

Р. Г. ГЕВОРГИЗ, С. Г. ЩЕПАЧЁВ, О. Н. КОРОЛЬ

**РАСЧЁТ СВЕТОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ФОТОБИОРЕАКТОРОВ
С ТВЕРДОТЕЛЬНЫМИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ
ИСТОЧНИКАМИ ОСВЕЩЕНИЯ**

На примере трёх ультраярких светодиодов фирмы Cree (США) приведён алгоритм расчёта энергетических характеристик оптического излучения для фотобиореакторов.

Ключевые слова: микроводоросли, светодиоды, энергетические характеристики.

Оснащение культиваторов для микроводорослей твердотельными полупроводниковыми источниками освещения (светодиодами) в значительной мере расширяет круг задач, решаемых при проектировании фотобиореакторов. У светодиодов есть ряд преимуществ в сравнении с традиционными источниками освещения [2, 9], в том числе малый размер светодиодного кристалла даёт возможность, используя RGB-технологии, создавать из набора светодиодов источник освещения с любым спектральным составом светового потока; у светодиодов минимальная теплоотдача, что позволяет разрабатывать конструкции фотобиореакторов с высокой облучённостью; используя светодиоды с различным углом светотдачи, можно легко управлять формой и размером освещаемой поверхности фотобиореактора и т. д. Важной особенностью светодиодов является то, что из всех современных искусственных источников света они обладают самым высоким энергетическим КПД [1, 2, 13]. Поэтому использование светодиодов особенно актуально в промышленных культиваторах при выращивании микроводорослей в условиях искусственного освещения. Опубликовано достаточно много работ по применению светодиодов в лабораторных исследованиях при изучении различных свойств микроводорослей [7, 12, 14 – 16].

Для измерения количества энергии оптического излучения, приходящейся на рабочую поверхность культиватора, используются различные приборы и методы [5], что приводит к выражению энергетического количества излучения в различных единицах измерения. Например, в отечественной литературе принято выражать энергию излучения в ваттах, в то время как в зарубежной чаще используют микроэйнштейны. В ряде работ [3, 11] вместо объективных величин (облучённость) используются субъективные величины (освещённость), и световые характеристики выражаются в люксах.

Конструктивные особенности некоторых фотобиореакторов либо вообще не позволяют, либо значительно затрудняют отнесение потока излучения к площади освещаемой поверхности; к примеру, когда источник света расположен внутри суспензии микроводорослей [8] или же имеет сложную систему оптических зеркально-линзовых систем [4]. В таких случаях энергию потока излучения удобней относить не к площади освещаемой поверхности, а к объёму суспензии (например, использовать единицы Вт/л).

Многообразие единиц измерения световой энергии, используемых в научных публикациях, вызывает сложности в сравнительных оценках. Для сравнения данных необходим дополнительный расчёт переходных коэффициентов, что требует знания спектров излучения источников освещения [6]. Однако в своих работах авторы не всегда приводят спектры излучения, что делает невозможным проведение сравнительных оценок. Дополнительные сложности возникают в тех случаях, когда в качестве источников освещения используются светодиоды, поскольку для них отсутствуют единые мировые стандарты и справочники спектров излучения подобно [10].

© Р. Г. Геворгиз., С. Г. Щепачёв, О. Н. Король, 2009

Кроме того, коэффициент светоотдачи и спектр излучения светодиодов могут достаточно сильно изменяться с течением времени, особенно это касается дешёвых светодиодов.

В данной работе приведён алгоритм расчёта световых характеристик для фотобиореакторов, оснащённых светодиодами.

Постановка задачи. Допустим, что в качестве источника энергии оптического излучения при культивировании микроводорослей используется светодиод с известным спектром излучения Φ_e . Пусть также известны сила света светодиода I_v и плоский угол светоотдачи θ . Требуется найти создаваемый светодиодом поток излучения Φ_e в области ФАР.

По определению [6], связь между световым потоком Φ_v и потоком излучения Φ_e имеет вид:

$$\Phi_e = \frac{1}{K_m} \cdot \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_e(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_e(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} \cdot \Phi_v = 1,464 \cdot 10^{-3} \cdot N \cdot \Phi_v, \quad (1)$$

где K_m – максимальное значение спектральной световой эффективности, равное 683 лм/Вт при $\lambda = 555$ нм; $1/K_m$ – величина механического эквивалента света¹, Вт/лм; $\Phi_e(\lambda)$ – энергетический спектр источника освещения; $V(\lambda)$ – относительная спектральная световая эффективность излучения (относительная видность) [10]; N – отношение величин полной и видимой человеческим глазом энергии оптического излучения источника; $\lambda_1 \div \lambda_2$ – диапазон области ФАР (380–710 нм)².

