

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. АГРОИНЖЕНЕРИЯ

DOI: 10.32786/2071-9485-2020-03-40

RESEARCH OF LED LUMINAIRE FOR LOCAL LIGHTING SYSTEMS IN THE AREA OF THE AGROINDUSTRIAL COMPLEX

I.V. Yudaev, E.A. Shabaev, M.M. Romanovets

*Azov-Black Sea Engineering Institute – the branch of the Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
«Don State Agrarian University»*

Received 10.07.2020

Submitted 02.09.2020

Summary

Research devoted justification rational design and operating parameters of the LED luminaire of the local lighting system in the agricultural sector. The paper presents an analysis of the distribution of illumination on the control surface, an assessment of the temperature modes of the LEDs, made working prototypes of luminaire.

Abstract

Introduction. One of the important tasks in different sectors of agriculture is to increase the uniformity of illumination of biological objects in order to increase their productivity. In this direction, the use of local LED lighting systems is promising. The parameters of the luminaires used for local lighting in the field of agro-industrial complex are not always justified. As a result, the cost of the lighting system increases and its efficiency, reliability and practical service life decrease. The aim of the study was to substantiate the rational design and operation parameters of the LED luminaire of the local lighting system, which ensures high uniformity of illumination of the control surface and the permissible temperature regime of the LED operation. **Object.** The object of research is a compact LED luminaire for local LED lighting systems in the agro-industrial complex. **Materials and methods.** Five types of polycarbonate tubes-diffusers with a diameter of 25 mm with different content of impurities in polycarbonate and a separate board with an LED without a diffuser were investigated. The determination of the operating temperature of the LED was made by an indirect method, based on the drift of the luminous flux caused by the heating of the light-emitting crystal on three types of printed circuit boards. The experimental data were processed using the Microsoft Office Excel program. **Results and Conclusions.** It has been established that for a local LED lighting system it is advisable to use polycarbonate luminaires with an average opal impurity when illuminating cages for animals and poultry, and for plant lighting – luminaires made of polycarbonate without impurities. To ensure uniform lighting conditions for poultry cages, the maximum distance between the luminaires of the developed design along the length of the test samples should not exceed 74.53 cm. High uniformity of illumination (1.196 pu) is achieved when using an individual luminaire for each cage. The use of a printed circuit board made of foil-clad fiberglass with a thickness of 1.5 mm and a copper layer of 35 microns is advisable in low-power luminaires, for example, for a local lighting system for cages for animals and poultry, and boards with an aluminum base 1 mm thick and a copper layer of 35 microns – in luminaires of medium and high power, for example, for local plant illumination.

Key words: LED, LED lighting, spot lighting, LED luminaire, lighting uniformity, LED temperature.

Citation. Yudaev I.V., Shabaev E.A., Romanovets M.M. Research of led luminaire for local lighting systems in the agro-industrial complex. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2020. 3(59). 376-387 (in Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2020-03-40.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

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

УДК 628.92/.97:[635.1/.8+636/639]

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕТОДИОДНОГО СВЕТИЛЬНИКА

ДЛЯ СИСТЕМ ЛОКАЛЬНОГО ОСВЕЩЕНИЯ В ОБЛАСТИ АПК

И. В. Юдаев, доктор технических наук, профессор

Е. А. Шабаев, кандидат технических наук, доцент

М. М. Романовец, аспирант

Азово-Черноморский инженерный институт – филиал ФГБОУ ВО «Донской государственной аграрный университет», Ростовская область, г. Зерноград

Дата поступления в редакцию 10.07.2020

Дата принятия к печати 02.09.2020

Актуальность. Одной из важных задач в разных отраслях сельского хозяйства является повышение равномерности освещения биологических объектов с целью увеличения их продуктивности. В данном направлении перспективно применение систем локального светодиодного освещения. Параметры светильников, применяемых для локального освещения в области АПК, не всегда обоснованы. Вследствие чего повышается стоимость системы освещения и снижаются ее эффективность, надежность и практический срок службы. Целью исследования являлось обоснование рациональной конструкции и параметров работы светодиодного светильника системы локального освещения, обеспечивающего высокую равномерность освещения контрольной поверхности и допустимый температурный режим работы светодиода. **Объект.** Объектом исследований является компактный светодиодный светильник для систем локального светодиодного освещения в области АПК. **Материалы и методы.** Исследованы пять видов поликарбонатных труб-рассеивателей диаметром 25 мм с различным содержанием примесей в поликарбонате и отдельная плата со светодиодом без рассеивателя. Определение рабочей температуры светодиода произведено косвенным методом, по дрейфу светового потока, вызванного нагревом светоизлучающего кристалла на трех типах печатных плат. Обработка экспериментальных данных производилась с помощью программы Microsoft Office Excel. **Результаты и выводы.** Установлено, что для системы локального светодиодного освещения целесообразно использовать светильники из поликарбоната со средним содержанием примеси опала при освещении клеток для животных и птицы, а для освещения растений – светильники из поликарбоната без примесей. Для обеспечения условий равномерности освещения клеток для птицы максимальное расстояние между светильниками разработанной конструкции вдоль длины исследуемых образцов не должно превышать 74,53 см. Высокая равномерность освещения (1,196 о.е.) достигается при использовании индивидуального светильника для каждой клетки. Применение печатной платы, изготовленной из фольгированного стеклотекстолита толщиной 1,5 мм и слоем меди 35 мкм целесообразно в светильниках малой мощности, например, для системы локального освещения клеток для животных и птицы, а платы с алюминиевым основанием толщиной 1 мм и слоем меди 35 мкм – в светильниках средней и высокой мощности, например, для системы локального освещения растений.

Ключевые слова: светодиодное освещение, локальное освещение, светодиодные светильники, равномерность освещения, температура светодиода.

