

Научная статья

УДК 631.227.2:628.93

DOI 10.48012/1817-5457_2024_4_150-159

СКАЛЯРНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ЛИНИЙ ОСВЕЩЕНИЯ ПТИЧНИКА С НАПОЛЬНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ПТИЦЫ

Галлямова Татьяна Ратмировна✉, Васильев Даниил Александрович

Удмуртский ГАУ, Ижевск, Россия

✉trgall11@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрен птичник напольного содержания, для освещения которого используется N продольных линий светодиодных светильников. Расположение линий характеризуется расстоянием L между ними и высотой их подвеса H . Необходимость повышения продуктивности птицы приводит к проблеме создания эффективного режима расходования энергии на объекте АПК. При решении проблемы возникает задача оценки параметров оптимального пространственного расположения линий L_{opt} и H_{opt} . Вопросы эффективного расходования энергии на производстве – приоритетные, поэтому задача актуальна. Цель исследования – оценить параметры оптимального пространственного расположения линий освещения птичника напольного содержания при помощи скалярного критерия, не зависящего от отраженной составляющей освещенности. Определили, что критерием может служить $(E_{min})_{max}$ – максимум минимальной освещенности. Преобразовали $(E_{min})_{max}$ в эквивалентный критерий ε_{max} , не зависящий от отраженной составляющей освещенности. Разработали алгоритм компьютерной оценки L_{opt} и H_{opt} по критерию ε_{max} . Компьютерными расчетами продемонстрировали оценку L_{opt} и H_{opt} птичника шириной 18 м. Получили оценку $L_{opt} = 5,5$ м и $H_{opt} = 3,5$ м, которая согласуется со значениями L и H птичника ООО «Удмуртская птицефабрика». Исследовали птичники стандартной ширины b , кратной 6 м. Представили результаты оценки L_{opt} и H_{opt} в виде таблицы. Аппроксимировали табличные зависимости $L_{opt}(b)$ и $H_{opt}(b)$ квадратичными функциями. Получили компьютерную оценку L_{opt} и H_{opt} четырех птичников шириной, кратной 6 м, при помощи скалярного критерия, не зависящего от отраженной составляющей освещенности. Результаты оценки представили в виде таблицы. Определили, что аппроксимация табличных результатов аналитическими функциями позволяет выполнить экспресс-оценку L_{opt} и H_{opt} птичников, ширина которых находится в интервале $6\text{ м} \leq b \leq 24\text{ м}$. Констатировали, что экспресс-оценка, адекватная компьютерным оценкам с погрешностью не более 2 %, может представлять интерес для специалистов на этапе проектирования системы светодиодного освещения птичников.

Ключевые слова: светодиодное освещение, освещенность, неравномерность освещения, эффективность, критерий, экспресс-оценка, птичник с напольным содержанием.

Для цитирования: Галлямова Т. Р., Васильев Д. А. Скалярная оценка параметров оптимального пространственного расположения линий освещения птичника с напольным содержанием птицы // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. № 4(80). С. 150-159. https://doi.org/10.48012/1817-5457_2024_4_150-159.

Введение. Для современного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности птичника напольного содержания применяются продольные ряды (линии) светодиодных светильников. Освещение помещений на основе светодиодов признано по многим параметрам наиболее предпочтительным по сравнению с их предшественниками – лампами накаливания и люминесцентными лампами [5, 12–14].

При проектировании системы освещения птичника основным параметром, обеспечива-

ющим необходимую световую составляющую микроклимата и получение прибыли, служит нормированная освещенность E_n . В российских нормативах для светодиодного освещения норма освещенности не приводится. В настоящее время уровень освещенности, создаваемой светодиодами, определяется, как правило, требованиями заводчиков кросса птицы, при этом минимальная освещенность должна быть не меньше нормируемой.

Пространственное расположение заданного числа параллельных линий N можно харак-

теризовать расстоянием L между ними и высотой их подвеса H . Распределение освещенности E по рабочей поверхности, как правило, неравномерное и может иметь множество вариантов. Каждому варианту соответствует максимум E_{max} и минимум E_{min} освещенности, которые зависят от переменных L и H . Через E_{max} и E_{min} выражается средняя освещенность $E_{cp} = (E_{max} + E_{min})/2$ и коэффициент неравномерности освещения $Z = E_{cp}/2E_{min}$ [6], который можно представить в виде $Z = 1 + (E_{max} - E_{min})/(2E_{min})$ [2]. Нормы для Z тоже неизвестны, а ее величина в интервале $1,1 \leq Z \leq 1,15$, рекомендованном в [6] без какого-либо обоснования, вызывает сомнения.

