

of parts. An optical device, a laser polariscope has been developed at the Udmurt State Agricultural University. It calculates contact stresses providing precise measurements. After statistical analysis, the contact stresses are expressed as polynomials in the sixth power (regression equations). This is sufficient to accurately define boundary conditions when solving a plane $\sigma_k = \sum_{i=0}^6 a_i x^i$ (two-dimensional) problem using trigonometric series. To automate the control system of the optical device, it is necessary to choose an appropriate component base and design an electrical circuit. The LP-1 laser polariscope is mounted on a coordinate device which shifts the laser beam in relation to the transparent model in two coordinates. The polariscope design enables the synchronous rotation of both the polarizer and the analyzer. Stepper motors are used to move the coordinate device in two coordinates and ensure synchronous rotation of the polarizer and analyzer. Stepper motors require specialized controllers (drivers) to function. These drivers produce a series of pulses at a specific frequency, controlling the motor's movement. They convert control signals from a microcontroller or PC into the power current pulses necessary for the motor to operate. The developed circuit, utilizing the BE 1105 controller and DM 542 drivers, allows for precise control of the rotational speed of the stepper motor shafts by changing the magnitude of the resistance moments; it prevents missed steps without feedback and mitigates resonant issues; it has low power consumption. The tests of the control unit have shown high reliability of the electric drive of the laser device (the dynamic safety factor is close to 6) and the accuracy of studies of the stress state in models of parts of complex shape (the discretization of linear movement of the coordinate device is 3.1 microns). Laboratory studies demonstrate that the developed device with an automatic control and management system provides the opportunity to increase the productivity at the stage of designing new products for the agro-industrial complex by at least 3.5 times.

Key words: automatic polariscope control, laser polariscope, physical stress simulation, stepper motor, stepper motor controller and driver.

For citation: Gavrilov R. I., Dorodov P. V., Petrov V. A., Toropov L. A. Development of the automatic control and management unit for the laser polariscope. The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy. 2025; 4 (84): 140-147. (In Russ.). https://doi.org/10.48012/1817-5457_2025_4_140-147.

Authors:

R. I. Gavrilov^{1✉}, Senior Lecturer;

P. V. Dorodov², Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0003-1478-5876>;

V. A. Petrov³, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

L. A. Toropov⁴, Director

^{1,2,3}Udmurt State Agricultural University, 9 Studencheskaya St., Izhevsk, Russia, 426069

⁴ООО PK SOYUZ, 142 Lenina St., Izhevsk, Russia, 426075

romanfildef@gmail.com

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare that they have no conflict of interests.

Статья поступила в редакцию 03.09.2025; одобрена после рецензирования 15.10.2025;
принята к публикации 01.12.2025.

The article was submitted 03.09.2025; approved after reviewing 15.10.2025; accepted for publication 01.12.2025.

Научная статья

УДК 631.544.45:628.94

DOI 10.48012/1817-5457_2025_4_147-156

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВЕТОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОСВЕТИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ФИТОТРОНА

Гусенников Евгений Николаевич[✉], Юран Сергей Иосифович

Удмуртский ГАУ, Ижевск, Россия

ujhuf99@gmail.com

Аннотация. Для выращивания различных видов растений требуются особые параметры искусственного освещения, поэтому возникает потребность в получении точных светотехнических характеристик осветительного оборудования. В контексте разработки фитотрона информация о данных характеристиках позволяет более точно выбирать условия роста растений, в том числе и пропорции

спектра облучения фотосинтетической активной радиацией. Цель исследования: определить светотехнические характеристики используемого оборудования, важные в контексте разработки фитотрона. Определение характеристик проводилось на основе разработанной ранее методики, суть которой заключается в сборе основных характеристик оборудования, проведении измерений при помощи люксметра с последующей обработкой полученных данных. Результат работы – спектральная характеристика фитосветильника. В качестве результатов исследования были выведены функции спектральных характеристик для люксметра, осветительного оборудования и спектра восприятия растениями света. Проведен эксперимент по измерению освещенности от осветительного оборудования при помощи люксметра. В результате обработки экспериментальных данных были получены светотехнические характеристики используемых фитосветильников. На основе этих характеристик построена спектральная характеристика осветительного оборудования и определены коэффициенты воздействия света на растения на основе фотосинтетической активной радиации. Проведено сравнение спектров, полученных теоретическим и экспериментальным методами, в результате которого были вычислены максимальная погрешность, равная 8,11 %, и средняя погрешность, равная 0,13 %. Данный уровень погрешностей принят удовлетворительным для дальнейшей разработки устройства. Результат сравнения полученных значений с измеренным спектром доказывает возможность использования разработанного метода определения светотехнических характеристик оборудования для искусственного освещения. Полученные аналитические выражения спектральных характеристик цветовых каналов осветительного оборудования будут использоваться при регулировании спектра света.

Ключевые слова: характеристики освещения, фитотрон, спектр освещения, светодиодная лента, освещение растений.

Для цитирования: Гусеников Е. Н., Юран С. И. Определение светотехнических характеристик осветительного оборудования фитотрона // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. № 4 (84). С. 147-156. https://doi.org/10.48012/1817-5457_2025_4_147-156.

Актуальность. Освещение является одним из ключевых факторов, определяющих успешность выращивания растений в закрытом грунте [3, 9, 10, 13]. Спектральный состав, интенсивность и фотопериод напрямую влияют на процессы фотосинтеза, морфогенез и качество получаемой продукции. В условиях закрытого грунта и высокотехнологичных систем выращивания правильный подбор и регулировка параметров освещения позволяют не только повысить урожайность, но и оптимизировать энергозатраты, что особенно важно для устойчивого развития АПК [11, 12, 14]. Однако для выращивания различных видов растений требуются особые параметры искусственного освещения, что обуславливает необходимость получения точных светотехнических характеристик осветительного оборудования.