Цитирование Юдаев И. В., Шабаев Е. А., Романовец М. М. Исследование светодиодного светильника для систем локального освещения в области АПК. *Известия НВ АУК.* 2020. 3(59). 376-387. DOI: 10.32786/2071-9485-2020-03-40.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении или анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение. В последние годы широкое распространение в сельском хозяйстве получили системы освещения на основе светодиодных источников света. Этому способствует ряд преимуществ таких источников света: высокая световая отдача, длительный срок службы, компактность и экологичность. Простота управления потоком излучения светодиодов позволяет создавать более эффективные системы освещения и облучения. Основ-

ным недостатком светодиодного освещения остается его высокая стоимость.

Одной из важных задач в разных отраслях сельского хозяйства является повышение равномерности освещения биологических объектов с целью увеличения их продуктивности [5-10, 12, 13, 15, 17, 18]. Перспективно в данном направлении применение систем локального светодиодного освещения [5, 10]. В таких системах для повышения равномерности используют большее количество светильников меньшей мощности, которые размещают поблизости от биологических объектов.

Параметры светильников, применяемых для локального освещения в области АПК, не всегда обоснованы [9, 10]. Следствием этого являются завышенная стоимость системы освещения, ее невысокая эффективность и надежность. Часто необходимо, чтобы такие системы обеспечивали высокую равномерность освещения контрольной поверхности. При использовании светодиодных светильников важно, чтобы в рабочем режиме не происходило перегрева светодиодов. Поэтому необходимо уделять особое внимание обоснованию параметров и режимов работы светодиодных светильников для систем локального освещения в области АПК.

Целью исследования являлось обоснование рациональной конструкции и параметров работы светодиодного светильника системы локального освещения, обеспечивающего высокую равномерность освещения контрольной поверхности и допустимый температурный режим работы светодиода.

Материалы и методы. В качестве основного конструктивного элемента светодиодного светильника приняты поликарбонатные трубы-рассеиватели диаметром 25 мм. Исследованы пять опытных образцов поликарбонатных труб-рассеивателей (рис. 1) с различным содержанием примесей в поликарбонате и отдельная плата со светодиодом без рассеивателя. Методика проведения экспериментов по определению коэффициента светопропускания исследуемых образцов рассеивателей и изучения распределения освещенности на контрольной поверхности представлена в литературном источнике [10].

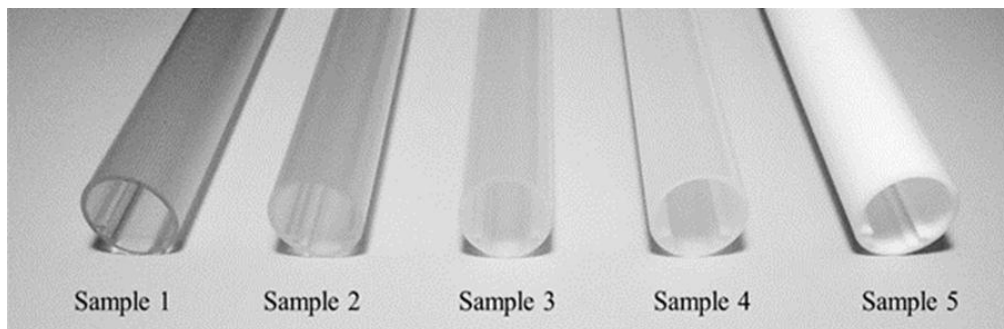


Рисунок 1 – Исследуемые образцы поликарбонатных труб-рассеивателей (Образец 1 – Образец 5)

Figure 1 – Test samples of polycarbonate tubes-diffusers (Sample 1 – Sample 5)

Определение рабочей температуры светодиодов произведено косвенным методом, по дрейфу светового потока, вызванного нагревом светоизлучающего кристалла. Использовались светодиоды средней мощности LM561B Plus фирмы SAMSUNG [11]. Эксперимент проведен на трех типах печатных плат со светодиодами (табл. 2). Плата со светодиодом располагалась в центре светильника с активной длиной 46 мм. Питание светодиода осуществлялось постоянным стабилизированным током 130 мА от лабораторного блока питания. Чувствительный элемент люксметра ТКА-Люкс находился на расстоянии 50 см от центра светоизлучающей поверхности светильника. Освещенность

измерялась в начальный момент времени включения светодиода и через 30 мин его работы, после выхода освещенности на установившееся значение. Использовались по пять опытных образцов для каждого типа плат.

Методика проведенных измерений учитывала ГОСТ Р 54350-2011. Обработка экспериментальных данных производилась с помощью программы Microsoft Office Excel.

Результаты и обсуждение. Экспериментальные данные по определению коэффициента светопропускания исследуемых образцов рассеивателей представлены в таблице 1 [10]. Распределение освещенности на контрольной поверхности вдоль длины исследуемых образцов (по оси X) приведено на рисунке 2. Данные о распределении освещенности на контрольной поверхности по оси, поперечной длине светильника (ось Y) представлены на рисунке 3.

Таблица 1 – Определение коэффициента светопропускания τ исследуемых образцов

Table 1 – Determination of the light transmission coefficient τ of the studied samples

Номер образца / Sample Number	Описание / Description	E , лк / E , lx	τ , о.е. / τ , p.u.
1	Прозрачный / Transparent	94,3	0,868
2	Опаловый S / Opal S	94,4	0,869
3	Опаловый M / Opal M	79,3	0,730
4	Опаловый L / Opal L	68,6	0,632
5	Белый / White	42,4	0,390
6	Плата без рассеивателя / Board without diffuser	108,6	1,000