При напольном содержании родительского стада выходом продукции является инкубационное яйцо. Практика показывает, что при неравномерном освещении, когда величина Z заметно превышает единицу, курицы стремятся снести яйцо в более темное место – вне гнезда на подстилку. Яйцо, снесенное на подстилку, выбраковывается, а продуктивность птицы падает. Поскольку курицы подражают друг другу [7], то в процессе сноса яиц вне гнезда участвует большинство куриц. Такое негативное поведение птицы свидетельствует о неоптимальном расположении линий светильников, а также о неэффективности затрат энергии на освещение. Однако если освещенность близка к равномерному распределению, когда Z незначительно превышает единицу, курицы несутся в искусственно затемненное место – гнездо. Поскольку курицы и в этом случае подражают друг другу, то большинство куриц сносит яйца в гнезде. Такое поведение птиц свидетельствует о расположении линий светильников близком к оптимальному и высокой эффективности затрат энергии на освещение. Яйцо, обнаруженное в гнезде, дает положительный вклад в продуктивность птицы. Следовательно, она зависит не только от количества, но и от качества яиц, а поведение птицы служит индикатором эффективности (неэффективности) светового режима с точки зрения затрат энергии. На этапе проектирования системы освещения птичника косвенной характеристикой эффективности светового режима может служить минимум Z – один из возможных критериев оптимального расположения светильников согласно [6].

Из формулы $Z = 1 + (E_{max} - E_{min})/(2E_{min})$ следует, что при $E_{max} > E_{min}$ минимальная неравномерность Z может быть достигнута тогда, когда минимальная освещенность E_{min} ста-

нет наибольшей из возможных вариантов. Поскольку $E_{max} > E_{min}$, то реальная минимальная неравномерность $Z_{min} > 1$ и может быть реализована при заданной потребляемой энергии. Необходимость повышения продуктивности птицы, с учетом особенностей ее поведения, приводит к проблеме создания эффективного режима расходования энергии на объекте АПК. При решении проблемы возникает задача оценки параметров оптимального пространственного расположения линий L_{onm} и H_{onm} , при которых минимальная освещенность E_{min} достигает максимума $(E_{min})_{max}$. Следовательно, $(E_{min})_{max}$, являясь необходимым и достаточным условием минимальной неравномерности Z_{min} , может служить критерием оптимального пространственного расположения линий L_{onm} и H_{onm} . Вопросы эффективного расходования энергии на производстве (включая объекты АПК [10, 12, 14]) относятся к приоритетным. Согласно Указам Президента РФ (в том числе согласно Указу от 18.06.2024 г. № 529 «Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий») задача актуальна и широко обсуждается в литературе [2–4, 8, 9].

Решить задачу при помощи целевой функции и матрицы Гессе или метода градиентного спуска для двух параметров [1] не удастся. Это объясняется тем, что на сегодняшний день законы распределения отраженной составляющей освещенности E_2 не известны, поэтому целевая функция, которая учитывала бы отраженный свет, через параметры L и H не выражается. Известные приближенные решения [3, 12] не учитывают влияния отраженного света. При попытках его учета рекомендуемые величины L_{onm} и H_{onm} имеют разброс более 33 % [4, 8], что вызывает сомнения по поводу применения этих рекомендаций на практике. Задача оценки L_{onm} решалась в [2], однако вопрос оценки H_{onm} в этой статье не рассматривался, а предложенный критерий для оценки L_{onm} обладает малой надежностью [9].

Практика и расчеты показывают, что в птичниках напольного содержания увеличение или снижение высоты подвеса светильников H соответственно увеличивает или снижает потребляемую светодиодами электроэнергию (примерно на 10 % на каждые 0,5 м относительно $H = 3$ м [4, 8]). Поэтому оценка H_{onm} и L_{onm} при современной тенденции роста стоимости электроэнергии имеет особую актуальность. Решение задачи возможно при помощи

одного критерия оптимальности. Выше сказано, что для однокритериальной (скалярной) оценки параметров H_{opt} и L_{opt} можно применять максимум минимальной освещенности $(E_{min})_{max}$.

Скалярный критерий $(E_{min})_{max}$ зависит от отраженной составляющей освещенности E_2 , учет которой сильно затрудняет решение задачи. Для преодоления трудностей учета E_2 необходимо $(E_{min})_{max}$ преобразовать в эквивалентную величину, явно зависящую только от прямой (или первичной) составляющей E_1 , поскольку ее расчет, например, точечным методом, в настоящее время не вызывает трудностей.