В контексте разработки фитотрона проведенное исследование, включающее теоретический расчет спектра света, позволяет получить спектральную характеристику используемого оборудования в форме аналитического выражения. Данное выражение в дальнейшем будет использоваться при программной регулировке пропорций спектра, обеспечивая точное управление интенсивностью каналов WRGB. Без применения аналитических выражений точность изменения спектра существенно снижается, что может негативно сказаться на соответствии спектра требованиям растений. Таким образом, информация о спектральных характеристиках оборудования дает возможность более точно под-

бирать условия роста, включая пропорции облучения фотосинтетической активной радиацией (ФАР) [6].

Цель исследования: определить светотехнические характеристики используемого оборудования, важные в контексте разработки фитотрона.

Материал и методы исследования. Определение характеристик проводилось на основе разработанной методики [1]. Суть методики заключается в сборе основных характеристик оборудования, проведении измерений при помощи люксметра с последующей обработкой полученных данных. Результат работы – спектральная характеристика фитосветильника. Разработанная методика включает в себя следующие шаги:

- подготовка данных (характеристики светильника, ламп и люксметра);
- составление аналитических выражений (спектры люксметра, света ламп и ФАР, КСС лампы);
- эксперимент и обработка данных (измерение уровня освещенности, корректировка показаний);
- определение характеристик ламп (сила света, световой поток);
- построение спектральной характеристики светильника;
- определение уровня ФАР от светильника.

Отметим ключевые особенности методики.

Для перевода графиков в аналитическую форму используется разработанный «Элементный ряд», имеющий вид:

$$f_{\text{эл}}(\lambda) = \sum_{k=1}^n (f_{\text{эл},k}(\lambda)) \quad (1)$$

где $f_{\text{эл}}(\lambda)$ – функция кривой графика, зависящая от длины волны λ , $f_{\text{эл},k}(\lambda)$ – k -тый элемент функции кривой графика.

В свою очередь каждый элемент определяется по уравнению:

$$f_{\text{эл},k}(\lambda) = \begin{cases} 0, & \lambda < \lambda_{k,\text{нач}} \text{ или } \lambda_{k,\text{кон}} < \lambda, \\ k_k \left(\frac{1 - \cos \left(2\pi \frac{\lambda - \lambda_{k,\text{нач}}}{\lambda_{k,\text{кон}} - \lambda_{k,\text{нач}}} \right)}{2} \right)^{p_k}, & \lambda_{k,\text{нач}} < \lambda < \lambda_{k,\text{кон}} \end{cases} \quad (2)$$

где $\lambda_{k,\text{нач}}$ – длина волны, при которой начинает свое действие функция, нм; $\lambda_{k,\text{кон}}$ – длина волны, при которой заканчивает свое действие функция, нм; k_k – коэффициент влияния функции; p_k – степень кривизны функции.

Для каждого элемента $\lambda_{k,\text{нач}}$, $\lambda_{k,\text{кон}}$, k_k и p_k определяются индивидуально.

При корректировке показаний люксметра используется корректирующий коэффициент спектра люксметра, определяющийся как:

$$k_{\text{ЛКМ},i} = \frac{\int_{\lambda_{i,\text{нач}}}^{\lambda_{i,\text{кон}}} (f_i(\lambda)/f_{\text{ЛКМ}}(\lambda)) d\lambda}{\lambda_{i,\text{кон}} - \lambda_{i,\text{нач}}}, \quad (3)$$

где $k_{\text{ЛКМ},i}$ – корректирующий коэффициент люксметра для i -того цвета; $f_{\text{ЛКМ}(\lambda)}$ – функция спектра используемого люксметра; $f_{i(\lambda)}$ – функция спектра i -того цвета; $\lambda_{i,\text{нач}}$ – длина волны начала функции спектра i -того цвета, нм; $\lambda_{i,\text{кон}}$ – длина волны конца функции спектра i -того цвета, нм.

Для учета кривой силы света (КСС) лампы определяется ее аналитическая форма. Для КСС типа Д светодиода с блендой на основе закона Ламберта аналитическое выражение имеет вид [4]:

$$f_{\text{КСС}}(\varphi) = k \cdot (\cos(\varphi) - 1) + 1, \quad \left(\frac{-\varphi_{\text{pac}}}{2} < \varphi < \frac{\varphi_{\text{pac}}}{2} \right) \quad (4)$$

где $f_{\text{КСС}}(\varphi)$ – функция КСС для светодиодов типа; φ – угол падения света, град.; φ_{pac} – угол рассеивания света, град.; k – коэффициент кривизны функции КСС.

При определении силы света от отдельного источника расчет ведется через условный коэффициент освещения:

$$k_{\text{осв},i,u} = \frac{E_{i,u}}{I_i} = \frac{f_{i,\text{КСС}}(\varphi)}{r_u^2}, \quad (5)$$

где $k_{\text{осв},i,u}$ – коэффициент освещения от u -той лампы i -того цвета; $E_{i,u}$ – освещенность от u -той лам-

пы i -того цвета, лк; I_i – сила света лампы i -того цвета, кд; $f_{i,\text{КСС}(p)}$ – функция КСС для i -того цвета; φ – угол между падающим светом и нормалью к поверхности, град.; r_u – расстояние от u -той лампы до освещаемой поверхности, м.

В качестве осветительного оборудования рассматривалась светодиодная лента WRGB SMD 5050 PCB, позволяющая отдельно регулировать яркость белых, красных, зеленых и синих светодиодов. Белые светодиоды располагаются отдельно от цветных, при этом цветные светодиоды объединены в небольшой светодиодный блок с одной линзой.

Светодиоды, установленные на ленте, не имеют фокусирующих линз, следовательно, они имеют косинусную (тип Д) кривую силы света (КСС) от угла [8].

Рассматриваемый эксперимент можно представить в виде двухмерной схемы (вид спереди), так как по оси расположения светодиодной ленты камера симметрична. На рисунке 1 представлена условная схема лабораторных измерений освещенности.