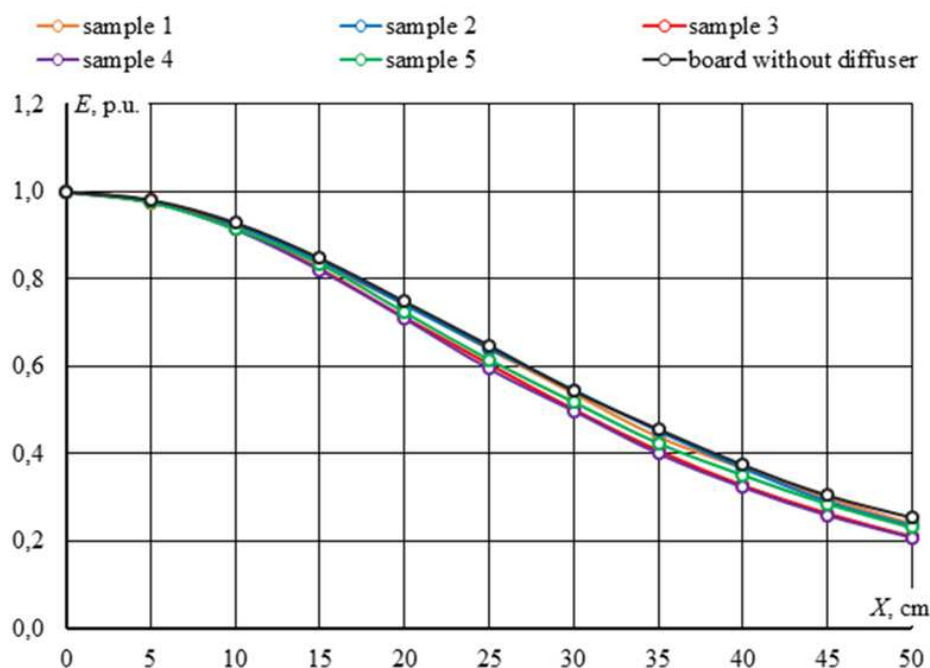


Рисунок 2 – Распределение освещенности на контрольной поверхности по оси X

Figure 2 – Distribution of illumination on the control surface along the X axis

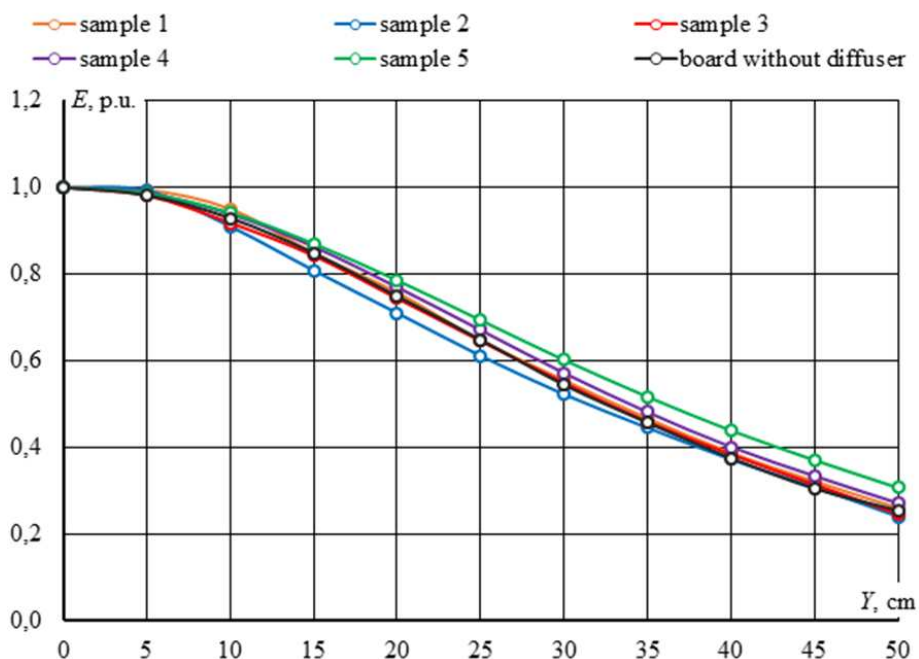


Рисунок 3 – Распределение освещенности на контрольной поверхности по оси Y
Figure 3 – Distribution of illumination on the control surface along the Y axis

Анализ светопропускания и кривых распределения освещенности исследуемых образцов труб-рассеивателей. Содержание добавочных примесей в поликарбонате существенно сказывается на коэффициенте светопропускания опытных образцов труб-рассеивателей ($\tau=0,87\dots 0,39$, таблица 1). Влияние материала образца на форму кривых изменения освещенности на контрольной поверхности по оси X (рисунок 2) – незначительное. Форма данных кривых в основном зависит от исходного светораспределения светодиода (кривая «плата без рассеивателя» на рисунке 2).

На форму кривых распределения освещенности по оси Y (рисунок 3) материал образца оказывает более сильное влияние, в особенности на начальный и средний участки. Форма кривых распределения освещенности на контрольной поверхности влияет на равномерность освещения. Наиболее высокая равномерность распределения освещенности по оси Y наблюдается у образцов 4 и 5, низкая – у образца 2 (рисунок 3). Форма остальных кривых распределения освещенности практически совпадает с формой кривой распределения светодиода (кривая «плата без рассеивателя» на рисунке 3).

Низкие значения коэффициента светопропускания у образцов 4 и 5, составляющие 0,632 и 0,390 (таблица 1), снижают КПД светильника.

В системе локального освещения растений целесообразно, с точки зрения энергоэффективности, применение исследуемого образца 1 из прозрачного поликарбоната с высоким коэффициентом светопропускания ($\tau=0,868$, таблица 1). Форма кривой распределения освещенности на контрольной поверхности близка к кривой распределения для светодиода (рисунки 2, 3).

Использование в светильниках материалов высоким коэффициентом светопропускания для систем локального освещения в животноводстве и птицеводстве повышает коэффициент слепящей блескости RG и объединенный показатель дискомфорта UGR. Проявление слепящего эффекта от светодиодных светильников может оказывать неблагоприятное воздействие на здоровье и продуктивность животных, птицы. Поэтому для данного применения целесообразно использование материалов, которые позво-

ляют более равномерно распределить световой поток от светодиода на светоизлучающей поверхности светильника. Например, в системе локального светодиодного освещения клеток для содержания птицы применен образец 3 с $\tau=0,73$ (таблица 1) [10].