Цель исследования – оценить параметры оптимального пространственного расположения линий освещения птичника напольного содержания при помощи скалярного критерия, не зависящего от отраженной составляющей освещенности.

Материал и методы исследования. Рассмотрим птичник длиной a и шириной b , в котором начало O прямоугольной системы координат $OXYZ$ поместим в вершине трехгранного угла, образованного плоскостями пола S и стен P и Q (рис. 1а). Противоположные P и Q плоскости обозначим как \bar{P} и \bar{Q} (рис. 1б). Пусть на высоте H расположено N рядов (линий) светильников, ориентированных параллельно оси X , а длина каждого ряда равна a .

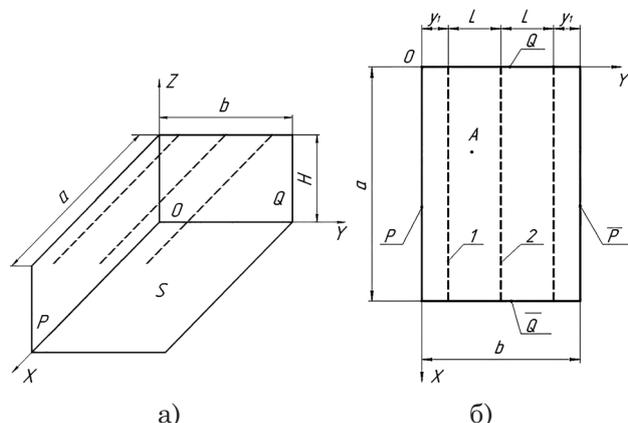


Рисунок 1 – Птичник с продольными рядами светодиодных светильников (штриховые линии):

- а) птичник в системе координат $OXYZ$;
- б) вид сверху; a – длина птичника; b – ширина птичника; H – высота подвеса рядов; S – плоскость пола; P, Q, \bar{P} и \bar{Q} – плоскости стен; L – расстояние между рядами; y_1 – расстояние между крайними рядами светильников и стенами; 1, 2 – номера рядов

Если расстояние между крайними рядами светильников и стенами (P или \bar{P}) равно y_1 ,

то равномерному распределению линий между первой и N -ой линиями соответствует расстояние L в виде

$$L_{opt} = \frac{b - 2y_1}{N - 1}, \tag{1}$$

тогда число линий N в нашей задаче должно быть не менее двух: $N \geq 2$.

В [6, 8] рассматривается освещение птичника шириной 18 м при $N = 4$. В ООО «Удмуртская птицефабрика» в птичниках шириной 12 и 18 м число линий N равно соответственно трем и четырем. Поэтому можно считать, что N (при стандартной ширине птичника, кратной 6 м) зависит от ширины b линейно:

$$N = 1 + \frac{b}{6}. \tag{2}$$

Далее параметры пространственного расположения линий светильников L и H будем обозначать одной буквой p , а их оптимальные значения L_{opt} и H_{opt} через p_{opt} . Освещенность E в точке A плоскости пола, имеющей координаты x и y , будем рассматривать как функцию $E = E(x, y, p)$. Известно, что освещенность – величина аддитивная, поэтому E в точке при параметрах p имеет вид:

$$E = E_1 + E_2, \tag{3}$$

где $E_1 = E_1(x, y, p)$ – прямая (или первичная) составляющая;

$E_2 = E_2(x, y, p)$ – отраженная составляющая освещенности.

Первичная составляющая $E_1(x, y, p)$, входящая в (3), может быть выражена через освещенность E_k , создаваемую точечным светодiodом с номером k , согласно принципу суперпозиции:

$$E_1(x, y, p) = \sum_{k=1}^n E_k(r_k), \tag{4}$$

где n – число всех светодiodов системы освещения птичника;

r_k – расстояние от светодiodа до точки, а освещенность E_k выражается согласно основному закону светотехники как

$$E_k(r_k) = \frac{I_\alpha \cos\theta(r_k)}{r_k^2}, \tag{5}$$

при этом сила света точечного светодiodа I_α подчиняется закону

$$I_a = I_0 \cos^m \theta (r_k), \tag{6}$$

где I_0 – осевая сила света светодиода с номером k ; $\theta(r_k)$ – угол между осевой линией кривой силы света и направлением на рассматриваемую точку.

Из (6) можно получить связь показателя степени m с углом раскрытия светового потока светодиода α_0 :

$$m = \frac{\ln 0.5}{\ln \cos(0,5\alpha_0)}. \tag{7}$$

Формулы (4)–(6) известны из многочисленной литературы, посвященной вопросам теории и методики светотехнических расчетов.

