На правах рукописи

Галлямова Татьяна Ратмировна

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И РАВНОМЕРНОСТИ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ПТИЧНИКА

05.20.02 – электротехнологии
и электрооборудование в сельском хозяйстве

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2016

Работа выполнена на кафедре «Электротехники, электрооборудования и электроснабжения» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ижевская государственная сельскохозяйственная академия» (ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА)

Научный руководитель – **Широбокова Татьяна Александровна** кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Овчукова Светлана Александровна** доктор технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение и техническая диагностика», ФГБОУ ВО «Марийский государственный университет»

Юферев Леонид Юрьевич доктор технических наук, доцент, временно исполняющий обязанности директора ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет) г. Челябинск

Защита состоится «6» сентября 2016г. в 12^{00} на заседании диссертационного совета Д.006.037.01 при Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства» (ФГБНУ ВИЭСХ) по адресу: 109456, Москва, 1-й Вешняковский проезд, д.2.

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБНУ ВИЭСХ и на официальном сайте www.viesh.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, скреплённые гербовой печатью, просим направлять учёному секретарю совета по адресу: 109456, г. Москва, 1-й Вешняковский проезд, д.2.

Автореферат разослан «9» июня 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук

Некрасов
Алексей Иосифович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из приоритетных направлений развития науки, технологий и техники являются энергоэффективность и энергосбережение. Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии согласно указу президента от 7 июля 2011г. входят в перечень критических технологий. Федеральный закон от 23 ноября 2009г (новая редакция от 15.07.2015г) №261 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» устанавливает ряд ограничений в области использования ламп накаливания.

До появления ФЗ №261 модернизация системы освещения осуществлялась за счёт замены ламп накаливания на энергосберегающие люминесцентные лампы. При этом достоинством такой замены являлась экономия электроэнергии до 30% - 40%. Недостатки люминесцентных ламп - невозможность регулирования освещенности, эффекты мерцания, содержание вредного для здоровья человека и животных ртути, проблемы утилизации – значительно ограничивают перспективу практического использования их в птицеводстве.

В 2000-х гг. лампы накаливания и люминесцентные лампы начали заменять лампами на основе светодиодов. Анализ такой модернизации показал, что эффективность замены оценивается относительно энергопотребления ранее применявшихся ламп накаливания, а вопросы повышения эффективности светодиодного освещения являются малоизученными. Исследования учёных доказывают, что при напольном содержании родительского стада кур наилучшими являются светодиоды белого тёплого цвета.

Повышение эффективности светодиодного освещения для напольного содержания кур является актуальной проблемой. Для решения проблемы необходимо, прежде всего, создать режим наименьшего энергопотребления светодиодов и наиболее равномерного освещения при заданной величине нормированной освещённости птичника. В этом смысле энергопотребление можно считать оптимальным, если отличие средней освещённости, создаваемой светодиодами, от заданной величины нормированной освещённости будет минимальным. Параметры, от которых зависит энергопотребление и качество светодиодного освещения, являются основными параметрами светодиодного освещения птичника. Для обоснованной оценки основных параметров необходимы исследования.

Цель работы – повышение эффективности и равномерности светодиодного освещения птичника с напольным содержанием кур за счёт оптимального энергопотребления и повышения качества освещения при заданной величине нормированной освещённости.

Объект исследования - светодиодное освещение для напольного содержания кур, позволяющее повысить их продуктивность при оптимальном энергопотреблении.

Предмет исследования – закономерности пространственного распределения светового потока светодиодных светильников, обеспечивающие норми-

руемую освещённость на плоской (горизонтальной) рабочей поверхности.

Задачи исследования.

1.Обосновать актуальность исследований и возможность повышения эффективности и равномерности светодиодного освещения для напольного содержания кур.

2.Разработать математическую модель, позволяющую методом оптимизации оценить энергопотребление птичника при его наиболее равномерном освещении.

3.Разработать компьютерную программу для оценки оптимального энергопотребления птичника.

4.Разработать и изготовить опытные образцы светодиодных светильников и провести исследования освещённости для обоснования применимости математической модели.

5.Провести производственные испытания и выполнить технико-экономическое обоснование использования светодиодных светильников при напольном содержании промышленного родительского стада кур.

Научную новизну работы представляют:

1.Математическая модель освещённости птичника, позволяющая методом оптимизации оценить энергопотребление птичника при его наиболее равномерном освещении;

2. Методика компьютерных исследований по оценке оптимального энергопотребления и результаты компьютерных расчётов освещённости птичника;

3. Научно обоснованная конструкция светильника с линейками светодиодов.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы применялись аналитические, компьютерные и экспериментальные методы исследования. При разработке математической модели использован метод физического моделирования с представлением Фурье для периодической функции и метод нулевого порядка теории оптимизации для задачи нелинейного программирования. Исследования проводились с использованием основных законов светотехники, геометрии, тригонометрии, дифференциального и интегрального исчисления. Компьютерные расчёты проводились в среде Pascal с конвертацией файлов для обработки в «Microsoft Excel», Mathcad 15.

Достоверность результатов исследований подтверждена совпадением экспериментальных и расчётных результатов по предложенным автором методикам, положительными результатами при испытании на экспериментальной площадке птицефабрики «Удмуртская» г. Глазова УР разработанных светильников, что подтверждается Актами и Протоколами испытаний.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель освещённости птичника с оценкой оптимального энергопотребления, обеспечивающего эффективный режим освещения;
2. Методика компьютерного исследования и результаты компьютерных расчётов освещённости птичника, позволяющие обосновать конструкционные параметры системы освещения птичника;
3. Научно обоснованные конструкционные параметры светодиодного светильника, обеспечивающие нормированную величину освещённости и наиболее равномерное освещение птичника, позволяющие повысить продуктивность родительского стада кур;
4. Результаты исследований освещённости, создаваемой изготовленными опытными образцами светильников, которые позволяют оценить применимость математической модели и её компьютерной реализации при разработке энергоэффективной системы светодиодного освещения.

Практическую значимость работы представляют:
разработанная конструкция светодиодного светильника и рекомендации по повышению эффективности светодиодного освещения птичников с напольным содержанием кур.

Реализация результатов исследований.

Работа проведена в соответствии с планом НИОКР ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА, регистрационный номер 01200951811 «Повышение эффективности работы технологических энергоустановок в сельском хозяйстве Удмуртской Республики». Разработанные рекомендации по определению светотехнических и конструктивных параметров светодиодного светильника для освещения кур при напольном содержании приняты к внедрению в «Региональном научно-технологическом парке «Удмуртия» г. Ижевск, на птицефабрике «Удмуртская» г. Глазова УР. Результаты исследований используются в учебном процессе по дисциплине «Светотехника» в ФГБОУ ВО: «Ижевская ГСХА», «Южно – Уральский ГАУ» г. Челябинск и «Саратовский ГАУ им. Вавилова».

Апробация результатов исследования.

Материалы теоретических и экспериментальных исследований доложены и одобрены на Всероссийских научно-практических конференциях ФГБОУ ВО «Ижевская ГСХА» (2011…2015 гг.); Международных научно-технических конференциях «Энергообеспечение и энергоснабжение в сельском хозяйстве» 12-16 мая 2012г, 21-22 мая 2014г, 24-25 мая 2016 г., 6-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Инновации в сельском хозяйстве» 15-16 декабря 2015 г., Москва, ФГБНУ ВИЭСХ; 4th International ScientificConference*“Applied Sciencesin Europe: tendencies of contemporary development”:* Papers of the 4th International Scientific Conference. November 4-5, Stuttgart, Germany 2013г; LIII Международной научно-технической конфе-

ренции «Достижения науки – агропромышленному производству» 29-31 января 2014г, Челябинск, ФГБОУ ВПО ЧГАА.

