 1951—1956. DOI: 10.21273/HORTSCI.43.7.1951

2. Singh D., Basu C., Meinhardt-Wollweber M., Roth B. LEDs for energy efficient greenhouse lighting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 49, pp. 139—147. DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.117

3. Yano A., Fujiwara K. Plant lighting system with five wavelength-band light-emitting diodes providing photon flux density and mixing ratio control. *Plant Methods*, 2012, vol. 8, no. 1, p. 46 (12 pp). DOI: 10.1186/1746-4811-8-46

4. Urbonavičiūtė A., Duchovskis P., Brazaitytė A., Samuolienė G. Photophysiological investigations using light emitting diode illumination. *Rural Development*, 2009, vol. 4, no. 1, pp. 414—417.

5. Morrow R. C. LED lighting in horticulture. *HortScience*, 2008, vol. 43, no. 7, pp. 1947—1950. DOI: 10.21273/HORTSCI.43.7.1947

6. Novičkova A., Brazaitytė A., Duchovskis P., Jankauskienė J., Samuolienė G., Viršilė A., Sirtautas R., Bliznikas Z., Zukauskas A. Solid-state lamps (LEDS) for the short-wavelength supplementary lighting in greenhouses: experimental results with cucumber. *XXVIII International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People (IHC2010): International Symposium on Greenhouse 2010 and Soilless Cultivation*, 2010, art. no. 927, pp. 723—730. DOI: 10.17660/ActaHortic.2012.927.90

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, no. 2, pp. 223—234. DOI: 10.23986/afsci.7897

8. Tennesen D. J., Bula R. J., Sharkey T. D. Efficiency of photosynthesis in continuous and pulsed light emitting diode irradiation. *Photosynthesis Research*, 1995, vol. 44, no. 3, pp. 261—269. DOI: 10.1007/BF00048599

9. Sokolov A. V., Yuferev L. Yu Modeling the spectra of LED matrix lighting. *Innovatsii v sel'skom khozyaistve = Innovations in Agriculture*, 2014, no. 2, pp. 65—72. (In Russ.)

10. Lichtenthaler H. K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. In: *Methods in enzymology*, vol. 148. New York: Academic Press Inc., 1987, pp. 350—382. DOI: 10.1016/0076-6879(87)48036-1

11. Alkema J., Seager S. L. The chemical pigments of plants. *J. Chem. Educ.*, 1982, vol. 59, no. 3, p. 183. DOI: 10.1021/ed059p183

12. Kutateladze S. S. *Teplotperedacha i gidrodinamicheskoe soprotivlenie* [Heat transfer and flow resistance]. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 367 p. (In Russ.)

13. Naivelt G. S., Mazel K. B., Khusainov Ch. I., Zatikyan G. P., Sharov L. N., Kuznetsov S. A., Alekseev V. A., Kiselev L. M., Tikhonov V. I., Shuvaev Yu. N. *Istochniki pitaniya radioelektronnoi apparatury* [Power Supplies of Electronic Equipment]. Moscow: Radio i svyaz', 1985, 576 p. (In Russ.)

14. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. *Teplotperedacha* [Heat Transfer]. Moscow: Energoizdat, 1981, 416 p. (In Russ.)

15. Supelnyak S. I., Adarchin S. A., Strelchenko S. S., Kosushkin V. G. Development of methods for determining the absorption spectrum of biological systems by an example of plants. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2014, no. 12. (In Russ.). DOI: 10.18698/2308-6033-2014-12-1290

### Information about author:

**Stanislav I. Supelnyak**<sup>1,§</sup>: Postgraduate Student (supelnyak@gmail.com); **Victor G. Kosushkin**<sup>1</sup>: Professor, Head of the Material Sciences Department (kosushkin@gmail.com)

§ Corresponding author

Received March 23, 2017

\* \* \*