Оценка неравномерности распределения освещенности на контрольной поверхности. Исследования [10] показали, что на кривую распределения освещенности оказывает влияние активная длина светильника. Дальнейшая оценка неравномерности освещенности на контрольной поверхности проводилась на примере светильника с активной длиной 46 мм для системы локального освещения клеток для содержания птицы.

Суммарная освещенность контрольной поверхности и равномерность ее освещения зависит от расстояния между ближайшими светильниками. Для изучения этой зависимости с помощью программы STATISTICA 10 были разработаны математические модели кривых распределения освещенности на контрольной поверхности следующего вида:

$$E = \exp \left\{ -x^2 / \left[k_1 \cdot \ln(|x| + k_2) \right]^2 \right\},$$

где E – освещенность, о.е.; x – координаты по оси X , см; $k_1=8,722$ и $k_2=28$ – коэффициенты модели.

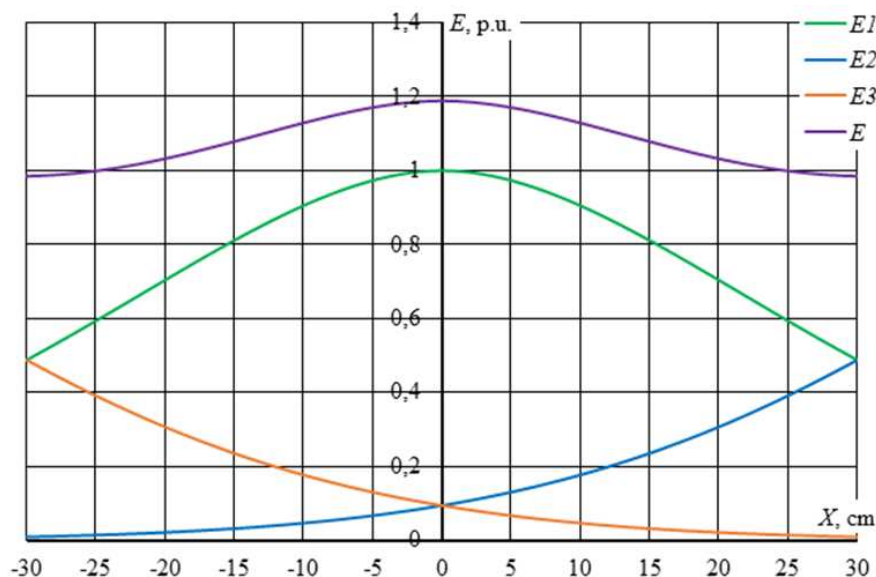


Рисунок 4 – Распределение освещенности (E) на контрольной поверхности с учетом влияния соседних светильников в ряду

Figure 4 – Distribution of illumination (E) on the control surface, taking into account the influence of neighboring luminaires in a row

Пример применения математической модели для изучения распределения освещенности на контрольной поверхности (дно кормушки) вдоль оси X для одного ряда светильников с активной длиной 46 мм при высоте подвеса 50 см и расстоянии между светильниками в ряду, равными 60 см, показан на рисунке 4, где E_1 – освещенность, создаваемая центральным светильником; E_2 и E_3 – освещенности, создаваемые светильниками слева и справа; E – суммарная освещенность.

Суммарная освещенность на контрольной поверхности с учетом влияния соседних светильников в ряду изменяется в пределах 1,189...0,985 о.е. (рисунок 4).

Численно оценить неравномерность распределения освещенности можно с помощью коэффициента предельной неравномерности освещенности $k_{нп}$, который равен предельной равномерности распределения освещенности U_d . В соответствии с СП 52.13330.2016:

$$U_d = E_{\text{мин}} / E_{\text{макс}},$$

где $E_{\text{мин}}$, $E_{\text{макс}}$ – минимальное и максимальное значение освещенности, лк.

В отраслевых нормативных документах, в том числе ОСН-АПК 2.10.24.001-04, отсутствуют нормы коэффициента равномерности освещения сельскохозяйственных зданий и сооружений. В системе локального светодиодного освещения клеток для птицы рекомендуют не превышать коэффициента предельной равномерности освещенности дна кормушки более 1,57 [9]. В растениеводстве также нет точных требований к равномерности освещения. Однако известно, что чем выше равномерность освещения, тем лучше фотосинтезирующая активность растений и соответственно больше их продуктивность [7, 8, 15, 17]. Наилучшая равномерность освещения соответствует $k_{\text{НП}}=1$. По мнению некоторых исследователей [10, 13], достаточным для обеспечения высокой продуктивности биологических объектов является значение коэффициента неравномерности освещенности равное 1,2.

При локальном освещении, применяемом для животных и птицы, уровень освещенности обычно не превышает 100 лк, а высота подвеса светильников составляет около 50 см. Для данных условий вычислено максимальное расстояние между светильниками в ряду $L=74,53$ см, соответствующее $k_{\text{НП}}=1,57$. При $L=60$ см коэффициент неравномерности равен 1,196.

В системе локального освещения растений уровень освещенности составляет более 1000 лк. Точное значение освещенности определяется видом культуры [7, 8, 17]. Освещенность поверхности пропорциональна квадрату расстояния от источника света до контрольной поверхности. Поэтому, с одной стороны, чем меньше высота подвеса светильников, тем большая освещенность создается на поверхности. С другой стороны, уменьшение высоты подвеса должно сопровождаться уменьшением расстояния между светильниками для сохранения равномерности освещения, что потребует большего их количества в системе освещения. Например, уменьшение высоты подвеса светильников с 50 см до 25 см позволяет повысить освещенность в 4 раза, при этом значение $k_{\text{НП}}$ сохранится при уменьшении расстояния между светильниками примерно в 2 раза (с 60 см до 30 см). При иной высоте подвеса светильников, определяемой технологическими условиями и требуемым уровнем освещенности, отношение высоты подвеса к расстоянию между светильниками в ряду должно составлять 0,83. Если условия применения требуют двух и более рядов светильников, тогда рекомендуется располагать их в шахматном порядке. В таком случае допустимое расстояние между светильниками может быть увеличено.