Публикации результатов исследований. Основные положения теоретических и экспериментальных исследований отражены в 18 печатных работах, в том числе: 4 работы в издании, указанном в «Перечне рецензируемых журналов» Минобразования и науки РФ, 1 статья в иностранном журнале, 2 патентах РФ и свидетельстве о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Работа содержит 140 страниц машинописного текста, 48 иллюстрации, 18 таблиц, приложения и список литературы из 112 наименований, в том числе 14 на иностранном языке.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, выделены объект и предмет исследования, а также приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Состояние вопроса и задачи исследования» представлено современное состояние птицеводческого комплекса России и перспективы его развития. Изучена роль светового режима в создании микроклимата птичника и проведён анализ существующих источников искусственного освещения птицеводческих помещений. Систематизация имеющихся литературных данных в области разработки технологического оборудования для освещения при напольном содержании промышленного родительского стада кур, таких авторов как: Пигарев Н.В., Юрков В.М., Кавтарашвили А.Ш., Фисинин В.И., Стребков Д.С., Кондратьева Н.П., Овчукова С.А., Юферев Л.Ю., Алфёрова Л.К. Шанцин В.А., Колокольникова Т.Н., Малышев В.В., Михалёв А.А. и др., а также в области светотехники –Эленбаас В., Уэймаус Д., Рохлин Г.Н., Кнорринг Г.М., Айзенберг Ю.Б., Мешков В.В., Козинский В.А., Трембач В.В. и др., позволили получить рекомендации по совершенствованию процесса освещения птичника с напольным содержанием кур, разработать конструктивные решения и выявить достоинства и недостатки моделей светодиодных светильников.

Изучены особенности содержания кур кросса ROSS-308 и проблемы освещения при напольном содержании птиц. После рассмотрения методов решения проблемы равномерного освещения птичника с напольным содержанием кур сформулированы выводы из анализа состояния вопроса и поставлены задачи исследования.

Во второй главе «Теоретические аспекты равномерного освещения поверхности при помощи точечных источников света» рассмотрены модели светильников с точечными источниками света, на основе которых разработана математическая модель освещённости птичника, позволяющая методом оптимизации оценить энергопотребление птичника при его наиболее равномерном ос-

вещении. При разработке математической модели применён метод физического моделирования для аналогичных явлений.

Для точечных источников света со стандартными типами кривых сил света (КСС): М (равномерная), Д (косинусная), Г (глубокая), Л (полуширокая) и Ш (широкая) проведена оценка эффективности их КСС.

В качестве критериев эффективности КСС приняты: 1) величина светового потока Φ, необходимая для создания нормируемой освещенности на горизонтальной поверхности; 2) доля светового потока, приходящегося на расчётную поверхность– коэффициент K_Φ; 3) величина коэффициента неравномерности освещаемой поверхности Z. Наиболее эффективной КСС будет обладать тот светильник, у которого Φ - минимален, а K_Φ и Z близки к единице.

Распределение освещенности по рабочей поверхности получено из основного закона светотехники

$$E = \frac{I_\alpha \cdot cos^3\alpha}{h^2}, \qquad (1)$$

где I_α - сила света в направлении угла α, кд; h - высота подвеса точечного источника света, м.

Коэффициент неравномерности освещения Z определяется формулой

$$z = \frac{E_{max} + E_{min}}{2 \cdot E_{min}}, \qquad (2)$$

где $E_{мах}, E_{мин}$ - максимальная и минимальная освещенности на рабочей поверхности, лк.

Коэффициент неравномерности является параметром, определяющим качество освещения, и рекомендуется в интервале $1{,}1 \le Z \le 1{,}15$.

Полученные значения расчётных освещённостей в относительных единицах и коэффициенты неравномерности освещения, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения расчётных освещённостей и коэффициенты неравномерности освещения Z поверхности источников света со стандартными КСС.

Тип КСС	М	Д	Г	Л	Ш
$E_{мин}$	1	1	1	1	1
$E_{макс}$	2,83	4	10,4	1,56	1,92
Z	1,91	2,5	5,71	1,28	1,46

Оценка эффективности светильников со стандартными КСС показывает (табл. 1), что они не удовлетворяют требованию $Z<1{,}15$.

Поиск светильника с эффективной КСС, математическая модель КСС которой согласно Кнорингу Г. М. имеет вид

$$I_\alpha = \frac{I_0}{cos^3\alpha}, \qquad (3)$$

где I_0 - постоянная величина, кд.

приводит к минимальному световому потоку и коэффициенту $Z=1$. Здесь и выше α - это угол раскрытия светового потока точечного источника, связанный с показателем степени m в виде

$$m=\frac{ln(0,5)}{ln[cos(0,5\cdot\alpha)]}, \qquad (4)$$

формула получена из выражения для кривой силы света круглосимметричного точечного источника $I_\alpha=I_0\,(cos\alpha)^m$ при $I_\alpha = 0.5I_0$. КСС по формуле (3) – КСС типа И (специальная). В дальнейшем светильник с КСС типа Г исключён из рассмотрения, как наименее эффективный.

После точечных светильников исследована эффективность линейных светильников, имеющих в поперечной плоскости стандартные типы КСС и специальную (И).

Значения расчётных освещённостей в относительных единицах приведены на рис. 1, а величины световых потоков Ф (о.е.) на рис. 2.

Анализ полученных результатов показывает, что с уменьшением Z (при фиксированной нормируемой освещённости на горизонтальной рабочей поверхности) уменьшается и суммарный световой поток, а при минимальной неравномерности освещения Z = 1 нормируемая освещённость обеспечивается при минимальном световом потоке.

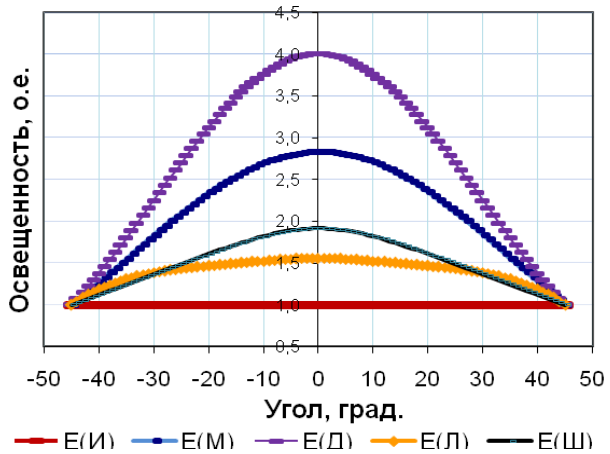


Рисунок 1 - График освещённости рабочей поверхности в поперечной плоскости симметрии от линейных светильников с разными типами КСС (максимумы Е, о.е. кривых в порядке убывания: Д, М, Ш, Л, И)

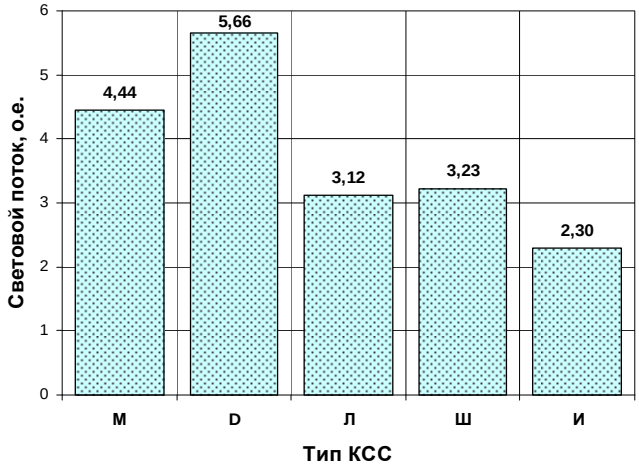


Рисунок 2 - Световой поток линейных светильников с разными типами КСС, обеспечивающий нормируемую освещённость на горизонтальной рабочей поверхности в поперечной плоскости симметрии светильника

В системах освещения птичников преобладают линейные светильники, поэтому в практических целях модель непрерывного светораспределения в линейных светильниках можно заменить моделью дискретного распределения точечных направленных источников света. В качестве точечного источника света выбраны светодиоды (далее CD), расположенные на линейках светильника на малом (по сравнению с длиной линейки) расстоянии друг от друга. Линейки CD расположены в светильнике радиально под одинаковыми углами друг к другу.