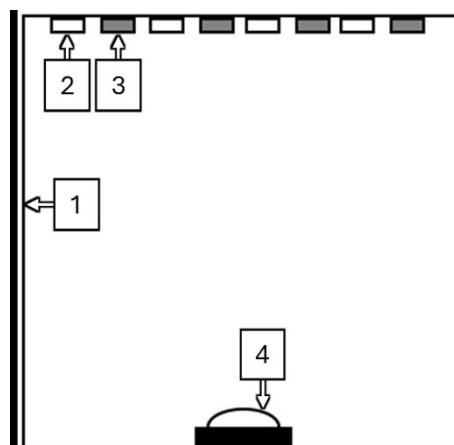


Рисунок 1 – Условная схема лабораторных измерений освещенности:

1 – камера фитотронна, 2 – светодиод белого цвета, 3 – группа светодиодов RGB, 4 – фотоэлемент люксметра

Данный эксперимент предназначен для получения промежуточных измерений уровня освещенности в рабочей точке от всех светодиодов светодиодной ленты.

Для измерения освещенности использовался люксметр типа ТКА-ПКМ(08) [5]. Данный прибор прошел поверку на заводе-изготовителе и гарантирует относительную погрешность измерения освещенности не более $\pm 8,0\%$. Диапазон измерений освещенности находится в пределах 10...200 000 лк. Датчик освещенности выполнен в виде диска с радиусом, равным 10 мм, и, соответственно, площадью поверхности, рав-

ной $3,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. Из паспортных данных о поверке люксметра типа ТКА-ПКМ(08) была получена кривая восприятия света датчиком устройства относительно длины волны [7].

Для определения уровня облучения фотосинтетической активной радиацией важно учитывать не только спектр освещения, но и спектральную характеристику уровня восприятия ФАР. Поскольку разрабатываемый фитотрон является универсальным решением, то уместно использовать спектр ФАР, подходящий для большинства видов растений, экспериментально полученный график которого изображен на рисунке 2 [10].

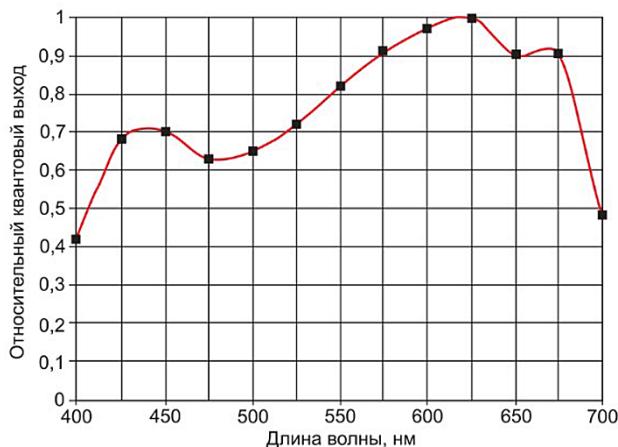


Рисунок 2 – Общепринятый спектр ФАР для большинства видов растений

Номинальный уровень облучения ФАР определяется по формуле:

$$s_{\text{ФАР},i} = I_i \cdot \int_{400}^{700} \left(\frac{f_{\text{ФАР}}(\lambda) \cdot f_i(\lambda) \cdot \lambda}{683 \cdot 119,627} \right) d\lambda, \quad (6)$$

где $s_{\text{ФАР},i}$ – номинальный уровень ФАР от светодиода i -того цвета (на расстоянии 1 м с углом падения света 0°), мкмоль/с; I_i – сила света от светодиода i -того цвета, кд; $f_{\text{ФАР}}(\lambda)$ – функция спектра ФАР; $f_i(\lambda)$ – функция спектра светодиода i -того цвета.

Результаты исследования. Составим аналитическое выражение спектральной характеристики люксметра (ЛКМ) на основе элементного ряда с двумя элементами (уравнение (1)). Подбор параметров элементов производился вручную визуальным методом, приводя аналитическую функцию в соответствие с точками из таблицы паспортных данных люксметра. Подобранные параметры представлены в таблице 1.

На основе данных параметров был построен график функции и ее составляющих, представленный на рисунке 3.

Таблица 1 – Параметры элементов функции спектральной характеристики люксметра типа ТКА-ПКМ(08)

Параметр	$f_{\text{ЛКМ},1}(\lambda)$	$f_{\text{ЛКМ},2}(\lambda)$
$\lambda_{i,\text{нач}}$, нм	425	392
$\lambda_{i,\text{кон}}$, нм	567	716
k_i	-0,19	1,00
p_i	2,10	2,20

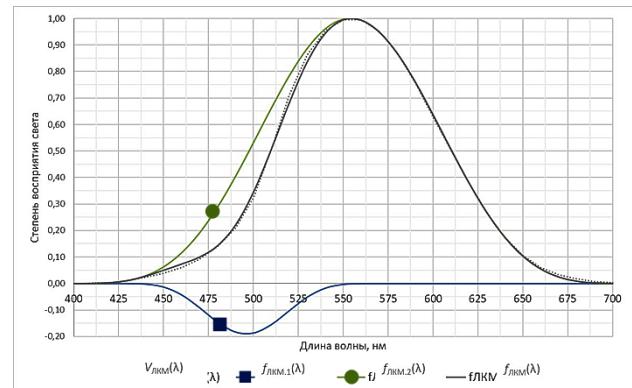


Рисунок 3 – Функция спектральной характеристики люксметра типа ТКА-ПКМ(08)

Полученная функция визуально сравнивалась с указанными в паспортных данных люксметра световой чувствительности датчика при различных длинах волн (пунктирная линия $V_{\text{лкм}}(\lambda)$). Поскольку спектральная характеристика измеряется в относительных величинах, то рассчитаем абсолютную погрешность между полученной функцией и табличными значениями из паспорта люксметра. Среднее значение погрешности составило -0,073 %, максимальное значение 2,13 %. Погрешности входят в диапазон ± 5 %, следовательно, полученная функция может использоваться для описания эмпирического графика.