Отраженная составляющая освещенности $E_2(x, y, p)$, входящая в равенство (3), в модели больших диффузно отражающих поверхностей распределена равномерно [6], поэтому E_2 зависит от p , но не зависит от расстояния до рассматриваемой точки: $E_2(x, y, p) = E_2(p)$.

Из введения следует, что оптимальные параметры расположения линий p_{onm} – это геометрические параметры, при которых в птичнике достигается максимум минимальной освещенности E_{min} , который служит необходимым и достаточным условием минимальной неравномерности освещения Z_{min} :

$$E_{min}(p_{onm}) = (E_{min})_{max}, \tag{8}$$

$$Z(p_{onm}) = Z_{min}. \tag{9}$$

Однако $(E_{min})_{max}$ зависит от отраженной составляющей освещенности $E_2(p)$, сложность учета которой сильно затрудняет решение задачи. Поэтому $(E_{min})_{max}$ следует преобразовать в эквивалентный скалярный критерий, явно зависящий только от первичной составляющей E_1 , поскольку ее расчет в настоящее время не вызывает трудностей. С целью нахождения эквивалентного скалярного критерия запишем E_{min} согласно равенству (3):

$$E_{min} = E_{1min} + E_{2min}, \tag{10}$$

где E_{1min} , E_{2min} – первичная и отраженная составляющие освещенности в точке с минимальной освещенностью.

Для выполнения условия (8) необходимо и достаточно достижения максимума слагаемых, входящих в равенство (10):

$$E_{1min}(p_{onm}) = (E_{1min})_{max} = \varepsilon_{max} \text{ или } \varepsilon(p_{onm}) = \varepsilon_{max} \tag{11}$$

$$\text{и } E_{2min}(p_{onm}) = (E_{2min})_{max}, \tag{12}$$

где в условии (11) принято обозначение $\varepsilon = E_{1min}$ для первичной составляющей в точке с минимальной освещенностью.

Поскольку причиной возникновения отраженного света служит первичный свет, то можно предположить, что в точке с минимальной освещенностью величина отраженной составляющей E_{2min} зависит от величины первичной составляющей ε в этой же точке (отметим, что обратной зависимости нет). Тогда в линейном приближении зависимости E_{2min} от ε имеем

$$E_{2min} = c\varepsilon + d, \tag{13}$$

где c и d – коэффициенты линейной зависимости.

Если $\varepsilon = 0$, то $E_{2min} = 0$ (так как при отключении первичного освещения отраженный свет исчезает), поэтому в линейной зависимости (13) $d = 0$:

$$E_{2min} = c\varepsilon, \tag{14}$$

где c – положительная константа: $c > 0$.

Тогда в равенстве (10) E_{min} явно зависит только от величины первичной составляющей ε :

$$E_{min} = \varepsilon(1 + c), \tag{15}$$

а необходимое и достаточное условие для выполнения условия (8) теперь сводится к условию (11), поскольку $E_{2min}(p_{onm}) = (c\varepsilon)_{max} = c\varepsilon_{max}$.

Это означает, что для выполнения условия (12) необходимо и достаточно выполнения условия (11). Таким образом, экстремум $(E_{min})_{max}$ преобразован в эквивалентный экстремум $\varepsilon_{max} = \varepsilon(p_{onm})$ – максимум функции минимальной первичной освещенности $\varepsilon(p) = \varepsilon(L, H)$. Теперь при p_{onm} максимальность ε эквивалентна условию (8):

$$\varepsilon_{max} = \varepsilon(p_{onm}) \text{ или } \varepsilon_{max} = \varepsilon(L_{onm}, H_{onm}), \tag{16}$$

а ε_{max} является искомым скалярным критерием оптимального пространственного расположения линий, не зависящим от отраженной составляющей освещенности.