Проведённые оценки эффективности, по критериям аналогичным для стандартных КСС показывают, что коэффициент $K_Ф$ близок к *1* для углов раскрытия α от 15° до 30° при *m* от *100* до *20*. Неравномерность освещения *Z* близкая к *1* достигается для числа светодиодных линеек *j*=7. Угол раскрытия светового потока одного CD α(от 15° до 30°) будет использоваться в дальнейшем независимо от их числа.

Так как нормируемую освещённость можно обеспечить *меньшим* световым потоком, которому соответствует *меньшее Z*, то в дальнейшем принимаем, что коэффициент *Z* удовлетворяет условию

$$1 < Z < 1{,}1. \qquad (5)$$

Освещённость от всех светодиодов *E* в точке *(x,y)*, определяется по принципу суперпозиции

$$E(x,y)=\sum_{k=1}^{N} E_k(x,y,k)\ , \qquad (6)$$

где число слагаемых в сумме равно числу всех светодиодов *N*, системы освещения птичника. Потребляемая мощность *P* системы освещения птичника явно зависит от *N*:

$$P=p_1 \cdot N \qquad (7)$$

где p_1 – мощность одного CD, Вт, а *N* – число CD - основной параметр и подлежит оптимизации при требуемом уровне освещённости.

Для расчётной оценки оптимального значения *N* при ограничении для *Z* по (5) предложена *математическая модель* освещённости птичника, учитывающая влияние всех *N* светодиодов в данной точке.

Освещённость E_k в (6), создаваемая точечным CD с номером *k* в точке (*x,y*) выражается в виде

$$E_k(x,y,k)=\frac{I_0 \cdot \cos^{m+1}\theta(x,y,k)}{r_k^2} \qquad (8)$$

где $\theta(x,y,k)$ – угол между осевой силой света CD и направлением на точку (*x,y*), I_0– осевая сила света CD с номером *k*, а показатель степени *m* связан с углом раскрытия светового потока одного CD по (4).

Расстояние r_k в (8) выражается через пространственные координаты светодиода x_s, y_s, z_s. Если светодиоды расположены на линейках с шагом λ, а светильники размещены на высоте *H* по линиям, расстояние между которыми L_0, то координаты светодиода x_s, y_s, z_s вычисляются соответственно через λ, L_0 и *H*. Для задания y_s и z_s надо знать угол между линейками γ и номер линейки из заданного числа линек *j* в светильнике. Для расчёта освещённости по (8) необходимо знание параметров γ, *j*, λ, L_0 и параметров светодиода I_0 и α, а также величины *H*, которая известна заранее. При выбранном CD величины I_0, α заданы. При выбранном числе линеек *j*, угол между линейками при равномерном распределении в пределах угла ослеплённости определится как

$$\gamma = \frac{\pi}{2(j-1)}. \qquad (9)$$

Для m порядка *100* определено число линеек в светильнике $j=7$.

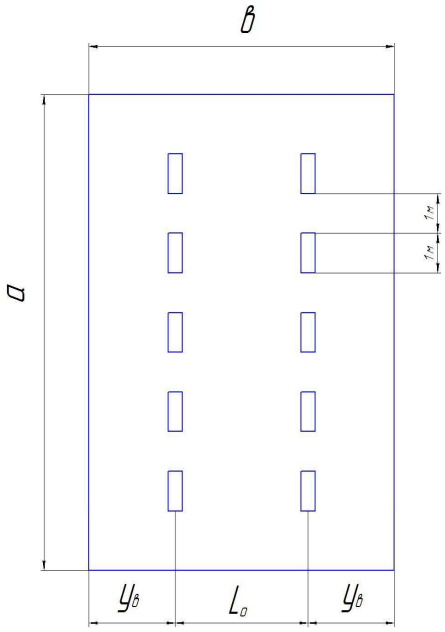


Рисунок 3 – Схема расположения светильников в птичнике

Для расчёта освещённости по (6), надо знать величину N, её распределение по светильникам, длину светильника и расстояние между ними в линии. Между параметрами λ и N можно установить зависимость при допущении: длина светильника и расстояние между светильниками в линии составляет 1м. Тогда число светильников S_0 в птичнике (рис. 3) будет

$$S_0 = \frac{a \cdot N_L}{2}, \qquad (10)$$

где a –длина птичника, м; N_L – число линий со светодиодными светильниками в системе освещения, связанное с шириной птичника b, *м* и расстоянием первой и последней линий от стен птичника y_b, *м* как

$$b=(N_L-1)\cdot L_0 + 2y_b. \qquad (11)$$

Если в одном светильнике N_1, j и n_1 выражают соответственно число светодиодов, число линеек и число CD на линейке также длиной 1м, то

$$N=S_0 \cdot N_1; \qquad N_1=j \cdot n_1; \qquad \lambda=\frac{1}{n_1}. \qquad (12)$$

Используя (10), (11) и (12), получим связь между λ и N в виде

$$\lambda = \left(\frac{a \cdot j}{2N}\right)\cdot\left(1+\frac{b-2y_b}{L_0}\right)=\left(\frac{a \cdot j}{2N}\right)\cdot N_L \qquad (13)$$

Для оценки величин, входящих в (13) и установления связей между ними и высотой подвеса светильников H применён метод физического моделирования для аналогичных явлений (рис.4), с помощью которого получены следующие аналитические зависимости:

- между высотой подвеса светильников H и расстоянием между линиями L_0 через коэффициент неравномерности освещения Z в виде функции $f(z)$ (рис.5):

$$\frac{H}{L_0} = f(z)=\frac{1}{2\pi}\cdot ln\left(\frac{z}{z-1}\right); \qquad (14)$$

- между шириной птичника b и расстоянием L_0 между линиями светильников в виде

$$L_0 = 2b/n, \quad \text{при} \quad n>0{,}764\frac{b}{H} \quad \text{для } Z<1{,}1; \tag{15}$$

- между числом линий светильников в птичнике N_L и параметрами b и L_0 в виде неравенства

$$N_L < \frac{b}{L_0} + 1. \tag{16}$$

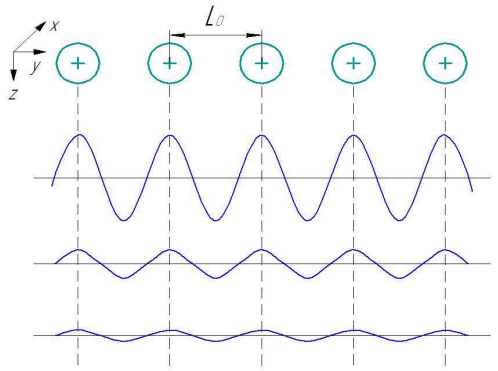


Рисунок 4 - К физическому моделированию освещённости: распределение потенциала под параллельными заряженными нитями и освещённость от точечных CD на линиях светильников аналогичны

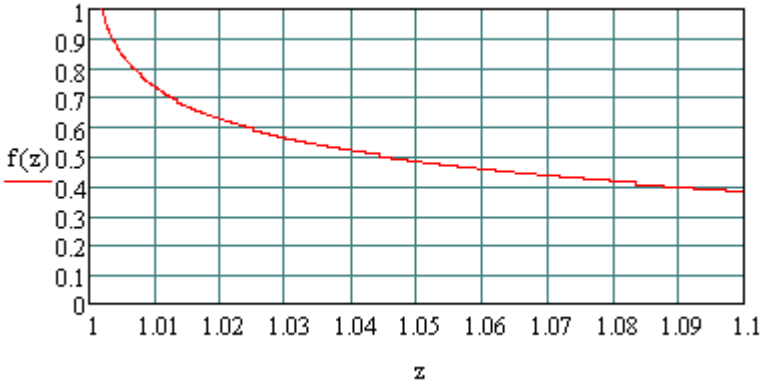


Рисунок 5 – Зависимость $H/L_0 = f(Z)$ от коэффициента неравномерности освещения Z.
Условие повышенной равномерности освещения $Z < 1.1$ выполняется при $H/L_0 > 0.382$

Далее приведём (6) с учётом (7) и (8) к виду

$$\frac{E_k(x,y)}{I_0} = \sum_{k=1}^{N} \frac{\cos^{m+1}\theta(x,y,k)}{r_k^2}, \tag{17}$$

и обозначим правую часть в (17) через S:

$$S = \sum_{k=1}^{N} \frac{\cos^{m+1}\theta(x,y,k)}{r_k^2}. \tag{18}$$

При идеальной ($Z=1$) равномерности освещения $E(x, y)$ постоянна и одинакова в любой точке. Для выбранного CD с I_0 и α, сумма S должна быть также постоянной, численное значение которой зависит от N. Аналитического метода расчёта N не существует, однако, многократными расчётами при помощи компьютера можно получить малое отличие $I_0 \cdot S$ от освещённости $E(x,y)=const$ при некотором N. Обеспечение равномерной освещенности горизонтальной поверхности в поперечном направлении птичника более проблематично, поэтому расчёты N следует проводить в поперечной плоскости для $x = const$ при условии (5).