Определение температурного режима работы светодиодов. Современные белые светодиоды средней мощности имеют высокую световую отдачу, достигающую до 220 лм/Вт, и способны работать при токах в 2-3 раза выше номинального значения без существенного снижения эффективности. Поэтому применение таких светодиодов в светильниках систем локального освещения является перспективным.

Важным условием сохранения продолжительного срока службы и работоспособности светильника является обеспечение должного температурного режима работы светоизлучающего кристалла, до 70-80 °С. Хотя полупроводниковый кристалл может работать при температурах до 120 °С.

Повышение температуры светодиода приводит к ускоренной деградации кристалла и люминофора, механическим деформациям внутри корпуса, помутнению первичной оптики, что в конечном счете снижает надежность и срок службы светодиода (рисунок 5).

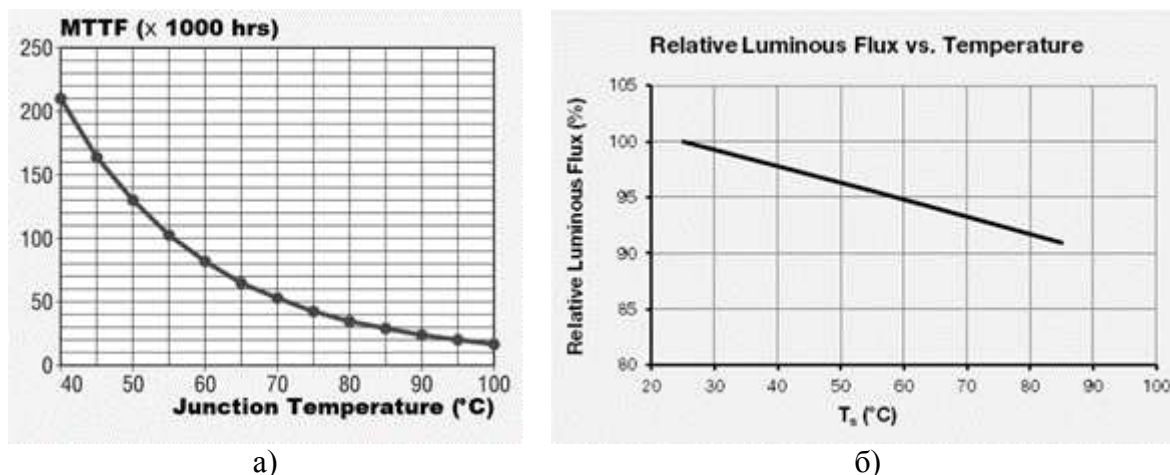


Рисунок 5 – Изменение срока службы (а) [3] и светового потока (б) светодиодов компании SAMSUNG [11]

Figure 5 – Change in the service life (a) [3] and luminous flux (b) of SAMSUNG LEDs [11]

Увеличение светового потока светодиодных светильников возможно за счет повышения рабочего тока светодиодов. Так, для светодиодов LM561B Plus [11] повышение тока в два раза от номинального значения вызывает увеличение светового потока на 87 %, потребляемой мощности в – 2,12 раза (при температуре светодиода 25 °С). Что приводит к снижению световой отдачи на 11,7 %.

На эффективность работы светодиода существенное влияние оказывает температура светоизлучающего кристалла. Повышение тока для светодиодов LM561B Plus в два раза увеличит выделяемую в нем тепловую мощность примерно в 2,42 раза [4], за счет чего процесс нагрева кристалла будет происходить более интенсивно. Например, если при температуре окружающей среды 25 °С для номинального тока 65 мА рабочая температура светоизлучающего кристалла составляет 45 °С, то повышению тока до 130 мА будет соответствовать температура 73,4 °С при неизменных условиях охлаждения.

На условия охлаждения светодиода для принятой конструкции печатной платы (рисунок 6) влияют материал платы, толщина основания платы ($h_{осн}$), толщина слоя меди (h_M), площадь медной охлаждающей поверхности ($S_{охл}$).

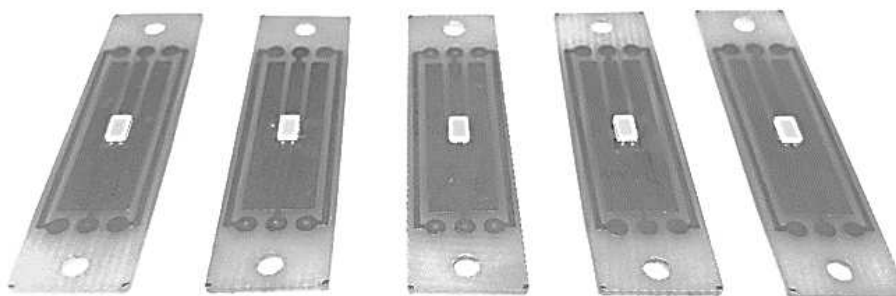


Рисунок 6 – Внешний вид исследуемых плат, изготовленных из фольгированного стеклотекстолита

Figure 6 – Appearance of the test boards made of foil-clad fiberglass

Прямое измерение температуры светодиода затруднительно. Существуют различные методы косвенного определения температуры светоизлучающего кристалла [1, 14, 16]. Оценка температурного режима работы светодиода произведена по дрейфу све-

тового потока, вызванного его нагревом (рисунок 5, б). Эксперименты проведены на трех типах плат с одинаковой площадью охлаждающей поверхности (таблица 2). Результаты опытов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Определение рабочей температуры светодиодов