Следовательно, для расчёта создаваемого светодиодом потока излучения необходимо определить величину светового потока, которая выражается следующей формулой:

$$\Phi_v = I_v \cdot \Omega, \quad (2)$$

где I_v – сила света, кд; Ω – телесный угол свечения, ср. Телесный угол свечения равен:

$$\Omega = \frac{2\pi H}{R} = 2\pi \left(1 - \cos \frac{\theta}{2} \right). \quad (3)$$

Таким образом, объединяя (1), (2) и (3), выражение для потока излучения можно записать в виде:

$$\Phi_e = 1,464 \cdot 10^{-3} \cdot N \cdot I_v \cdot 2\pi \left(1 - \cos \frac{\theta}{2} \right). \quad (4)$$

Примеры расчёта. В качестве примера проведём расчёты для трёх ультраярких светодиодов фирмы Cree (США). Их характеристики представлены в табл. 1, а распределение энергии в спектре излучения – на рис. 1.

Чтобы рассчитать поток излучения, создаваемый светодиодом, необходимо в формулу (4) подставить значение силы света I_v , плоский угол светоотдачи θ и коэффициент N , который численно равен отношению площадей под кривой энергетического спектра источника излучения, $\Phi_e(\lambda)$, и видимой человеческим глазом части световой энергии, $\Phi_e(\lambda) \cdot V(\lambda)$ (см. рис. 2).

¹Значение механического эквивалента света указано для светового потока, выраженного в люменах Хефнера [6].

²В зарубежной литературе к ФАР относят диапазон 400–700 нм. С энергетической точки зрения разница составляет не более 1%.

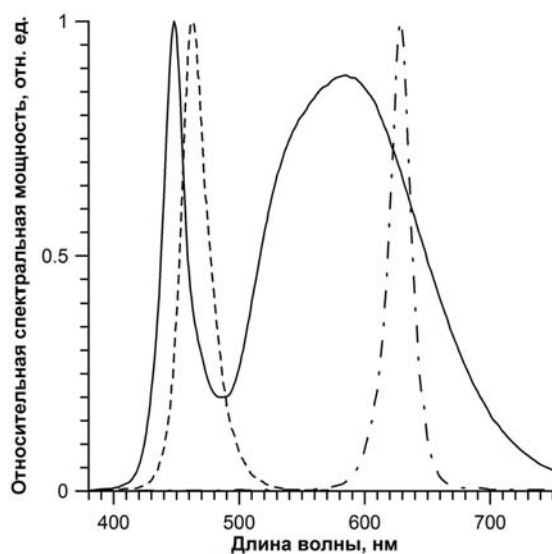


Рисунок 1. Распределение энергии в спектре белого (сплошная линия), синего (пунктирная линия) и красного (штрихпунктирная линия) ультраярких светодиодов производства фирмы Cree (США)

Figure 1. The energy spectra of white (solid line), blue (dashed line) and red (dash-dotted line) ultra-bright LEDs (Cree, USA)

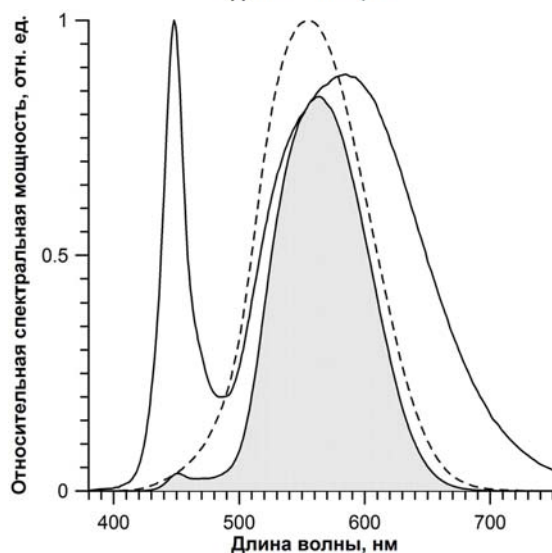


Рисунок 2. Видимая человеческим глазом часть световой энергии (заштрихованная область) в спектре белого ультраяркого светодиода CLA1A-MKW (сплошная линия) производства фирмы Cree (США). Пунктиром представлена кривая относительной видимости по ГОСТу 8.322-78 [10]