Расчёт освещённости в точке по (6) с учётом (7) и (8) проводится с шагом h_y в направлении y при числе линий N_L, начальном расстоянии L_0 и ширине птичника b. При значении числа CD на одной линейке n_i в точках поперечного направления, получим массив $E\ (x=const,\ y)$, из которого определяются E_{min} и E_{max} для проверки целевой функции $f(t)$ на условие

$$f(t,N)=\{k_0E_0-0,5(E_{max}+E_{min})\}\rightarrow min\ , \qquad (19)$$

при параметрах светодиодного освещения птичника $t\ =t_1,t_2\ldots t_n$ и $N=1,2,..N_{опт}$ через которые $f(t)$ явно не выражается. При этом идёт вычисление коэффициента неравномерности освещения (2) и проверка условия (5).

До выполнения (19) и (5) следует добавлять по одному CD на каждой светодиодной линейке. Выполнение (19) даёт согласно (13) промежуточное число светодиодов N_0 в системе освещения птичника при ограничении (5). Полученное при физическом моделировании L_0 теперь можно назвать также промежуточным расстоянием между линиями светильников.

В (17) левая часть может быть неизменной и при меньшем N_0 в правой части, если каждое слагаемое будет содержать большее значение $cos^{m+1}\theta(x,y,k)$ и меньшее значение r_k^2. Тогда L_0 может быть уменьшено, что возможно, позволит получить новое значение числа CD меньшее, чем промежуточное N_0 при некотором $L_{опт}$ (рис.6).

Промежуточное значение L_0 может быть заранее меньше $L_{опт}$ (на рис.6 не показано). Поэтому расчёты должны продолжаться с небольшим шагом h_L и при увеличении L_0. Это означает, что $L_{опт}$ надо искать около значения L_0 в виде

$$L_{опт} = L_o \pm \Delta L_o\,, \qquad (20)$$

где ΔL_0 кратно величине шага h_L.

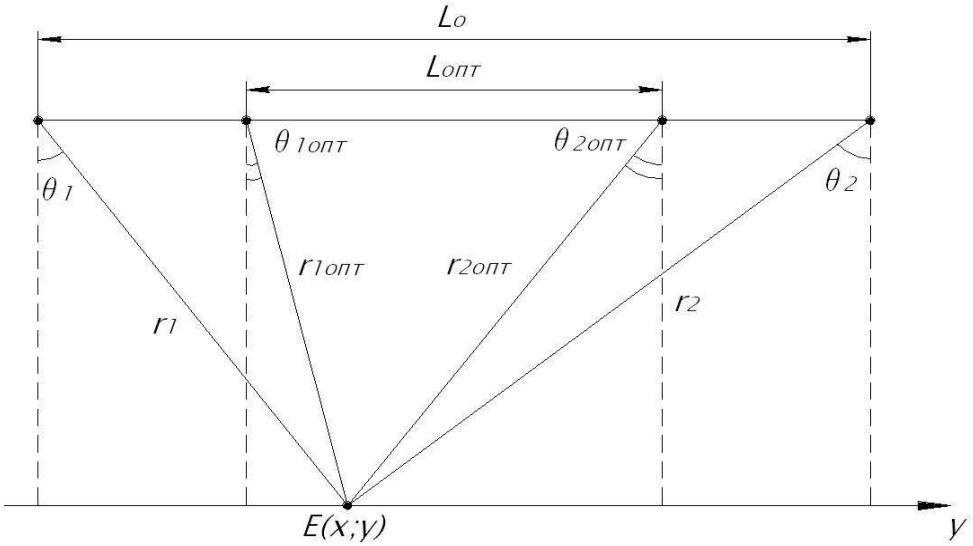


Рисунок 6 − При уменьшении расстояния между линиями L_0 угол $\theta(x,y,k)$ и r_k уменьшаются

При некотором ΔL_0 достигается такое $L_{опт}$, которое даёт наилучшее значение $N_{опт}$, а также оценку оптимального энергопотребления

$$P_{опт} = p_1 \cdot N_{опт} \qquad (21)$$

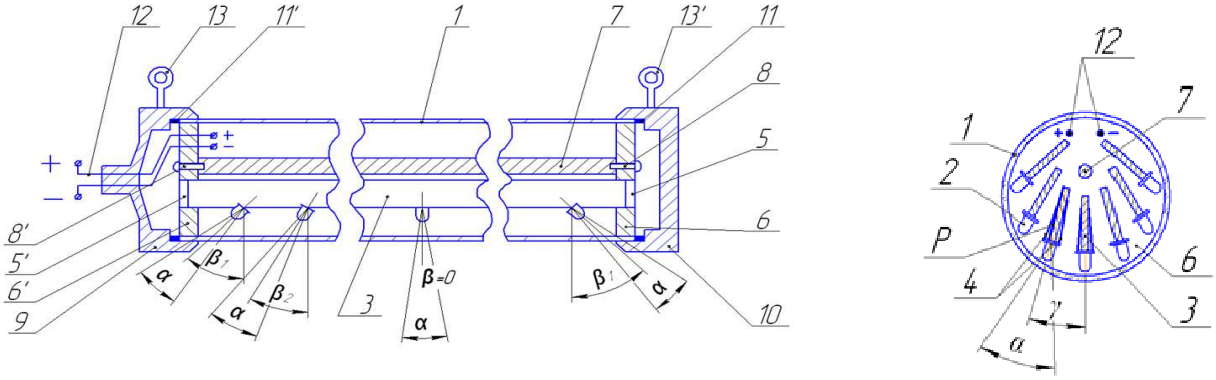
Таким образом, компьютерными расчётами можно оценить величины значений $N_{опт}$ и $L_{опт}$, при которых энергопотребление можно считать оптимальным для данного птичника.

С точки зрения теории оптимизации при разработке математической модели для оценки оптимального параметра реализован метод нулевого порядка, при котором направление минимизации определяется последовательными вычислениями значений целевой функции.

Связь между λ и N согласно (13) позволяет получить оценку оптимального расстояния между светодиодами в линейке светильника $\lambda_{опт.}$ Параметры, при которых целевая функция достигает минимума, используем при конструировании и изготовлении опытного образца светильника.

В третьей главе «Методика компьютерных и экспериментальных исследований**»** представлены методики компьютерных и экспериментальных исследований освещённости птичника. Для расчётной оценки параметров системы освещения птичника разработана компьютерная программа на базе математической модели, рассмотренной в главе 2. Программа создана в программной среде Pascal с конвертированием массива значений освещённости в базу электронных таблиц Excel. Разработанная методика компьютерных экспериментов включает выбор входных параметров и алгоритм расчёта освещённости с последующей оценкой оптимального энергопотребления по целевой функции.