Перейдем к рассмотрению $Z(p_{onm})$, которая, согласно условию (9), равна минимальной неравномерности освещения Z_{min} . На этапе проектирования ее оценка проблематична, поскольку тоже зависит от отраженной составляющей освещенности E_2 . Поэтому Z_{min} следует преоб-

разовать в эквивалентную величину, явно зависящую только от первичной составляющей E_1 . Согласно введению, Z имеет вид

$$Z = 1 + \frac{E_{max} - E_{min}}{2E_{min}} \quad (17)$$

или

$$Z = 1 + \frac{K}{2}, \quad (18)$$

где

$$K = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{min}}. \quad (19)$$

Для достижения наименьшей величины Z_{min} при p_{opt} необходима и достаточна минимальность величины K , входящей в формулу (18):

$$K(p_{opt}) = K_{min}. \quad (20)$$

Запишем E_{max} согласно равенству (3):

$$E_{max} = E_{1max} + E_{2max}. \quad (21)$$

Как сказано выше, отраженная составляющая E_2 распределена равномерно [6], поэтому $E_{2max} = E_{2min} = E_2$. Тогда K по формуле (19) явно зависит только от первичных составляющих освещенности, поскольку в знаменателе (19) величина E_{min} , согласно формуле (15), выражается через ε :

$$K = \frac{E_{1max} - \varepsilon}{\varepsilon(1 + c)} \quad (22)$$

или

$$K = \frac{k_1}{1 + c}, \quad (23)$$

где

$$k_1 = \frac{E_{1max} - \varepsilon}{\varepsilon}. \quad (24)$$

Теперь для выполнения условия (9) необходима и достаточна минимальность величины k_1 , неявно входящей в формулу (22):

$$k_{1min} = k_1(p_{opt}). \quad (25)$$

Таким образом, экстремум Z_{min} преобразован в эквивалентный экстремум k_{1min} – минимум функции k_1 , определяемой по формуле (24). Для достижения минимальной величины

Z_{min} при p_{opt} необходима и достаточна минимальность величины k_1 . Поскольку функция k_1 по формуле (24) при p_{opt} имеет вид

$$k_1(p_{opt}) = \frac{E_{1max}(p_{opt}) - \varepsilon_{max}}{\varepsilon_{max}}, \quad (26)$$

то ε_{max} , независимо от величины $E_{1max}(p_{opt})$, должен быть максимумом двумерной функции $\varepsilon(p) = \varepsilon(L, H)$.

Алгоритм компьютерной оценки параметров L_{opt} и H_{opt} по скалярному критерию ε_{max} . Для оценки максимума функции $\varepsilon(p)$ воспользуемся математической моделью расчетов освещенности без учета отражения [3]. Основа этой модели представлена формулами (4)–(7). Алгоритм компьютерной оценки L_{opt} и H_{opt} продемонстрируем на примере реального птичника ООО «Удмуртская птицефабрика». Параметры светодиодного освещения этого птичника приведены в [2]: длина и ширина птичника соответственно $a = 78$ м и $b = 18$ м. Число светильников в птичнике, распределенных по $N = 4$ линиям, равно 160 (по 40 светильников на линии). Каждый светильник состоит из 16 светодиодов с осевой силой света $I_0 = 35,8$ кд и углом раскрытия светового потока светодиода $\alpha_0 = 120^\circ$. Потребляемая мощность одного светодиода 1 Вт, а их количество в птичнике 2560. Для расчета точечным методом освещенности E_1 любой точки обратимся к компьютерным расчетам, так как будем учитывать вклад всех точечных светодиодов в птичнике.

Максимум ε_{max} двумерной функции $\varepsilon(p)$ будем искать из двумерного массива дискретных величин функции $\varepsilon(p) = \varepsilon(L, H)$ в интервале возможных значений L_{opt} и H_{opt} с малыми шагами ΔL и ΔH . Интервал возможных значений L_{opt} можно установить, применяя выражение (1) [2, 3]:

$$\frac{b}{N + 1} \leq L_{opt} \leq \frac{b}{N - 1}. \quad (27)$$

Предварительные расчеты $\varepsilon(L, H)$ показали, что нижний предел $b/(N + 1)$ можно повысить до среднего значения величин $b/(N - 1)$ и $b/(N + 1)$, тогда вместо (27) будем иметь

$$\frac{Nb}{N^2 - 1} \leq L_{opt} \leq \frac{b}{N - 1}. \quad (28)$$

Поскольку интервал для H_{opt} теоретически установить не удастся, то воспользовались известными из [2, 4, 8] значениями:

$$2,5 \text{ м} \leq H_{\text{отм}} \leq 4,0 \text{ м}. \quad (29)$$

Для компьютерных расчетов $E_1(L, H, x, y, z = 0)$ применили алгоритм программы [11]. Предварительные расчеты показали, что минимум прямой освещенности E_1 следует искать при $x = 0$ (или $x = a = 78 \text{ м}$). Поэтому рассчитывался одномерный массив $E_1(L, H, x = 0, y, z = 0)$ при $x = 0$ вдоль оси y (то есть по ширине птичника b) с шагом $\Delta y = 0,01 \text{ м}$ при фиксированных L_i и H_j . После этого определялся минимальный элемент массива $E_{1\text{min}}(L_i, H_j, x = 0, y, z = 0) = \varepsilon_k(L_i, H_j)$. По минимальным элементам массива получена дискретная функция $\varepsilon = \varepsilon(L, H)$, представленная в таблице 1 (с шагами $\Delta L = \Delta H = 0,1 \text{ м}$).