Составим аналитическое выражение по формуле (4) для светодиодов SMD5050. Согласно паспортным данным светодиодов, угол рассеивания света для SMD5050 $\phi_{\text{рас}} = 120^\circ$. Примем коэффициент кривизны функции кривой силы света (КСС) для SMD5050 $k = 1,35$. На рисунке 4 представлен график полученной функции КСС.

Рассматриваемая светодиодная лента имеет светодиодные блоки белого света (W) и комбинированные блоки красного, зеленого и синего (RGB) цвета. Составим функции спектра для каждого цвета.

Для описания спектра цветов RGB применим элементный ряд с одним элементом (уравнение (2)). В таблице 2 приведены параметры для функций спектра RGB.

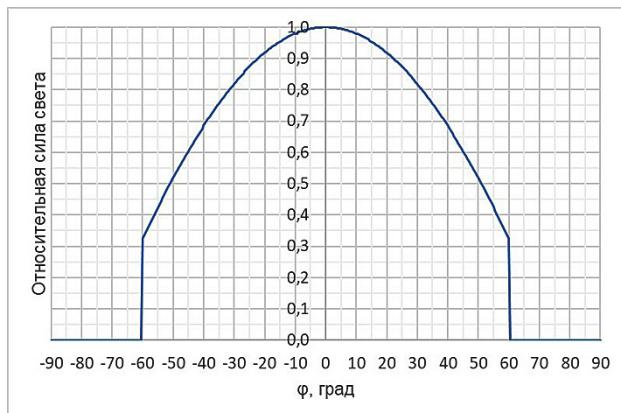


Рисунок 4 – График функции КСС SMD5050

Таблица 2 – Параметры функций спектра RGB

Параметр	$f_R(\lambda)$	$f_G(\lambda)$	$f_B(\lambda)$
$\lambda_{i,\text{нач}}$, нм	605	425	395
$\lambda_{i,\text{кон}}$, нм	660	585	528
k_i	1,0	1,0	1,0
p_i	2,0	5,0	6,0

На основе полученных параметров были построены графики (рис. 5) функций спектра RGB на одной плоскости.

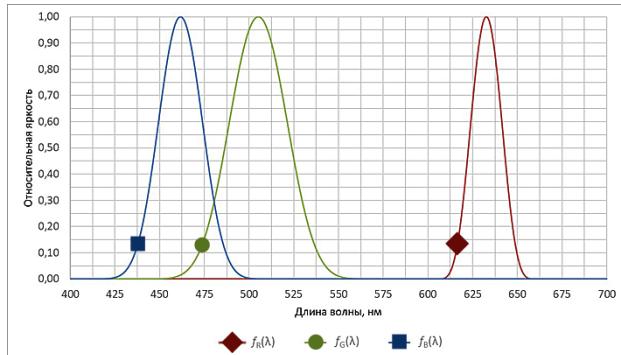


Рисунок 5 – Графики функций спектра RGB

Для описания спектра холодного белого цвета также воспользуемся элементным рядом (выражение (1)). В таблице 3 приведены параметры для элементов функции спектра белого цвета.

Таблица 3 – Параметры функций спектра белого цвета

Параметр	$f_{W,1}(\lambda)$	$f_{W,2}(\lambda)$	$f_{W,3}(\lambda)$
$\lambda_{i,\text{нач}}$, нм	398	434	439
$\lambda_{i,\text{кон}}$, нм	482	568	711
k_i	0,99	0,08	0,68
p_i	3,38	1,42	0,60

На основе полученных параметров был построен график функции спектра светодиода холодного белого цвета (рис. 6).

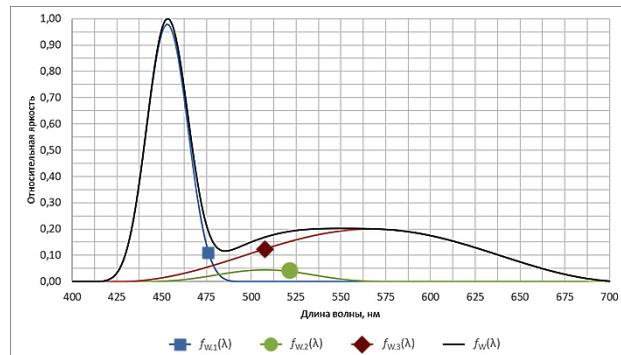


Рисунок 6 – График функций спектра светодиода белого света

Переведем полученный в результате экспериментального исследования график спектра ФАР (рис. 2) в аналитический вид по выражению на основе элементного ряда по формуле (1):

$$f_{\text{ФАР}}(\lambda) = a + \sum_{k=1}^5 (f_{\text{ФАР},k}(\lambda)), \quad (7)$$

где $f_{\text{ФАР}}(\lambda)$ — функция спектра ФАР для большинства видов растений; a — константа для подъема графика (для данного графика $a = 0,4$); $f_{\text{ФАР},k}(\lambda)$ — элементы функции спектра ФАР (см. (2)).

Параметры для функции спектра ФАР представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры функций спектра белого цвета

Параметр	$f_{\text{ФАР},1}(\lambda)$	$f_{\text{ФАР},2}(\lambda)$	$f_{\text{ФАР},3}(\lambda)$	$f_{\text{ФАР},4}(\lambda)$	$f_{\text{ФАР},5}(\lambda)$
$\lambda_{i,\text{нач}}$, нм	400	461	473	623	675
$\lambda_{i,\text{кон}}$, нм	480	755	605	673	725
k_i	0,32	0,6	-0,1	-0,05	-0,3
p_i	0,4	0,35	0,4	1,22	1

На основе полученных параметров был построен график аналитической функции спектра ФАР, изображенный на рисунке 7.