Светодиодный светильник, оценка оптимального энергопотребления которого происходила при принятых конструкционных параметрах, является основой для изготовления экспериментального образца. Для изготовления опытного образца предложена конструкция светодиодного светильника (Пат. № 159705 РФ). Расположение светодиодов с кромки платы способствует более компактному расположению плат (рис.7). Это позволяет увеличить их число в поперечной плоскости в 2-3 раза и соответственно повысить равномерность освещения рабочей поверхности.



а) б)

Рисунок 7 – Конструкция светодиодного светильника:

а) – продольное сечение; б) – поперечное сечение; 1 – светопропускающая трубчатая колба; 2 – светодиоды; 3 – двухсторонние платы (светодиодная линейка); 4 – выводы светодиода; 5 – пазы; 6 – фланцы; 7 – стягивающий фланцы стержень; 8 – винты; 9,10 – торцевые крышки;11 – уплотняющая прокладка;12 – кабель питания; 13 – подвесной рым-болт

Согласно предложенной конструкции изготовлены два опытных образца светодиодного светильника, внешний вид которого представлен на рис.8.

Измерения освещённости проводились на рабочем стенде с целью проверки адекватности математической модели и её программной реализации путём сравнения расчётных результатов освещённости с экспериментальными. Для этого в компьютерную программу вводились параметры опытного образца светильника: длина *600 мм*, число светодиодных линеек *7*, расстояние между светодиодами на одной линейке *25мм*, угол между линейками 15°.

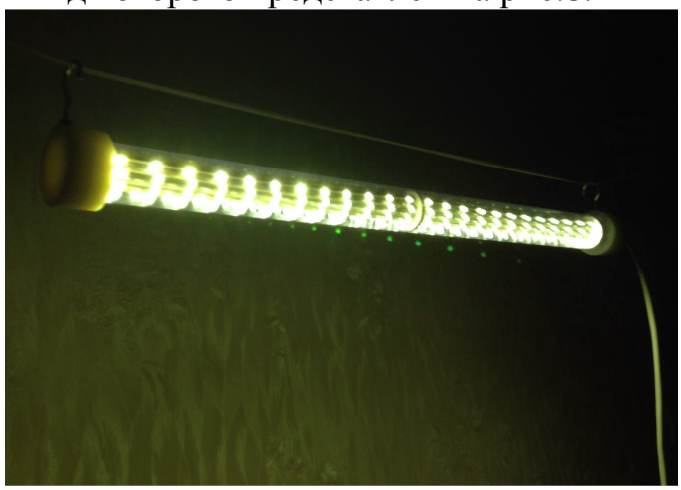


Рисунок 8–Внешний вид опытного образца светодиодного светильника

В светильнике использовались светодиоды фирмы FORYARD марки *FYL – 3014WWC/S* (паспортные данные: цвет тепло-белый T=2700-3500K, осевая сила света светодиода I_0 *=15 кд* и угол излучения $\alpha = 30^o$).

Оснащение стенда включало в себя: исследуемые светодиодные светильники, источник питания «Agilent» E3634A, поверенный люксметр-пульсметр «Аргус-07». Светильники фиксировались на изготовленной рамочной конструкции (рис. 9) при определённой высоте над координатной сеткой с рабочей областью *3м* x *3м*. В узлах сетки (число узлов:*16 x 16 = 256*) с шагом *20 см* производились измерения освещённости при помощи датчика люксметра. Результаты измерений представлены в главе 4.

а)

б)

Рисунок 9 – а) светильник на рамочной конструкции на высоте *H=2,8м* над координатной сеткой с рабочей областью *3м* x *3м;* б) два светильника параллельно на рамочной конструкции стенда на высоте *H=2,8м*, L_0 *= 1,5м*

В четвертой главе «Результаты компьютерных и экспериментальных исследований» компьютерные исследования освещённости и оценка оптимальных значений основных параметров проведены для систем технологического светодиодного освещения двух птичников птицефабрики «Удмуртская» г. Глазова Удмуртской Республики. На экспериментальной площадке этой же птицефабрики проведены производственные испытания образцов разработанных светодиодных светильников.

Выбор входных параметров для птичников осуществлён согласно методике компьютерных экспериментов главы 3, по которой выбрано $j=7$ линеек, расположенных с интервалом $\gamma = 15^0$. Выбранная величина угла γ не нарушает условие слепящего действия: *40° - 50°*, из которого выбирается и начальный угол $\beta_0 = 45^o$.

Чтобы использовать большое количество CD малой мощности p_1, выбраны CD диаметром не более 5 мм. Исследования проводились для углов раскрытия светового потока светодиода α от 15° до 30° при осевой силе света $I_0 = 20кд$ и потребляемой мощности $p_1 = 0{,}06Вт$. Выбранные CD не требуют охлаждения и работают при напряжении $U=3В$ и токе $I=0{,}02А$. Применение методики компьютерных экспериментов главы 3 продемонстрируем для угла раскрытия светового потока светодиода $\alpha = 20^o$ в каждом птичнике.

1. В птичнике размерами, $a = 66м$, $b = 12м$ для технологического освещения используется *72* светодиодных светильника LED-19,2 (производства ООО «Резерв»), распределённых по $N_L = 3$ продольным линиям. Высота подвеса светильников $H=3{,}5м$.

При потребляемой мощности каждого светильника в *19,2 Вт* (*240* светодиодов по *0,08Вт*) суммарная потребляемая мощность системы освещения птичника $P_0=1382{,}4$ *Вт* или *1,75 Вт/м*^{2}. Выполненные замеры освещённости дают интервал коэффициента неравномерности освещения *Z* в поперечной плоскости от *1,146* до *1,430*.

Принимаем расстояние между линиями светильников $L_0=8$ *м* при числе линий $N_L=2$. Если принять длину светильника l_c=1м и подвешивать их на расстоянии также *1м*, то число светильников в птичнике согласно (10) $S_0 =66$.

В результате компьютерных расчётов получено промежуточное значение числа светодиодов $N_0=18018$ при коэффициенте неравномерности освещения $Z_0 =1{,}086$ для $L_0 = 8{,}00$ *м*. После оценки оптимального расстояния между линиями получено $L_{опт} =8{,}11м$, при котором наилучшее значение числа светодиодов составляет $N_{опт}=18018$ при Z=*1,081* (таблица 2 и рис.10).

Таблица 2 – Результаты компьютерной оценки оптимального энергопотребления при различных углах раскрытия светового потока выбранного светодиода α для птичника размерами *66м х12 м* при $P_0 =1382{,}4$ *Вт*

α, град.	$E_{ср}$, лк	$L_{опт}$, м	Z	$N_{опт}$	$P_{опт}$, Вт	$P_0/P_{опт}$
15	120,2	8,04	1,080	30594	1835,6	0,753
20	**121,3**	**8,11**	**1,081**	**18018**	**1081,1**	**1,279**
25	125,5	7,94	1,105	12012	720,7	1,918
30	130,4	7,84	1,130	8778	526,7	2,625

Для выбранных светодиодов потребляемая мощность системы освещения $P = p_1 N_{опт} = 0{,}06 Вт \cdot 18018 = 1081{,}1\ Вт$ или $1{,}37\ Вт/м^2$, что на *27,9%* меньше при использовании светильников производства ООО «Резерв». Результаты исследования освещённости данного птичника для углов раскрытия светового потока светодиодов α от 15° до 30° сведены в таблицу 2.

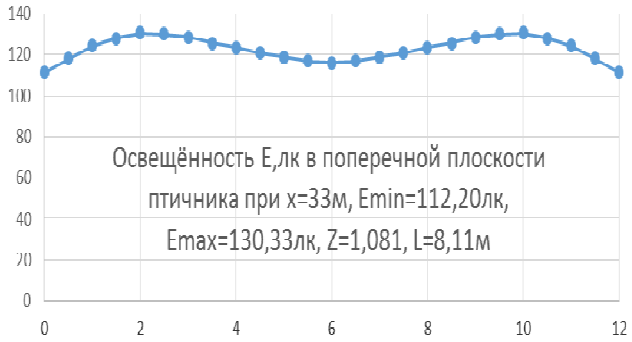


Рисунок 10 - Расчётная освещенность в поперечном направлении для птичника *66м х 12м* ось абсцисс – вдоль ширины птичника, [м]; ось ординат – величина освещённости E, [лк]

Из таблицы 2 видно, что с увеличением угла α расчётное энергопотребление понижается. При угле раскрытия светового потока CD α =30° эффективность энергопотребления для данного птичника возрастает в 2,6 раза. Однако расчётный коэффициент неравномерности освещения *Z=1,13* превышает принятое ограничение Z<1.1, а дальнейшее увеличение угла α приводит к ещё большему увеличению неравномерности освещения.