Максимум ε_{max} в (26) является необходимым условием для минимума величины k_1 . В свою очередь $k_{1\text{min}}$ служит эквивалентом минимальной неравномерности освещения Z_{min} . Для подтверждения минимальности k_1 при ε_{max} возникла необходимость расчета входящего в (26) $E_{1\text{max}}$ – максимума первичной освещенности в зависимости от параметров расположения линий L и H . Предварительные расчеты показали, что $E_{1\text{max}}(H, L)$ следует искать при $x = a/2 = 39 \text{ м}$. Значения $E_{1\text{max}}(L_i, H_j, x = 39, y, z = 0)$ получены также при помощи алгоритма программы [11] и сведены в таблицу 2. По таблицам 1 и 2 получены значения $k_1(L, H)$ согласно формуле (24) и сведены в таблицу 3.

Таблица 1 – Дискретная зависимость минимальной первичной освещенности $\varepsilon(L, H)$, лк, от параметров расположения линий L и H

$L, \text{ м}$	$H, \text{ м}$										
	3	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4
4,8	47,27	47,54	47,77	47,96	48,11	48,23	48,33	48,39	48,44	48,47	48,48
4,9	49,84	49,99	50,11	50,18	50,23	50,25	50,25	50,22	50,18	50,13	50,07
5	52,42	52,45	52,44	52,39	52,33	52,24	52,14	52,21	51,89	51,76	51,61
5,1	54,99	54,88	54,73	54,57	54,38	54,19	53,98	53,77	53,55	53,33	53,10
5,2	57,51	57,24	56,96	56,67	56,36	56,06	55,74	55,43	55,13	54,82	54,52
5,3	59,57	59,5	59,08	58,66	58,23	57,82	57,40	57,00	56,6	56,22	55,84
5,4	58,11	59,06	59,92	60,5	59,96	59,44	58,93	58,44	57,96	57,50	57,05
5,5	56,68	57,65	58,53	59,32	60,03	60,66	60,30	59,72	59,17	58,64	58,12
5,6	55,29	56,28	57,18	57,99	58,72	59,36	59,94	60,44	60,21	59,62	59,05
5,7	53,93	54,94	55,85	56,68	57,43	58,10	58,69	59,22	59,68	60,08	59,82
5,8	52,61	53,63	54,56	55,4	56,17	56,86	57,48	58,02	58,51	58,93	59,29
5,9	51,32	52,35	53,3	54,16	54,94	55,65	56,28	56,85	57,36	57,80	58,19
6	50,07	51,11	52,06	52,94	53,73	54,45	55,11	55,70	56,22	56,69	57,10

Примечание: L – расстояние между линиями, H – высота подвеса линий над полом (число линий $N = 4$, ширина птичника $b = 18 \text{ м}$); выделенное жирным шрифтом значение 60,66 лк соответствует максимуму минимальной первичной освещенности при $x = 0$.

Таблица 2 – Дискретная зависимость максимальной первичной освещенности $E_{1\text{max}}(L, H)$, лк, от параметров расположения линий L и H

$L, \text{ м}$	$H, \text{ м}$										
	3	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4
4,8	205,9	202,9	200,2	197,7	195,4	193,2	191,2	189,4	187,7	186,1	184,6
4,9	203,7	200,6	197,8	195,3	192,9	190,8	188,7	186,9	185,1	183,5	182,0
5	201,5	198,4	195,6	192,0	190,6	188,4	186,4	184,5	182,7	181,1	179,5
5,1	199,5	196,6	193,5	190,8	188,4	186,2	184,1	182,2	180,4	178,7	177,2
5,2	197,6	194,4	191,5	188,8	186,3	184,0	181,9	180,0	178,2	176,5	174,9
5,3	195,8	192,5	189,6	186,8	184,3	182,0	179,9	177,9	176,1	174,4	172,8
5,4	194,1	190,8	187,8	185,0	182,4	180,1	177,9	175,9	174,1	172,3	170,7
5,5	192,4	189,1	186,0	183,2	180,6	178,3	176,1	174,0	172,1	170,4	168,7