Полученная функция визуально сравнивалась с графиком ФАР, изображенным на рисунке 2 (пунктирная линия $V_{\text{ФАР}}(\lambda)$). Среднее значение погрешности составило 0,231 %, максимальное значение 2,65 %. Погрешности входят в диапазон ± 5 %, следовательно, полученная функция может использоваться для описания эмпирического графика.

Для определения создаваемого уровня яркости от одной линейки светодиодной ленты были проведены лабораторные измерения освещенности в макетной камере. Измерения проводились

в камере, выполненной из транспортировочного картона. Освещаемая поверхность имеет размеры: 220×184 мм (площадь равна 0,0405 м²). Расстояние между светодиодной лентой и датчиком люксметра 0,15 м.

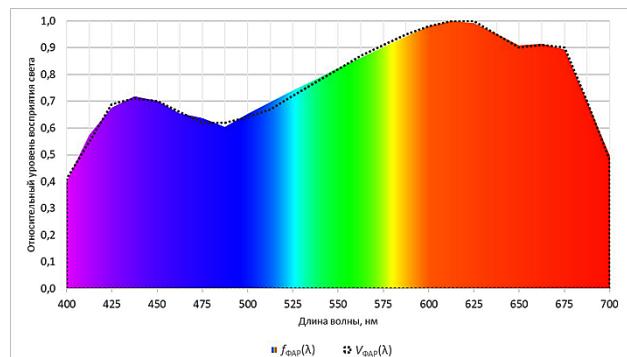


Рисунок 7 – График функций спектра ФАР

На рисунке 8 представлено фото экспериментальной камеры для проведения измерений уровня освещенности с открытыми дверцами.

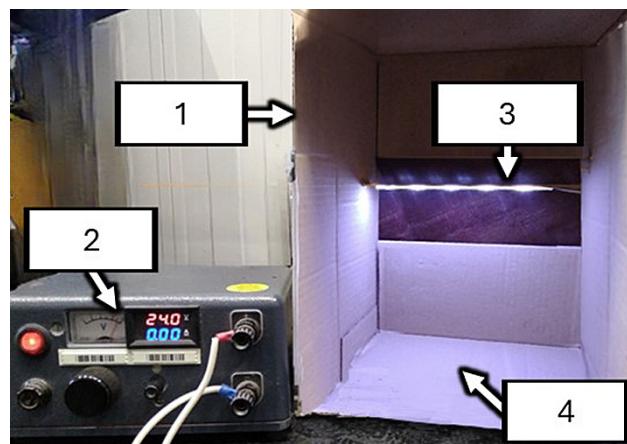


Рисунок 8 – Фото камеры для измерения уровня освещенности:

1 – картонная камера; 2 – блок питания светодиодной ленты; 3 – светодиодная лента; 4 – поверхность расположения растений в разрабатываемом фитотроне

Измерения проводились в комнатных условиях с приглушенным светом. Для чистоты эксперимента дверцы (передняя стенка) макетной камеры закрывались на время измерения. В эксперименте проверялся уровень освещенности в центральной точке поверхности расположения растений 4.

Светодиодная лента последовательно переключалась между шинами питания светодиодов для измерения освещенности от красных, зеленых, синих и белых светодиодов. Также был измерен уровень освещенности при включении всех светодиодов. Измеренные значения приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты измерения освещенности от светодиодной ленты

Цвет светодиодов	Red	Green	Blue	White	WRGB
Измеренная освещенность, лк	30,2	111,6	20,6	237,0	405,0

Для определения полной освещенности проведем корректировку показаний люксметра с помощью корректирующего коэффициента люксметра для каждого цвета светодиодной ленты по формуле (3).

В свою очередь полная освещенность рассчитывается по выражению:

$$E_{\text{полн.}i} = \frac{E_{\text{изм.}i}}{k_{\text{ЛКМ.}i}}, \quad (8)$$

где $E_{\text{полн.}i}$ – полная освещенность от i -того цвета, лк; $E_{\text{изм.}i}$ – измеренная освещенность i -того цвета, лк; $k_{\text{ЛКМ.}i}$ – корректирующий коэффициент люксметра для i -того цвета.

Для определения освещенности светодиодной ленты без отражения необходимо учесть коэффициент отражения. С этой целью данная конструкция была смоделирована в программном комплексе DiaLux Evo [2]. В компьютерном эксперименте был произведен расчет освещенности при включенном и отключенном свойстве отражения света. В результате был получен коэффициент отражения экспериментальной камеры, равный 1,053.

Определим уровень освещенности без отражения по выражению:

$$E_{\text{ламп.}i} = \frac{E_{\text{полн.}i}}{k_{\text{отр}}}, \quad (9)$$

где $E_{\text{ламп.}i}$ – освещенность, создаваемая светодиодами i -того цвета, лк; $E_{\text{полн.}i}$ – полная освещенность от i -того цвета, лк; $k_{\text{отр}}$ – коэффициент отражения экспериментальной камеры.

Результаты корректировки уровня освещенности светодиодной ленты представлены в таблице 6.

Исследуемая светодиодная лента имеет 10 светодиодных блоков с линзами. Соответственно 5 светодиодных блоков белого цвета и 5 комбинированных RGB светодиодных блоков. Для удобства белые блоки назовем W1...5, а RGB блок назовем RGB1...5. На рисунке 9 изображена планировка светодиодов на светодиодной ленте.