Для птичника *66м* х*12м* с люминесцентными лампами (72 светильника) при мощности каждого светильника в *72 Вт* суммарная потребляемая мощность системы освещения P_0*=5184 Вт* или *6,55* $Вт/м^2$. Выполненные замеры освещённости дают интервал коэффициента неравномерности освещения *Z* от *1,182* до *1,210*. Потребление электроэнергии, в сравнении с расчётным (*1,37*$Вт/м^2$) в 4,8 раза меньше.

2. Во втором птичнике размерами, *a =78м, b =18м* используется 160 светодиодных светильников (производства ООО «Гелан»), распределённых по N_L= *4* продольным линиям. При потребляемой мощности каждого светильника в *16 Вт* (*16* светодиодов по *1Вт*) суммарная потребляемая мощность птичника *2560 Вт* или *1,82* $Вт/м^2$.

В результате компьютерных расчётов при N_L = *3* получено промежуточное число светодиодов в системе освещения N_0= *31122* при коэффициенте неравномерности освещения Z_0 =*1,071* и L_0 = *8,00 м*. После оценки оптимального значения расстояния между линиями получено $L_{опт}$= *7,83м*, при котором наилучшее значение числа светодиодов составляет $N_{опт}$= *30303* при *Z=1,046* (таблица 3 и рис. 11).

Таблица 3– Результаты компьютерной оценки оптимального энергопотребления при различных углах раскрытия светового потока выбранного светодиода α для птичника размерами 78м х18 м при P_0 =2560 Вт

α, град.	$E_{ср}$, лк	$L_{опт}$, м	Z	$N_{опт}$	$P_{опт}$, Вт	$P_0/P_{опт}$
15	120,2	7,94	1,078	54054	3243,2	0,789
20	**120,2**	**7,83**	**1,046**	**30303**	**1818,2**	**1,408**
25	124,7	7,60	1,078	19656	1179,4	2,171
30	120,4	7,46	1,108	13104	786,2	3,256

Результаты расчётов, проведённые для *x от 9м до 69м с шагом 5м*, не отличаются от результатов, полученных при *x=39м*.

Для выбранных светодиодов потребляемая мощность системы освещения должна быть $P = p_1 \cdot N_{опт} = 1818{,}2 Вт$ или $1{,}30\ Вт/м^2$, что на 40,8% меньше, чем при использовании светильников производства ООО «Гелан». Результаты исследования освещённости этого птичника для углов раскрытия светового потока светодиодов α от 15° до 30° сведём в таблицу 3.

Из таблицы 3 видно, что с увеличением угла α расчётное энергопотребление также понижается. При угле раскрытия светового потока светодиода $\alpha = 30^o$ эффективность энергопотребления для данного птичника возрастает в 3,3 раза. При этом расчётный коэффициент неравномерности освещения $Z = 1{,}108$ незначительно выше (на 0,7%) ограничения $Z < 1{,}10$, что соответствует повышению качества освещения реального птичника. Однако превышение принятой неравномерности (5) подтверждает принятый в главе 2 интервал для угла α и исключает дальнейшее его увеличение для обоих птичников.

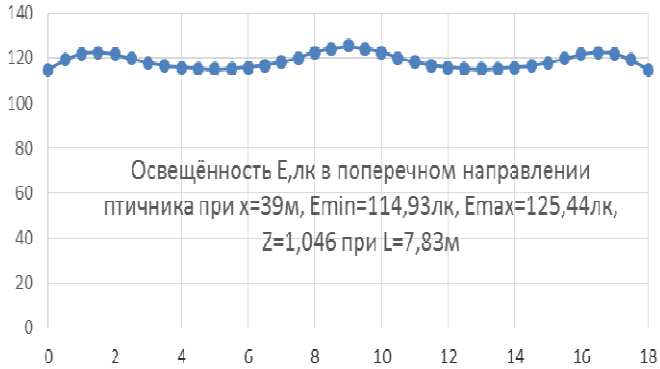
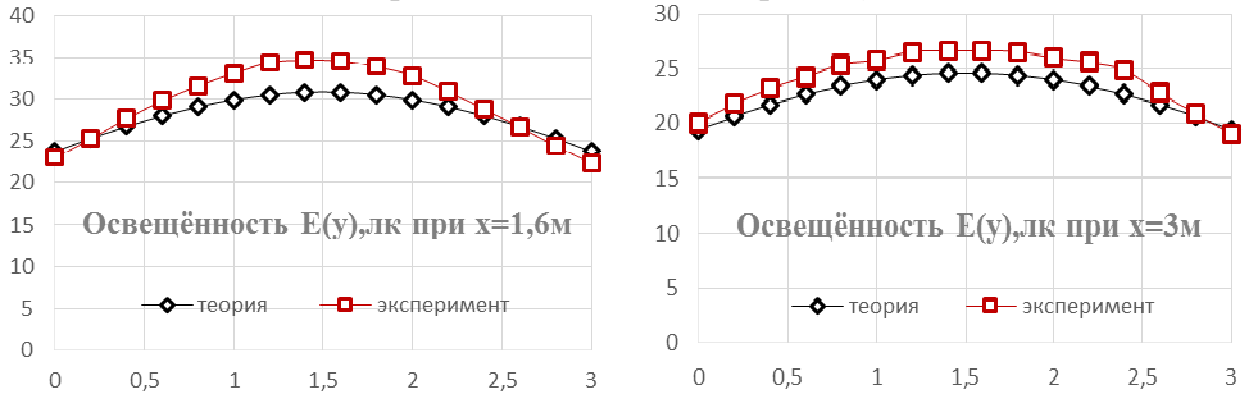


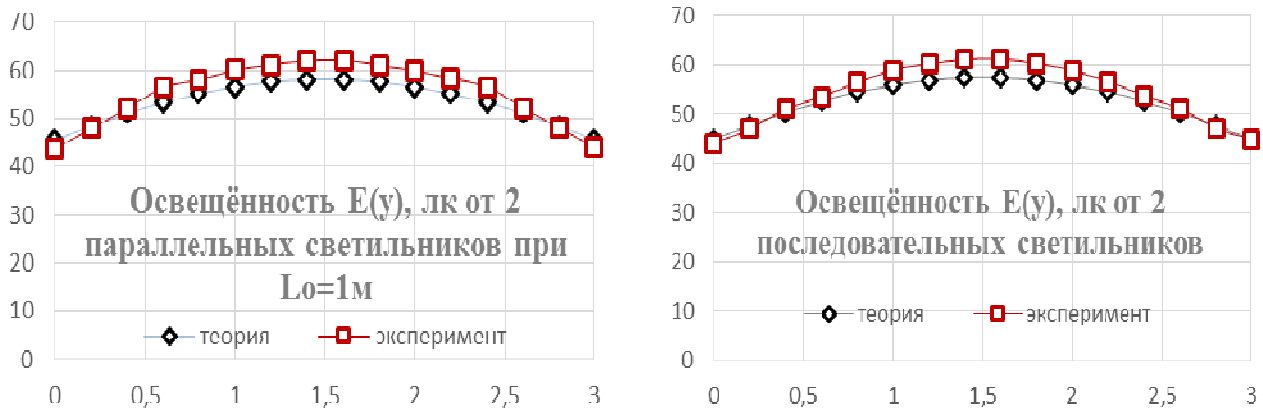
Рисунок 11-Расчётная освещенность в поперечном направлении для птичника 78м х 18м ось абсцисс – вдоль ширины птичника, [м]; ось ординат – величина освещённости Е, [лк]

Проверка адекватности разработанной математической модели и её программной реализации проводилась путём сравнения расчётных результатов освещённости с экспериментальными значениями. В первой серии экспериментов исследовалась освещённость, создаваемая одним опытным образцом светодиодного светильника (рис.12). Во второй серии экспериментов измерялась освещённость, создаваемая двумя одинаковыми опытными образцами. Измерения проводились для параллельного и последовательного расположения светильников, высота подвеса которых была одинаковой (рис.13).