Figure 2. A visible part of the light energy (crosshatched region) of the white ultra-bright CLA1A-MKW LED (solid line). The dashed line represents a relative luminosity factor (by GOST 8.322-78) [10]

Таблица 1. Ультраяркие светодиоды фирмы Cree (США)
Table 1. Ultra-bright LEDs (Cree, USA)

Серия	Наименование	Цвет	Угол излучения, град.	Сила света, мкд
LA1	CLA1A-MKW	белый тёплый	120	2000
LV1	CLV1A-FKB	синий	120	320
LM3	CLM3C-RKW	красный	120	740

Для белого, синего и красного светодиодов поток излучения равен соответственно:

$$\Phi_e^{\text{бел}} = 1,464 \cdot 10^{-3} \cdot 2.0358 \cdot 2000 \cdot 2\pi \left(1 - \cos \frac{120}{2}\right) = 0,0294 \text{ Вт};$$

$$\Phi_e^{\text{син}} = 1,464 \cdot 10^{-3} \cdot 9,5286 \cdot 320 \cdot 2\pi \left(1 - \cos \frac{120}{2}\right) = 0,0140 \text{ Вт};$$

$$\Phi_e^{\text{кр}} = 1,464 \cdot 10^{-3} \cdot 3,1931 \cdot 740 \cdot 2\pi \left(1 - \cos \frac{120}{2}\right) = 0,0109 \text{ Вт}.$$

Здесь поток излучения Φ_e выражен в ваттах. Чтобы выразить его в эйнштейнах, необходимо:

1. Рассчитать долю световой энергии, приходящуюся на каждую длину волны из всего диапазона ФАР:

$$\delta(\lambda, \lambda + d\lambda) = \frac{\Phi_e(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{710} \Phi_e(\lambda) d\lambda}.$$

Далее будет рассматриваться дискретный случай. Формулу связи между дискретным и непрерывным случаем можно записать в виде:

$$\delta(\Delta\lambda) = \int_{\lambda_n}^{\lambda_{n+1}} \delta(\lambda) d\lambda, \quad \Delta\lambda = \lambda_{n+1} - \lambda_n.$$

2. Рассчитать количество световой энергии, которое приходится на каждую длину световой волны, т. е. умножить значение Φ_e на долю $\delta(\Delta\lambda)$ для каждой длины волны;

3. Зная долю энергии для каждой длины волны и энергию одного кванта света соответствующей длины волны, можно подсчитать число квантов, приходящееся на каждую длину волны. Связь энергии одного кванта света с его длиной волны:

$$E(\lambda) = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1,9864 \cdot 10^{-25}}{\lambda}, \quad (5)$$

где ν – частота излучения, 1/с; $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ – постоянная Планка, Дж·с; $c = 299\,792\,458$ – скорость света в вакууме, м/с.

4. Суммировать всё число квантов для всех длин волн и полученную сумму разделить на число Авогадро. В результате будет получено число молей квантов света, испускаемых источником излучения за 1 с.

Таким образом, для белого, синего и красного светодиодов поток излучения можно выразить в молях световых квантов:

$$\Phi_e^{\text{бел}} = 0,0294 \text{ Вт}, \quad \text{что означает } 0,11475 \text{ мкЕ};$$

$$\Phi_e^{\text{син}} = 0,0140 \text{ Вт}, \quad \text{что означает } 0,054788 \text{ мкЕ};$$

$$\Phi_e^{\text{кр}} = 0,0109 \text{ Вт}, \quad \text{что означает } 0,042457 \text{ мкЕ}.$$

Заключение. Следует отметить, что характеристики светодиодов, указанные производителями, не всегда соответствуют действительности [17]. Это может приводить к ошибкам в расчётах и сравнительных оценках. Поэтому к данным, которые рассчитаны на основе информации о светодиодах, взятой из публикаций, следует относиться с осторожностью.

При оснащении фотобиореакторов светодиодами в качестве источника световой энергии рекомендуется исходные данные о спектре источника излучения и его мощности подвергать регулярной проверке посредством прямых измерений с помощью спектрорадиометра и пиранометра.

В том случае, когда данные получены посредством люксметра, для перехода от освещённости к облучённости используют выражение:

$$E_e = 1,464 \cdot 10^{-3} \cdot N \cdot E_v \cdot S,$$

где E_e – облучённость, Вт/м²; N – отношение величин полной и видимой человеческим

глазом энергии оптического излучения источника, отн. ед.; E_v – освещённость поверхности, лк; S – площадь освещаемой поверхности, m^2 .