Таблица 6 – Результаты корректировки измерений уровня освещенности

Величина	Red	Green	Blue	White
Измеренная освещенность $E_{изм}$, лк	30,2	111,6	20,6	237,0
Корректирующий коэффициент люксметра $k_{ЛКМ.и}$	1,678	0,742	3,472	2,857
Полная освещенность $E_{полн.и}$, лк	50,7	82,8	71,5	677,0
Освещенность от светодиода $E_{ламп.и}$, лк	48,1	79,8	69,7	652,7

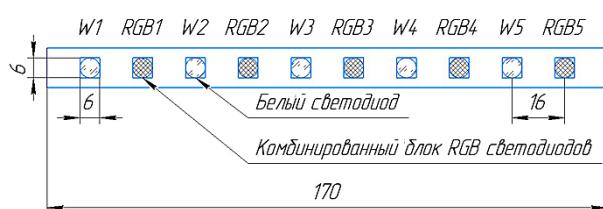


Рисунок 9 – Планировка светодиодов на светодиодной ленте

Поскольку RGB-светодиоды сгруппированы в одном светодиодном блоке, то их можно считать как единый точечный источник света, так же, как и источник белого света. Все светодиоды располагаются над фотоэлементом на одинаковой высоте, но на разных расстояниях и, следовательно, под разными углами к нормали фотоэлемента. На рисунке 10 изображен геометрический чертеж лабораторной камеры.

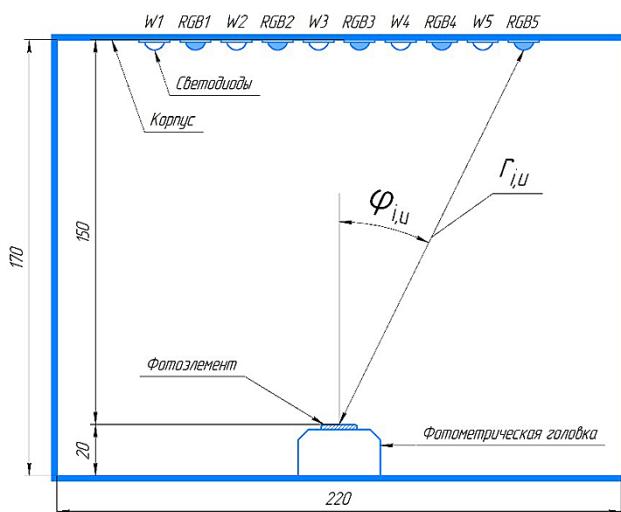


Рисунок 10 – Геометрический чертеж лабораторной камеры

Согласно методике, определим коэффициент освещения для каждой группы светодиодов по формуле (5). В таблице 7 приведены значения $k_{осв.i.u}$ для светодиодных блоков.

Таблица 7 – Коэффициенты освещения для каждого блока светодиодов

Светодиодный блок	$r_{i.u}$, мм	$\Phi_{i.u}$, град	$k_{осв.i.u}$
W1	166,39	25,63	31,3
W2	155,24	14,93	39,6
W3	150,21	3,05	44,2
W4	151,91	9,08	42,6
W5	160,11	20,47	35,7
RGB1	160,11	20,47	35,7
RGB2	151,91	9,08	42,6
RGB3	150,21	3,05	44,2
RGB4	155,24	14,93	39,6
RGB5	166,39	25,63	31,3

Вычислим силу света от светодиодов каждого цвета по уравнению:

$$I_i = \frac{E_i}{\sum_{u=1}^n k_{осв.i.u}}, \quad (10)$$

где I_i – сила света светодиода i -того цвета, кд.

Поскольку светодиодные блоки одинаковые, то определим размер телесного угла для светодиодов по уравнению:

$$\Omega_i = 2\pi \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{\Phi_{pac}}{2}\right)\right), \quad (11)$$

где Ω_i – размер телесного угла светодиода; Φ_{pac} – угол рассеивания света светодиода.

Рассчитаем световой поток светодиода каждого цвета по формуле:

$$\Phi_i = I_i \cdot \Omega_i, \quad (12)$$

где Φ_i – световой поток i -того светодиода, лм; Ω_i – размер телесного угла светодиода.

В таблице 8 представлены результаты расчета световых характеристик светодиодов каждого цвета.

Таблица 8 – Результаты расчета световых характеристик светодиодной ленты

Характеристика	Red	Green	Blue	White
E_i , лк	48,1	79,8	69,7	652,7
I_i , кд	0,25	0,41	0,36	3,37
Φ_i , лм	0,78	1,30	1,13	10,60

Для получения спектральной характеристики светодиодной ленты просуммируем относительные спектры каждого цвета (R, G, B, W) по выражению:

$$f_{\text{WRGB}}(\lambda) = \frac{(\Phi_W \cdot f_W(\lambda) + \Phi_R \cdot f_R(\lambda) + \Phi_G \cdot f_G(\lambda) + \Phi_B \cdot f_B(\lambda))}{\Phi_{\max}} \quad (13)$$

где $f_{\text{WRGB}}(\lambda)$ – функция спектра светодиодной ленты; $f_W(\lambda) \dots f_B(\lambda)$ – функции спектров светодиодов каждого цвета; $\Phi_W(\lambda) \dots \Phi_B(\lambda)$ – световой поток светодиодов каждого цвета, лм; Φ_{\max} – наибольший световой поток, получаемый при суммировании спектральных характеристик ламп, лм.

На рисунке 11 представлен график спектральной характеристики светодиодной ленты WRGB SMD5050 PCB.

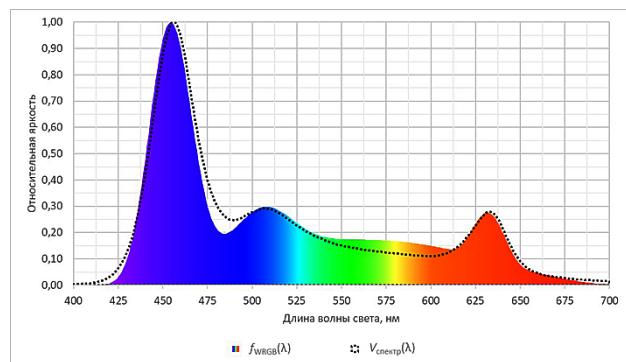


Рисунок 11 – График спектральной характеристики светодиодной ленты WRGB SMD5050 PCB

В качестве проверки и определения точности полученной функции спектра на плоскости был построен также график реального спектра $V_{\text{спектр}}(\lambda)$, измеренного в ходе измерительного исследования, проведенного ранее. Как и в случае с анализом точности функции люксметра, определялась абсолютная погрешность между полученной функцией и измеренными показаниями.