Table 2 – Determination of the operating temperature of the LEDs

№ п/п	Материал основания / Base material	$h_{\text{ОСН}}$, мм	$h_{\text{М}}$, мкм	I , мА	$S_{\text{ОХЛ}}$, мм ²	$\Delta E_{\text{СР}}$, %	Δt , °С	$t_{\text{ОКР}}$, °С	t_{J} , °С
1	Стеклотекстолит (FR-4) / Fiberglass (FR-4)	1,0	18	130	117,98	6,29	42,36	25	67,36
2	Стеклотекстолит (FR-4) / Fiberglass (FR-4)	1,5	35	130	117,98	4,66	31,38	25	56,38
3	Алюминий (VT-4A2) / Aluminum (VT-4A2)	1,0	35	130	117,98	1,47	9,90	25	34,90

Анализ температурного режима работы светодиода на исследуемых платах. Температура t_{J} светоизлучающего кристалла (таблица 2) для всех плат находится в допустимых пределах, ниже 70 °С. Наибольшее значение температуры (67,36 °С) было зафиксировано на первой плате. Наиболее эффективный теплоотвод предсказуемо обеспечивает плата с алюминиевым основанием.

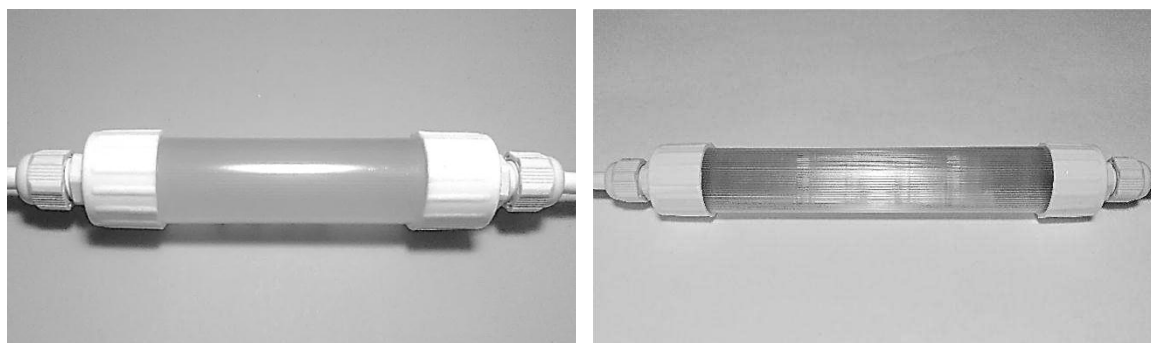
Первая плата наиболее дешева в производстве. Однако тонкий слой меди ($h_{\text{М}}=18$ мкм), несмотря на значительную площадь охлаждения, менее эффективно отводит теплоту от светодиода. Ее применение можно рекомендовать при невысоких значениях тока и небольшой концентрации светодиодов на плате [2].

Использование платы со слоем меди 35 мкм повышает ее стоимость примерно в 1,5 раза, однако позволяет существенно снизить рабочую температуру светодиода (на 11 °С) по сравнению с 18 мкм. При этом позволяет применять более плотное расположение светодиодов на плате. Имеющийся температурный запас позволяет уменьшить площадь охлаждения под светодиод.

Третья плата с алюминиевым основанием обеспечивает самую низкую рабочую температуру светодиода, которая всего на 10 °С выше температуры окружающей среды (таблица 2). Данная плата обладает наибольшей стоимостью (примерно в 6 раз выше стоимости первой платы), что делает ее применение обоснованным в светильниках с высокой концентрацией светодиодов для создания больших значений светового потока.

Целесообразно для системы локального светодиодного освещения использовать светильники из поликарбонатных труб-рассеивателей со средним содержанием примеси опала ($\tau=0,73$) при освещении клеток для животных и птицы, а для освещения растений – светильники из поликарбоната без примесей ($\tau=0,87$). Для обеспечения условий равномерности освещения клеток для птицы максимальное расстояние между светильниками разработанной конструкции вдоль длины исследуемых образцов не должно превышать 74,53 см. Высокая равномерность освещения $k_{\text{НП}}=1,196$ достигается при использовании индивидуального светильника для каждой клетки.

Применение печатной платы, изготовленной из фольгированного стеклотекстолита с $h_{\text{ОСН}}=1,5$ мм и $h_{\text{М}}=35$ мкм целесообразно в светильниках малой мощности, например, для системы локального освещения клеток для животных и птицы, а платы с алюминиевым основанием с $h_{\text{ОСН}}=1$ мм и $h_{\text{М}}=35$ мкм – в светильниках средней и высокой мощности, например, для системы локального освещения растений.



а)

б)

Рисунок 7 – Прототипы компактных светодиодных светильников для систем локального освещения клеток для животных и птицы (а) и растений (б)

Figure 7 – Prototypes of compact LED luminaires for local lighting systems for cages for animals and poultry (a) and plants (b)

Выводы. Практическим результатом проведенного исследования является изготовление рабочих прототипов компактных светодиодных светильников для систем локального освещения объектов АПК (рисунок 7), обеспечивающих высокие значения эффективности и равномерности освещения контрольной поверхности, а также щадящий температурный режим работы светодиодов для продления их срока службы.