а б

Рисунок 12– Результаты лабораторных измерений освещённости в поперечной плоскости светильника в сравнении с компьютерным расчётом. Освещённость *E(y)*, лк. Высота светильника над датчиком люксметра *H=2,775м*. а) – плоскость *x=1,6м* близкая к центральной. б) – плоскость *x = 3м* наиболее удалённая от центральной.



а) б)

Рисунок 13– Результаты лабораторных измерений освещённости в поперечной плоскости светильников в сравнении с компьютерным расчётом. Освещённость *E(x)*,лк. Высота светильников над датчиком люксметра *H=2,80м*. Плоскость *x=1,6м* близкая к центральной. а)- два параллельных светильника на расстоянии L_0 = *1м* б)- два светильника последовательно через a_x=0,38м

Обработка результатов измерений показала, что стандартное (среднеквадратичное) отклонение измеренных значений освещённости от расчётных с надёжностью 95% не превышает паспортную погрешность люксметра в 8%, что подтверждает применимость предложенной математической модели и её программной реализации.

В ходе производственных испытаний разработанных светодиодных светильников, проведённых на ООО птицефабрика «Удмуртская» г. Глазова в период с сентября по декабрь 2015 г., установлено снижение потребляемой электроэнергии, выявлено положительное влияние испытуемых светильников на продуктивность птицы.

Для исследования было выбрано 2 группы курочек в возрасте 175 суток методом пар-аналогов, в количестве 20 шт. в каждой группе. После формирования групп птицу содержали напольно на глубокой подстилке. Для освещения в контрольной группе использовали один люминесцентный светильник типа ЛСП 2х36, в опытной – разработанные светодиодные светильники мощностью 10 Вт в количестве 2 шт. Светильники размещались на высоте 2 м, в контрольной группе один, в опытной – два светодиодных светильника параллельно друг другу на расстоянии 1 м. В обеих группах средняя освещенность на уровне кормушек была одинаковой и составила 90 люкс (измерения проведены люксметром «Аргус-07») с обеспечением режима «рассвет - закат».

За время эксперимента фиксировались зоотехнические показатели (сохранность кур, количество яиц на начальную несушку, выход инкубационных яиц, масса яйца и другие морфологические показатели, расход корма) и энергетические показатели (потребляемая электроэнергия). При этом условия содержания и кормления были одинаковыми для обеих групп и соответствовали рекомендуемым нормам для кросса ROSS – 308. Графические результаты опытов представлены на рис.14-16 (опытная группа – обозначена наклонной штриховкой).

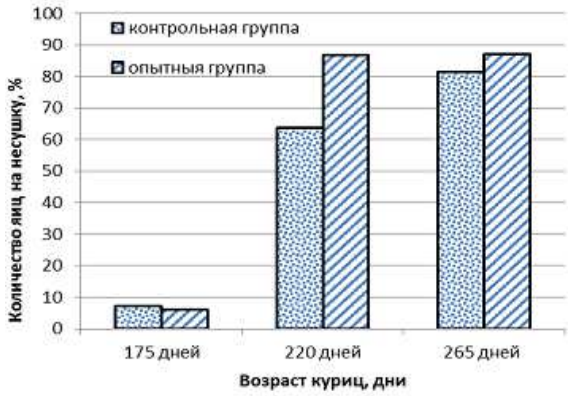


Рисунок 14 – Динамика яйцекладки на начальную несушку по возрастам

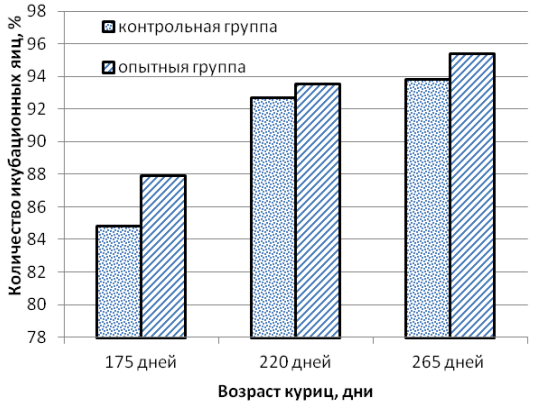


Рисунок 15 – Динамика выхода инкубационных яиц по возрастам

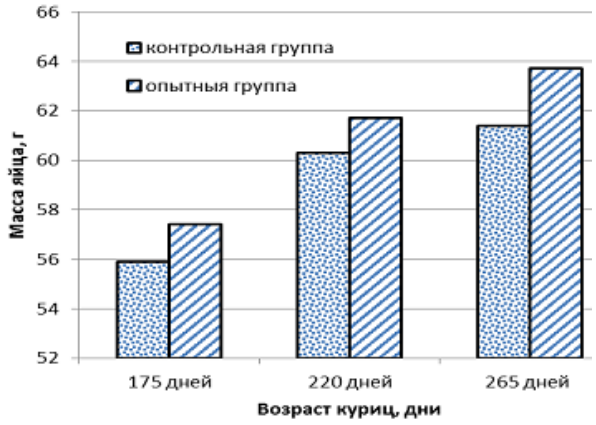


Рисунок 16 – Динамика массы яйца по возрастам

Результаты производственных испытаний показали эффективность разработанных светодиодных светильников. За весь период содержания сохранность кур в опытной группе составила 95%, процент яйцекладки на начальную несушку на конец эксперимента в опытной группе составил 87,1%, что выше по сравнению с контрольной на 5,6%, выход инкубационных яиц с возрастом птицы увеличивался в обеих группах. В контрольной группе этот показатель составил 93,8%, а в опытной– 95,4%, что выше на 1,6 %. Морфологические показатели яйца (толщина скорлупы, плотность яйца, индекс желтка, оплодотворённость) в опытной группе имели более высокие значения, чем в контрольной. Расход корма на 10 яиц в опытной группе на 7,1% меньше, чем в контрольной при снижении затрат на электроэнергию в 3,6 раза.

В пятой главе «Оценка экономической эффективности системы освещения с линейными светодиодными светильниками» представлены результаты экономических и энергетических показателей. Экономия потребления электроэнергии по сравнению с существующей системой при работе 5100 часов в год составляет *20924,79 кВтч* или *83,699 тыс. руб.* при стоимости электроэнергии *4 руб.* для птичника размерами *66м*х*12м*. Использование светодиодных светильников белого тёплого цвета при напольном содержании кур родительского стада позволило повысить продуктивность на 1,6 %, при экономии электроэнергии в 3,6 раза.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Анализ современных систем освещения птичников позволил обосновать актуальность исследований и возможность повышения эффективности светодиодного освещения для напольного содержания птиц.
2. Разработанная математическая модель освещённости птичника позволяет методом оптимизации оценить энергопотребление и обосновать конструкционные параметры системы равномерного освещения птичника;
3. На основе математической модели разработана методика компьютерных исследований освещённости птичника как инструмент для повышения энергоэффективности птичников. При помощи компьютерной программы получены конструкционные параметры светильника, содержащего 7 линеек с количеством светодиодов ($\alpha=20^0$, $I_0=20кд$) $N_i=273шт$ для птичника $66м x 12м$ и с количеством светодиодов ($\alpha=20^0$, $I_0=20кд$) $N_i=259шт$ для птичника $78м x 18м$. Светильники обеспечивают нормируемую освещенность при оптимальной потребляемой мощности птичников соответственно *1,081кВт* (экономичнее на 28%) и *1,818кВт* (экономичнее на 41%). Получены рекомендации по повышению эффективности светодиодного освещения для птичников птицефабрики «Удмуртская» г. Глазова УР.
4. Изготовлены два опытных образца разработанного светодиодного светильника и проведены исследования освещённости горизонтальной поверхности. Сравнение экспериментальных и расчётных результатов подтверждают применимость предложенной математической модели и её программной реализации. Результаты испытаний, проведённых на птицефабрике «Удмуртская» г. Глазова, показывают, что использование разработанных светодиодных светильников при напольном содержании кур родительского стада кур кросса РОСС – 308 позволило повысить: сохранность кур на 5%, процент яйцекладки на начальную несушку - на 5,6 %, выход инкубационных яиц - на 1,6 %; увеличить: массу яйца на 3,7 %, оплодотворенность яиц на 4,9 %; снизить: затраты кормов на 10 яиц на 7,1 %, электроэнергии в 3,6 раза.
5. Экономия потребления электроэнергии по сравнению с существующей люминесцентной системой при работе 5100 часов в год составляет *20910 кВтч* или *83,64 тыс. руб.* для птичника размерами *66м х12м.* Срок окупаемости системы освещения составил 2 года.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих печатных работах