Максимальная погрешность составила 8,11 %, а средняя погрешность 0,13 %. Поскольку концепт разрабатываемого фитотрона предполагает универсальное использование, то примем данный уровень точности спектра как удовлетворительный.

Рассчитаем номинальный уровень облучения ФАР ($r_i = 1$ м, $\cos\varphi_i = 1$) для каждого цвета светодиода по формуле (6). Также определим коэффициент облучения ФАР для каждого спектра в отдельности по выражению:

$$k_{\text{ФАР},i} = \frac{S_{\text{ФАР},i}}{I_i}, \quad (14)$$

где $k_{\text{ФАР},i}$ – коэффициент ФАР от светодиода i -того цвета, мкмоль·с⁻¹/лм; I_i – сила света от светодиода i -того цвета, кд.

В таблице 9 представлены результаты расчета уровня облучения ФАР от светодиодов каждого цвета.

Таблица 9 – Результаты расчета уровня облучения ФАР от светодиодов

Характеристика	Red	Green	Blue	White	WRGB
I_i , кд	0,25	0,41	0,36	3,37	4,40
$s_{\text{ФАР},i}$, мкмоль·с ⁻¹	0,038	0,068	0,041	0,963	3,148
$k_{\text{ФАР},i}$, мкмоль·с ⁻¹ /лм	0,154	0,164	0,112	0,286	0,716

Выводы:

1. В результате проведенного исследования были получены светотехнические характеристики используемой светодиодной ленты WRGB SMD5050 PCB, а именно: сила света, световой поток, спектры света и уровень облучения ФАР.

2. Результат сравнения полученных значений с измеренным спектром доказывает возможность использования разработанного метода определения светотехнических характеристик оборудования для искусственного освещения, в том числе и фитотронов. Полученные аналитические выражения спектральных характеристик цветовых каналов осветительного оборудования будут использоваться при регулировании спектрального состава света.

Список источников

- Гусеников Е.Н., Юран С.И. Методика определения характеристик осветительного оборудования в фитотроне // Вестник НГИЭИ. 2025. № 7(170). С. 64–73. DOI 10.24412/2227-9407-2025-7-64-73. EDN KNPGON.
- Гусеников Е.Н., Юран С.И. Определение коэффициента отражения света в камере фитотрона // Современные тенденции технологического развития АПК: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посв. Десятилетию науки и технологий и 300-летию РАН, 24–26 фев. 2025 г., г. Ижевск. Ижевск: УдГАУ, 2025. С. 270–276.
- Действие светодиодного облучения разного спектрального состава на фотосинтетический аппарат растений картофеля (*Solanum tuberosum L.*) в культуре *in vitro* / Ю. Ц. Мартиросян [и др.] // Сельхозбиология. 2016. №5. С. 680–687.
- Ландсберг Г.С. Оптика. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 848 с.
- Люксметр + Пульсметр «ТКА-ПКМ»(08) с поверкой. URL: <https://clck.ru/3Qjx4h> (дата обращения 16.07.2025).
- Патент на полезную модель RU 232987 U1 Российская Федерация, МПК A01G 9/24. Фитотрон с си-

стемой бесконтактного нагрева почвы в горшках: № 2024130240: заявл.: 08.10.2024: опубл. 31.03.2025 Бюл. № 10 / С. И. Юран, Е. Н. Гусенников; заявитель ФГБОУ ВО Удмуртский ГАУ. EDN NJVPXT.

7. Приборы комбинированные «ТКА-ПКМ». Методика поверки МП-242-1969-2016. Санкт-Петербург: ФГУП ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 2016. 23 с.

8. Светодиод SMD 5050. URL: <https://clck.ru/3Qjx8T> (дата обращения 16.07.2025).

9. Туранов С., Козырева И., Яковлев А. Методы оценки качественных характеристик светодиодных световых приборов для растений // Полупроводниковая светотехника. 2014. Т. 6, № 32. С. 56–57.

10. Эшдаун, Я. Светодиодное освещение для растениеводства / Я. Эшдаун, В. Рентюк // Полупроводниковая светотехника. 2015. №4 (36). С. 26–31. URL: <https://rucont.ru/efd/411367> (дата обращения 16.07.2025).

11. Afzali S. [et al.]. Optimal Lighting Control in Greenhouses Using Bayesian Neural Networks for Sunlight Prediction. Systems and Control. 2022: 1–6. DOI: 10.48550/arXiv.2205.03733.

12. Lanoue J., Hao X., Vaštakaitė-Kairienė V., Physiological growth responses to light in controlled environment agriculture. Front Plant Sci. 2024; Dec 6; 15: 1529062. DOI: 10.3389/fpls.2024.1529062.

13. McCree, K. J. The Action Spectrum, Absorptance and Quantum Yield of Photosynthesis in Crop Plant. Agricultural and Forest Meteorology. 1972; 9.

14. Sharma A., Hazarika M., Heisnam P. [et al.]. Controlled Environment Ecosystem: A Cutting-Edge Technology in Speed Breeding. ACS Omega. 2024; 9(27): 29114-29138. DOI: 10.1021/acsomega.3c09060.

References

1. Gusennikov E N., Yuran S. I. Metodika opredeleniya xarakteristik osvetitel'nogo oborudovaniya v fitotronre // Vestnik NGIEI. 2025. № 7(170). S. 64–73. DOI 10.24412/2227-9407-2025-7-64-73. EDN KNPGON.

2. Gusennikov E. N., Yuran S. I. Opredelenie koefficiente otrazheniya sveta v kamere fitotrona // Sovremennye tendencii texnologicheskogo razvitiya APK: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posv. Desyatiliyu nauki i texnologij i 300-letiyu RAN, 24–26 fev. 2025 g., g. Izhevsk. Izhevsk: UdGAU, 2025. S. 270–276.