Библиографический список

1. Азизян Г. Определение температуры р-п-перехода в светодиодных кластерах и одиночных светодиодах // Полупроводниковая светотехника. 2012. № 6. С. 31-33.
2. Анализ срока службы светодиодных излучающих элементов / В. С. Солдаткин, Ю. В. Ряполова, К. Н. Афонин, А. Ю. Олисовец, В. И. Туев // Доклады ТУСУРа. 2015. № 3 (37). С. 55-61.
3. Зенков А. Светодиоды Samsung // Современная электроника. 2009. № 5. С. 12-13.
4. Никифоров С. Исследование светодиодов средней мощности от Samsung // Полупроводниковая светотехника. 2013. № 2 (22). С. 41-44.
5. Новый способ светодиодного освещения / А. Кавтарашвили, Е. Новоторов, Д. Гладин, Т. Колокольникова // Животноводство России. 2013. № 1. С. 37-38.
6. Определение параметров светодиодного светильника для освещения животноводческих помещений / Т. А. Широкова, А. П. Ильин, И. И. Иксанов, Л. А. Шувалова // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 3-1. С. 25-27.
7. Соколов А. В., Юферев Л. Ю. Энергосберегающая система освещения для защищенного грунта // Инновации в сельском хозяйстве. 2014. № 4. С. 78-81.
8. Степанчук Г. В., Ключка Е. П. Энергосберегающие принципы для создания светового режима, повышающие продуктивность фотосинтеза растений защищенного грунта [Электронный ресурс] // Научный журнал КубГАУ. 2011. № 3 (67). URL: <http://ej.kubagro.ru/2011/03/pdf/24.pdf>.
9. Шабаев Е. А., Матвиенко Е. Ю. Обоснование параметров светодиодного излучателя системы освещения в птичнике с клеточным содержанием птицы // Вестник магистратуры. 2017. № 5-1 (68). С. 7-12.
10. Шабаев Е. А., Романовец М. М., Сагунов С. А. Обоснование конструкции компактного светодиодного светильника системы локального освещения клеток для содержания птицы [Электронный ресурс] // АгроЭкоИнфо. 2019. № 4. URL: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2019/4/st_418.doc.
11. Data Sheet LM561B Plus CRI80 Rev. 8.5. 2019. URL: https://cdn.samsung.com/led/file/resource/2019/04/Data_Sheet_LM561B_Plus_CRI80_Rev.8.5.pdf.
12. Green light drives leaf photosynthesis more efficiently than red light in strong white light: Revisiting the enigmatic question of why leaves are green / I. Terashima, T. Fujita, T. Inoue, W. S. Chow, R. Oguchi // Plant and Cell Physiology. 2014. Vol. 50 (4). Pp. 684-697. Doi: 10.1093/pcp/pcp034.

13. Kochetkov N. P., Shirobokova T. A., Gallyamova T. R. The lighting device provides uniform lighting horizontal working surface // *Applied Sciences in Europe: tendencies of contemporary 124 development: 4th International Scientific Conference*. November 4-5, Stuttgart, Germany, 2013. Pp. 40-41.
14. Relationships between junction temperature, electroluminescence spectrum and ageing of light-emitting diodes / A. Vaskuri, P. Kärhä, H. Baumgartner, O. Kantamaa, T. Pulli, T. Poikonen, E. Ikonen // *Metrologia*. 2018. Vol. 55. Pp.86-95. URL: <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aaaed2>.
15. Research of green vegetable cultivation technology under photoculture conditions in irradiation chamber / I. V. Yudaev, D. I. Charova, A. S. Feklistov, S. V. Mashkov, S. I. Vasilyev, P. V. Kryuchin, D. N. Morgunov, Y. V. Daus, N. K. Armyanov // *Advanced Agro-Engineering Technologies for Rural Business Development* / ed. by V. Kharchenko and P. Vasant. Hershey PA: IGI Global, 2019. Pp. 368-395.
16. Rudenko O. M., Strizhak P. A. Determination of the critical conditions of heat transfer in a LED // *EPJ Web of Conferences*. 2015. Vol. 82 (01036). URL: <https://doi.org/10.1051/epjconf/20158201036>.
17. Small-sized irradiation structures for intensive year-round cultivation of green vegetable crops / I. Yudaev, G. Stepanchuk, O. Kaun, M. Ukraitsev, N. Ponamareva // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 403. Iss. 1. № article 012084. Doi: 10.1088/1755-1315/403/1/012084
18. The contribution of different spectral sections to increase fresh weight of boston lettuce / S.-W. Kong, H.-Y. Chung, M.-Y. Chang, W. Fang // *HortScience*. 2015. Vol. 50 (7). Pp. 1006-1010. Doi: 10.21273/hortsci.50.7.1006

Conclusions. The practical result of the study is the production of working prototypes of compact led lamps for horizontal lighting systems of agricultural facilities (figure 7), which provide high values of efficiency and uniformity of illumination of the control surface, as well as a sparing temperature mode of operation of LEDs to extend their service life.