Издания, указанные в перечне ВАК:

1. Широбокова Т.А. Оценка эффективности светильников с разными типами кривых сил света / Т.А. Широбокова, Н.П. Кочетков, Т.Р. Галлямова // Вестник Саратовского государственного аграрного университета им. Н.И. Вавилова. – Саратов: ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2013. - № 06. – С. 67-69.
2. Кочетков Н.П. Определение кривой силы света, обеспечивающей равномерное освещение горизонтальной рабочей поверхности / Н.П. Кочетков, Т.А. Ши-

робокова, Т.Р. Галлямова// Достижения науки и техники АПК. -2013.- №8 – С. 64-67.
3. Широбокова Т.А. Моделирование светодиодного светильника для освещения птичника при напольном содержании родительского стада/ Н. П. Кочетков, Т. А. Широбокова, Т.Р. Галлямова // Аграрный научный журнал. - 2014. - № 9. – С. 52-54.
4. Галлямова Т.Р. Влияние различных источников света на продуктивность кур/Т.Р. Галлямова, Т. А. Широбокова, Л.А. Шувалова, С.Я. Пономарева // Современные проблемы науки и образования. - 2014. - №11 URL http://www.science-education.ru/120-15563

Патенты:

1. Пат. № 132859 РФ, МПК F21L 17/00. Светодиодный осветительный прибор / Широбокова Т.А., Кочетков Н.П., ГаллямоваТ.Р.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Ижевская ГСХА. – № 2013116823/07; заявл. 12.04.2013; опубл. 27.09.2013. Бюл. № 27. 2 с.
2. Пат. № 159705 РФ, МПК F21S 13/00. Светодиодный светильник для равномерного освещения рабочей поверхности птичника / Галлямова Т.Р., Широбокова Т.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Ижевская ГСХА. – № 2014149314/07; заявл. 08.12.2014; опубл. 20.02.2016. Бюл. № 5. 2 с.

Свидетельство:

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015617923 Программа расчёта оптимального числа светодиодов в системе освещения птичника/ Т.Р. Галлямова, Т.А. Широбокова; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Ижевская ГСХА. – № 2013116823/07; заявл. 12.01.2015; опубл. 24.07.2015.

Другие издания:

1. Галлямова, Т.Р. Математическое моделирование светодиодных источников освещения для многоярусных клеточных батарей / Т.Р. Галлямова, И.М. Новосёлов // Научное обеспечение развития АПК в современных условиях: материалы Всероссийской научно-практической конференции 15-18 февраля 2011 г. В 3 т. Т. 3. ФГБОУ ВПО Ижевская ГСХА. – Ижевск: ФГБОУ ВПО Ижевская ГСХА, 2011. – С. 60-63.
2. Галлямова, Т.Р. Задачи исследования и конструирования светотехнических характеристик светодиодных светильников / Т.Р. Галлямова, А.А. Сапаев, Н.П. Кочетков // Научное и инновационное обеспечение модернизации АПК России: материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов 25-26 октября 2011 г. – Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. – 2011. – №3 (28) – С.38-40.
3. Галлямова, Т.Р. Определение оптимального светораспределения для обеспечения равномерности освещения птицеводческих помещений / Т.Р. Галлямова, И.М. Новосёлов, Т.А. Широбокова // Инновационному развитию АПК и аграрному образованию – научное обеспечение: материалы Всероссийской научно-

практической конференции 14-17.02 2012 г. Т.3. - Ижевск: ФГБОУ ВПО Ижевская ГСХА, 2012. - С.271-274.
4. Широбокова, Т.А. Моделирование оптимального светораспределения идеализированного светильника в продольной плоскости / Т.А. Широбокова, И.М. Новосёлов, Т.Р. Галлямова // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: труды 8-й Международной НТК (16-17 мая 2012 г., г. Москва, ГНУ ВИЭСХ). В 5-ти частях. Ч 3. Энергосберегающие технологии в животноводстве и стационарной энергетике. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2012. – С. 193-197.
5. Галлямова Т.Р. Перспективы применения светодиодов в практике животноводства /Т.Р. Галлямова, Т.А. Широбокова, И. И. Иксанов // «Научное обеспечение АПК. Итоги и перспеутивы: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию ФГБОУ ВПО Ижевская ГСХА. В 2 т. Т.2.-Ижевск: ФГБОУ ВПО ИжевскаяГСХА.-2013.- С.86-89.
6. Kochetkov N.P. The lighting device provides uniform lighting horizontal working surface / N.P. Kochetkov, T.A. Shirobokova, T.R. Gallyamova // 4th International Scientific Conference“ Applied Sciences in Europe: tendencies of contemporary development”: Papers of the 4th International Scientific Conference. November 4-5, Stuttgart, Germany 2013. – 40-41 p.
7. Иксанов И.И. Пути повышения продуктивности и эффективности энергосбережения в животноводческих помещениях/И.И. Иксанов, Т.Р. Галлямова, Т.А. Широбокова, М.А.Лошаков// Вестник ИжГСХА. - 2014. - № 1(38) - С.40-42.
8. Галлямова Т.Р. О равномерности освещения горизонтальной поверхности светодиодными светильниками/ Т.Р. Галлямова //Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: труды 9-й Международной научно- технической конференции (21–22 мая 2014, Москва, ГНУ ВИЭСХ). В 5 – ти частях. Часть 3. Энергосберегающие технологии в животноводстве и стационарной энергетик. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2014. – С. 206–211.
9. Галлямова Т.Р. Светодиодный осветительный прибор /Т.Р. Галлямова, Н.П. Кочетков, Т.А. Широбокова, И.И. Иксанов// Наука, инновации и образование в современном АПК :материалы Международной научно-практической конференции. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, ФГБО ВПО Ижевская ГСХА, 2014. - С. 146-149.
10. Галлямова Т.Р. Экспериментальные исследования освещённости, создаваемой опытным образцом светодиодного светильника с линейками круглосимметричных светодиодов/ Т.Р. Галлямова Т.А. Широбокова, Н.П.Кочетков /Международная научно-практическая конференция «Теория и практика – устойчивому развитию агропромышленного комплекса». / ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА.– Ижевск: ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА, 2015.- С.117-120.
11. Широбокова Т.А. Светодиодный осветительный прибор для равномерного освещения в продольной и поперечной плоскости / Т.А. Широбокова, И.И. Иксанов, Т.Р. Галлямова / Инновации в сельском хозяйстве. Изд. ВИЭСХ. 2015.№ 5(15). С. 74-76.

Подписано в печать 31.05.2016. Формат 60x84/16.
Усл.п.л. 1,4. Уч.-изд. 1,16.
Тираж 100 экз. Заказ № 1018.

Типография Издательского центра
«Удмуртский университет»
426034, Ижевск, ул. Университетская, 1, корп. 2.
Тел. 68-57-18