3. Dejstvie svetodiodnogo oblucheniya raznogo spektral'nogo sostava na fotosinteticheskij apparat rastenij kartofelya (*Solanum tuberosum L.*) v kul'ture in vitro / Yu. Cz. Martirosyan [i dr.] // Sel'khozbiologiya. 2016. №5. S. 680–687.

4. Landsberg G. S. Optika. Moskva: FIZMATLIT, 2003. 848 s.

5. Lyuksmetr + Pul'smetr «TKA-PKM»(08) s poverkoj. URL: <https://clck.ru/3Qjx4h> (data obrashheniya 16.07.2025).

6. Patent na poleznuyu model' RU 232987 U1 Rossijskaya Federaciya, MPK A01G 9/24. Fitotron s sistemoj beskontaktnogo nagreva pochvy v gorshkax: № 2024130240: zayavl.: 08.10.2024: opubl. 31.03.2025 Byul. № 10 / S. I. Yuran, E. N. Gusennikov; zayavitel' FGBOU VO Udmurtskij GAU. EDN NJVPXT.

7. Pribyr` kombinirovannye «TKA-PKM». Metodika poverki MP-242-1969-2016. Sankt-Peterburg: FGUP VNIIM im. D. I. Mendeleeva, 2016. 23 s.

8. Svetodiod SMD 5050. URL: <https://clck.ru/3Qjx8T> (data obrashheniya 16.07.2025).

9. Turanov S., Kozy'reva I., Yakovlev A. Metody` ocenki kachestvennyx xarakteristik svetodiodnyx svetovyx priborov dlya rastenij // Poluprovodnikovaya svetotexnika. 2014. T. 6, № 32. S. 56–57.

10. E'shdaun, Ya. Svetodiodnoe osveshhenie dlya rastenievodstva / Ya. E'shdaun, V. Rentuk // Poluprovodnikovaya svetotexnika. 2015. №4 (36). S. 26–31. URL: <https://rucont.ru/efd/411367> (data obrashheniya 16.07.2025).

11. Afzali S. [et al.]. Optimal Lighting Control in Greenhouses Using Bayesian Neural Networks for Sunlight Prediction. Systems and Control. 2022: 1–6. DOI: 10.48550/arXiv.2205.03733.

12. Lanoue J., Hao X., Vaštakaitė-Kairienė V., Physiological growth responses to light in controlled environment agriculture. Front Plant Sci. 2024; Dec 6; 15: 1529062. DOI: 10.3389/fpls.2024.1529062.

13. McCree, K. J. The Action Spectrum, Absorptance and Quantum Yield of Photosynthesis in Crop Plant. Agricultural and Forest Meteorology. 1972; 9.

14. Sharma A., Hazarika M., Heisnam P. [et al.]. Controlled Environment Ecosystem: A Cutting-Edge Technology in Speed Breeding. ACS Omega. 2024; 9(27): 29114-29138. DOI: 10.1021/acsomega.3c09060.

Сведения об авторах:

Е. Н. Гусенников✉, аспирант, <https://orcid.org/0009-0003-0723-4221>;

С. И. Юран, доктор технических наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0003-0440-0012>

Удмуртский ГАУ, 246069, Россия, Ижевск, ул. Студенческая, 11

ujhuf99@gmail.com

Original article

DETERMINATION OF LIGHTING CHARACTERISTICS OF PHYTOTRON LIGHTING EQUIPMENT

Evgeniy N. Gusennikov[✉], Sergey I. Yuran

Udmurt State Agricultural University, Izhevsk, Russia

ujhuf99@gmail.com

Abstract. For the cultivation of various plant species, special parameters of artificial lighting are required, therefore, it is crucial to accurately measure the lighting characteristics of the equipment used. When developing a phytotron, understanding these characteristics allows for more precise control over plant growth conditions, including fine-tuning the spectrum of photosynthetical active radiation. The purpose of the study is to determine the lighting characteristics of the equipment essential for developing a phytotron. The characteristics were determined using previously developed methodology. This approach involves collecting the primary features of the equipment, taking measurements with a luxmeter, and finally processing the obtained data. The result of the research is the spectral profile of the phytolamp. The findings of the study included the derived functions of the spectral characteristics for the luxmeter, for the lighting equipment, and for the spectrum of light perception by plants. An experiment was conducted to measure illumination from lighting equipment using a luxmeter. After processing the experimental data, the lighting properties of the applied phytolamps were determined. We designed the spectral characteristic of lighting systems on the basis of these features and determined the coefficients of light exposure for plants based on photosynthetical active radiation. The spectra from theoretical and experimental methods were compared, resulting in calculation of the maximum error of 8.11 % and the average error of 0.13 %. This level of errors is accepted as satisfactory for further development of the device. The result of comparing the obtained values with the measured spectrum proves the possibility of using the developed method for determining the lighting characteristics of artificial lighting equipment. The obtained analytical expressions for the spectral characteristics of the color channels of the lighting equipment will be used to regulate the light spectrum.

Key words: lighting characteristics, phytotron, lighting spectrum, LED strip, plant lighting.

For citation: Gusennikov E. N., Yuran S. I. Determination of lighting characteristics of phytotron lighting equipment. The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy. 2025; 4 (84): 147-156. (In Russ.). https://doi.org/10.48012/1817-5457_2025_4_147-156.

Authors:

E. N. Gusennikov[✉], Postgraduate student, <https://orcid.org/0009-0003-0723-4221>;

S. I. Yuran, Doctor of Technical Sciences, Professor; <https://orcid.org/0000-0003-0440-0012>

Udmurt State Agricultural University, 11 Studentcheskaya St., Izhevsk, Russia, 426069

ujhuf99@gmail.com

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare that they have no conflict of interests.

Статья поступила в редакцию 26.08.2025; одобрена после рецензирования 17.10.2025;
принята к публикации 01.12.2025.

The article was submitted 26.08.2025; approved after reviewing 17.10.2025; accepted for publication 01.12.2025.