Reference

1. Azizyan G. Opredelenie temperatury p-n-perehoda v svetodiodnyh klasterah i odinocnyh svetodiodah // *Poluprovodnikovaya svetotekhnika*. 2012. № 6. P. 31-33.
2. Analiz sroka sluzhby svetodiodnyh izluchayuschih jelementov / V. S. Soldatkin, Yu. V. Ryapolova, K. N. Afonin, A. Yu. Olisovec, V. I. Tuev // *Doklady TUSURa*. 2015. № 3 (37). P. 55-61.
3. Zenkov A. Svetodiody Samsung // *Sovremennaya jelektronika*. 2009. № 5. P. 12-13.
4. Nikiforov S. Issledovanie svetodiodov srednej moschnosti ot Samsung // *Poluprovodnikovaya svetotekhnika*. 2013. № 2 (22). P. 41-44.
5. Novyj sposob svetodiodnogo osvescheniya / A. Kavtarashvili, E. Novotorov, D. Gladin, T. Kolokol'nikova // *Zhivotnovodstvo Rossii*. 2013. № 1. P. 37-38.
6. Opredelenie parametrov svetodiodnogo svetil'nika dlya osvescheniya zhivotnovodcheskih pomeschenij / T. A. Shirobokova, A. P. Il'in, I. I. Iksanov, L. A. Shuvalova // *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij*. 2016. № 3-1. P. 25-27.
7. Sokolov A. V., Yuferev L. Yu. Jenergosberegayuschaya sistema osvescheniya dlya zaschischnogo grunta // *Innovacii v sel'skom hozyajstve*. 2014. № 4. S. 78-81.
8. Stepanchuk G. V., Klyuchka E. P. Jenergosberegayuschie principy dlya sozdaniya svetovogo rezhima, povyshayuschie produktivnost' fotosinteza rastenij zaschischnogo grunta [Jelektronnyj resurs] // *Nauchnyj zhurnal KubGAU*. 2011. № 3 (67). URL: <http://ej.kubagro.ru/2011/03/pdf/24.pdf>.
9. Shabaev E. A., Matvienko E. Yu. Obosnovanie parametrov svetodiodnogo izluchatelya sistemy osvescheniya v ptichnike s kletochnym soderzhanijem pticy // *Vestnik magistratury*. 2017. № 5-1 (68). P. 7-12.
10. Shabaev E. A., Romanov M. M., Sagunov S. A. Obosnovanie konstrukcii kompaktnogo svetodiodnogo svetil'nika sistemy lokal'nogo osvescheniya kletok dlya soderzhanija pticy [Jelektronnyj resurs] // *AgrojekoInfo*. 2019. № 4. URL: http://agroecoinfo.narod.ru/journal/STATYI/2019/4/st_418.doc.
11. Data Sheet LM561B Plus CRI80 Rev. 8.5. 2019. URL: https://cdn.samsung.com/led/file/resource/2019/04/Data_Sheet_LM561B_Plus_CRI80_Rev.8.5.pdf.
12. Green light drives leaf photosynthesis more efficiently than red light in strong white light: Revisiting the enigmatic question of why leaves are green / I. Terashima, T. Fujita, T. Inoue, W. S. Chow, R. Oguchi // *Plant and Cell Physiology*. 2014. Vol. 50 (4). Pp. 684-697. Doi: 10.1093/pcp/pcp034.

13. Kochetkov N. P., Shirobokova T. A., Gallyamova T. R. The lighting device provides uniform lighting horizontal working surface // Applied Sciences in Europe: tendencies of contemporary 124 development: 4th International Scientific Conference. November 4-5, Stuttgart, Germany, 2013. Pp. 40-41.

14. Relationships between junction temperature, electroluminescence spectrum and ageing of light-emitting diodes / A. Vaskuri, P. Kärhä, H. Baumgartner, O. Kantamaa, T. Pulli, T. Poikonen, E. Ikonen // Metrologia. 2018. Vol. 55. Pp.86-95. URL: <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aaaed2>.

15. Research of green vegetable cultivation technology under photoculture conditions in irradiation chamber / I. V. Yudaev, D. I. Charova, A. S. Feklistov, S. V. Mashkov, S. I. Vasilyev, P. V. Kryuchin, D. N. Morgunov, Y. V. Daus, N. K. Armyanov // Advanced Agro-Engineering Technologies for Rural Business Development / ed. by V. Kharchenko and P. Vasant. Hershey PA: IGI Global, 2019. Pp. 368-395.

16. Rudenko O. M., Strizhak P. A. Determination of the critical conditions of heat transfer in a LED // EPJ Web of Conferences. 2015. Vol. 82 (01036). URL: <https://doi.org/10.1051/epjconf/20158201036>.

17. Small-sized irradiation structures for intensive year-round cultivation of green vegetable crops / I. Yudaev, G. Stepanchuk, O. Kaun, M. Ukraitsev, N. Ponamareva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 403. Iss. 1. № article 012084. Doi: 10.1088/1755-1315/403/1/012084

18. The contribution of different spectral sections to increase fresh weight of boston lettuce / S.-W. Kong, H.-Y. Chung, M.-Y. Chang, W. Fang // HortScience. 2015. Vol. 50 (7). Pp. 1006-1010. Doi: 10.21273/hortsci.50.7.1006

Information about the authors

Yudaev Igor Viktorovich, Deputy Director for Research work of the Azov-Black Sea Engineering Institute – branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Don State Agrarian University (347740, Zernograd, Lenin St., 21), professor Operation of Power Installations and Electrical Machines department, Doctor of Technical Sciences, professor.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3435-4873>. **E-mail:** etsh1965@mail.ru

Shabaev Evgeny Adimovich, Head of the Department of Operation of Power Installations and Electrical Machines of the Azov-Black Sea Engineering Institute – branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Don State Agrarian University (347740, Zernograd, Lenin St., 21), Candidate of Technical Sciences, associate professor.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2675-0670>. **E-mail:** sea007@rambler.ru.

Romanovets Mikhail Mikhailovich, Assistant of the Department of Operation of Power Installations and Electrical Machines of the Azov-Black Sea Engineering Institute – branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Don State Agrarian University (347740, Zernograd, Lenin St., 21).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1945-1744>. **E-mail:** chikamunar@yandex.ru.

Информация об авторах

Юдаев Игорь Викторович, заместитель директора по научной работе Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО Донской ГАУ (РФ, Ростовская область, Зерноградский р-н, г. Зерноград, ул. им. Ленина, 21), профессор кафедры «Эксплуатация энергетического оборудования и электрические машины», доктор технических наук, профессор.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3435-4873>. **E-mail:** etsh1965@mail.ru.

Шабает Евгений Адимович, заведующий кафедрой «Эксплуатация энергетического оборудования и электрические машины» Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО Донской ГАУ (РФ, Ростовская область, Зерноградский р-н, г. Зерноград, ул. им. Ленина, 21), кандидат технических наук, доцент.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2675-0670>. **E-mail:** sea007@rambler.ru.

Романовец Михаил Михайлович, ассистент кафедры «Эксплуатация энергетического оборудования и электрические машины» Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО Донской ГАУ (РФ, Ростовская область, Зерноградский р-н, г. Зерноград, ул. им. Ленина, 21).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1945-1744>. **E-mail:** chikamunar@yandex.ru.