1. Бахареv И., Прокофьев А., Туркин А., Яковлев А. Применение светодиодных светильников для освещения теплиц // Современные технологии автоматизации. – 2010. – 2. – С. 76 – 82.
2. Близнюк В. В., Гвоздев С. М. Квантовые источники излучения. – М.: Вигма, 2006. – 400 с.
3. Божков А. Н., Комаристая В. П. Липидно-каротиноидный обмен в клетках *Dunaliella salina* Teod. при различных условиях культивирования // Альгология. – 2003. – 13, №2. – С. 137 – 147.
4. Воронин Г. И., Поливода А. И. Жизнеобеспечение экипажей космических кораблей. – М.: Машиностроение, 1967. – 212 с.
5. Гуревич М. М. Фотометрия (теория, методы и приборы). – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 272 с.
6. Клешина А. Ф. Растение и свет. Теория и практика светокультуры растений / Ред. акад. Курсанов А. Л., проф. Ничипорович А. А. – М.: АН СССР, 1954. – 456 с.
7. Лось С. І. Фомішина Р. М., Васильченко С. М., Сиваш О. О. Фотосинтетичний апарат Cyanophyta під впливом червоного світла // Укр. Ботан. Журнал. – 2008. – 65, №6. – С. 903 – 911.
8. Пат. 2035505 UA, МПК C12N 1/12, A01G 33/00. Биореактор для культивирования фотосинтезирующих микроорганизмов / Габель Б. В., Цоглин Л. Н., Щербачёв Р. В.; Акционерное общество ДОКА. – № a200600073. Оpubл. 20.05.1995.
9. Приказчик С. П. Исследование светотехнических параметров светодиодов // Світлотехніка та електроенергетика. – 2008. – 4. – С. 24 – 30.
10. Справочная книга по светотехнике / Ред. Айзенберг Ю. Б. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 472 с.
11. Фомішина Р. Н., Лось С. І. Адапційна змінюваність пігментів у представителів роду *Nostoc* Vauch. (Cyanophyta) в різних умовах освітлення // Альгология. – 2001. – 11, №3. – С. 327 – 333.
12. Cuaresma M, Janssen M, Vilchez C, Wijffels R. H. Productivity of *Chlorella sorokiniana* in a short light-path (SLP) panel photobioreactor under high irradiance // Biotechnol. Bioeng. – 2009. – 104. – P. 352 – 359.
13. Jao R. C., Fang W. An adjustable light source for photo-phyto related. Research and young plant production // Applied Engineering in Agriculture. – 2003. – 19 (5). – P. 601 – 608.
14. Kim N., Lee C. A Theoretical consideration on oxygen production rate in microalgal cultures // Biotechnol. Bioprocess Eng. – 2001. – 6. – P. 352 – 358.
15. Lee C.-G., Palsson B. High-density algal photobioreactors using light-emitting diodes // Biotechnology and Bioengineering. – 1994. – 44. – P. 1161 – 1167.
16. Lee C.-G., Palsson B. Light emitting diode-based algal photobioreactor with external gas exchange // Journal of Fermentation and Bioengineering. – 1995. – 79, №3. – P. 257 – 263.
17. http://www.kit-e.ru/articles/led/2005_7_16.php

Институт биологии южных морей НАН Украины,
г. Севастополь, Украина

Получено 10.11.2009

Р. Г. ГЕВОРГІЗ, С. Г. ЩЕПАЧОВ, О. Н. КОРОЛЬ

РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ФОТОБІОРЕАКТОРІВ З ТВЕРДОТЕЛЬНИМИ НАПІВПРОВІДНИКОВИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ОСВІТЛЕННЯ

Резюме

На прикладі трьох ультраярких світлодіодів фірми Cree (США) наведено алгоритм розрахунку енергетичних характеристик оптичного випромінювання для фотобіореакторів.

Ключові слова: мікродорості, світлодіоди, енергетичні характеристики.

R. G. GEVORGIZ, S. G. SCHEPACHEV, O. N. KOROL

**CALCULATION OF THE LIGHT CHARACTERISTICS FOR BIOREACTORS
WITH SOLID-STATE SEMICONDUCTOR LIGHT SOURCES**

Summary

The algorithm of calculation of energy characteristics of the optical radiation for photobioreactors is given on example of three ultra-bright light-emitting diodes (Cree, USA).

Key words: microalgae, light emitting diodes, energy characteristics.