Окончание таблицы 2

$L, \text{ м}$	$H, \text{ м}$										
	3	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4
5,6	190,9	187,5	184,4	181,6	178,9	176,5	174,3	172,2	170,3	168,5	166,9
5,7	189,4	186,0	182,9	180,0	177,3	174,9	172,6	170,5	168,5	166,7	165,1
5,8	188,1	184,6	181,4	178,5	175,8	173,3	171,0	168,8	166,9	165,0	163,3
5,9	186,7	183,2	180,0	177,0	174,3	171,8	169,4	167,3	165,3	163,4	161,7
6	185,5	181,9	178,7	175,6	172,9	170,3	167,9	165,8	163,7	161,8	160,1

Примечание: L – расстояние между линиями,

H – высота подвеса линий над полом (число линий $N = 4$, ширина птичника $b = 18$ м).

Таблица 3 – Дискретная зависимость $k_1(L, H)$ от параметров расположения линий L и H

$L, \text{ м}$	$H, \text{ м}$										
	3	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4
4,8	3,36	3,27	3,19	3,12	3,06	3,01	2,96	2,91	2,87	2,84	2,81
4,9	3,09	3,01	2,95	2,89	2,84	2,80	2,76	2,72	2,69	2,66	2,63
5	2,84	2,78	2,73	2,66	2,64	2,61	2,57	2,53	2,52	2,50	2,48
5,1	2,63	2,58	2,54	2,50	2,46	2,44	2,41	2,39	2,37	2,35	2,34
5,2	2,44	2,40	2,36	2,33	2,31	2,28	2,26	2,25	2,23	2,22	2,21
5,3	2,29	2,24	2,21	2,19	2,17	2,15	2,13	2,12	2,11	2,10	2,09
5,4	2,34	2,23	2,13	2,06	2,04	2,03	2,02	2,01	2,00	2,00	1,99
5,5	2,40	2,28	2,18	2,09	2,01	1,94	1,92	1,91	1,91	1,91	1,90
5,6	2,45	2,33	2,23	2,13	2,05	1,97	1,91	1,85	1,83	1,83	1,83
5,7	2,51	2,39	2,27	2,18	2,09	2,01	1,94	1,88	1,82	1,78	1,76
5,8	2,57	2,44	2,32	2,22	2,13	2,05	1,97	1,91	1,85	1,80	1,75
5,9	2,64	2,50	2,38	2,27	2,17	2,09	2,01	1,94	1,88	1,83	1,78
6	2,70	2,56	2,43	2,32	2,22	2,13	2,05	1,98	1,91	1,85	1,80

Примечание: L – расстояние между линиями, H – высота подвеса линий над полом (число линий $N = 4$, ширина птичника $b = 18$ м).

Результаты и обсуждение. В таблице 1 максимальная величина $\varepsilon_{max} = \varepsilon(L_{opt}, H_{opt}) = 60,66$ лк (выделена жирным шрифтом) находится на пересечении столбца $H = 3,5$ м и строки $L = 5,5$ м, следовательно, скалярному критерию ε_{max} соответствуют параметры оптимального пространственного расположения линий $L_{opt} = 5,5$ м и $H_{opt} = 3,5$ м.

Таблица 2 показывает, что максимальная первичная освещенность $E_{1max}(L, H)$ – гладкая функция, не имеющая экстремумов и монотонно убывающая при увеличении L и H . Поэтому $E_{1max}(L, H)$ вблизи точки, в том числе и вблизи $\rho_{opt}(L_{opt}, H_{opt})$, можно рассматривать как постоянную, влияющую на величину k_{1min} – минимум функции k_1 , но не влияющую на положение этого минимума, то есть на L_{opt} и H_{opt} .

Таблица 3, составленная при помощи таблиц 1 и 2 по формуле (24), показывает, что величина $k_1(L_{opt}, H_{opt}) = 1,94$ (выделена жирным шрифтом) является минимальной для высоты $H_{opt} = 3,5$ м при $L_{opt} = 5,5$ м. Это означает, что $k_{1min} = k_1(L_{opt}, H_{opt})$ служит эквивалентом минимума

неравномерности освещения Z_{min} , оценить который на этапе проектирования не удастся.

Сохранив $b = 18$ м, $N = 4$, число светильников в линии, равное 40, и угол раскрытия светового потока светодиода $\alpha = 120^\circ$, мы оценивали L_{opt} и H_{opt} для двух значений длины птичника a : 66 и 96 м. Результаты оценки показали отличие вышеприведенных значений L_{opt} и H_{opt} на величину меньшую 1 %. После этого, сохранив $b = 18$ м, $a = 78$ м, $N = 4$, число светильников в линии, равное 40, и угол раскрытия светового потока светодиода $\alpha = 120^\circ$, мы оценивали L_{opt} и H_{opt} для трех значений осевой силой света I_0 : 12, 24 и 48 кд. Результаты оценки также показали практическую неизменность вышеприведенных значений L_{opt} и H_{opt} для птичника шириной 18 м.

Величины $L_{opt} = 5,5$ м и $H_{opt} = 3,5$ м, полученные по таблице 1 для скалярного критерия $\varepsilon_{max} = 60,66$ лк, согласуются с реальными значениями $L = 5,4$ м и $H = 3,5$ м для линий освещения птичника ООО «Удмуртская птицефабрика». Этот факт косвенно говорит

об адекватности предложенного алгоритма компьютерной оценки L_{opt} и H_{opt} по скалярному критерию ε_{max} и позволяет оценить параметры оптимального пространственного расположения линий других птичников, отличающихся шириной b . Поэтому далее выполнялась оценка L_{opt} и H_{opt} с меньшими шагами $\Delta L = \Delta H = 0,01$ м для птичников стандартной ширины, кратной 6 м: 6, 12, 18 и 24 м. При этом получены значения скалярного критерия ε_{max} в зависимости от ширины b . Параметры L_{opt} и H_{opt} , оценка которых выполнена по скалярным критериям $\varepsilon_{max}(b)$, сведены в таблицу 4 (в том числе и для птичника шириной 18 м). Поскольку изменение длины птичника a и осевой силы света светодиода I_0 практически не влияет на значения L_{opt} и H_{opt} , то расчеты проводились при вышеуказанных параметрах птичника ООО «Удмуртская птицефабрика».

Таблица 4 – Результаты оценки оптимального расстояния между линиями L_{opt} и их оптимальной высоты подвеса H_{opt} для четырех птичников шириной, кратной 6 м

№	b , м	N	H_{opt} , м	L_{opt} , м	ε_{max} , ЛК
1	6	2	2,47	4,24	67,07
2	12	3	3,18	5,16	62,31
3	18	4	3,50	5,49	60,76
4	24	5	3,70	5,66	60,07

Примечание: в правой колонке приведены значения $\varepsilon_{max}(b)$, при которых получены H_{opt} и L_{opt} ; b – ширина птичника; N – число линий определялось по формуле (2).

Аппроксимация величин таблицы 4 квадратичными функциями приводит к следующим зависимостям H_{opt} и L_{opt} от ширины птичника b :

$$\begin{cases} H_{opt}(b) = -0,0035b^2 + 0,1731b + 1,5725 \\ \text{с достоверностью } R^2 = 0,9958, \\ L_{opt}(b) = -0,0052b^2 + 0,2328b + 3,0525 \\ \text{с достоверностью } R^2 = 0,9923. \end{cases} \quad (30)$$

Квадратичные функции образуют систему (30), позволяющую оценить H_{opt} и L_{opt} и для птичников, ширина которых отличается от стандартной, если $6 \text{ м} < b < 24 \text{ м}$. При этом число линий по формуле $N = 1 + b/6$ округляется до целого. Отличие результатов расчета $H_{opt}(b)$ и $L_{opt}(b)$ по аналитическим зависимостям (30) от их компьютерных оценок меньше 2 %. Следовательно, инженерная экспресс-

оценка параметров оптимального пространственного расположения линий птичников по формулам (30) с приемлемой для практики точностью адекватна компьютерной оценке.

Выводы:

1. Получена компьютерная оценка параметров оптимального пространственного расположения линий L_{opt} и H_{opt} четырех птичников шириной b , кратной 6 м, при помощи скалярного критерия – максимума функции минимальной первичной освещенности, не зависящей от отраженной составляющей освещенности.

2. Полученные результаты аппроксимированы квадратичными функциями, представленными системой (30), которая позволяет выполнить экспресс-оценку L_{opt} и H_{opt} тех птичников, ширина которых находится в интервале $6 \text{ м} \leq b \leq 24 \text{ м}$.

3. Экспресс-оценка L_{opt} и H_{opt} по аналитическим зависимостям (30), адекватная компьютерным оценкам с погрешностью не более 2 %, может представлять интерес для специалистов на этапе проектирования системы светодиодного освещения птичников.

Список источников

1. Аттетков А. В., Галкин С. В., Зарубин В. С. Методы оптимизации / Под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 440 с.
2. Галлямова Т. Р. Критериальная оценка оптимального расположения продольных линий светильников при напольном содержании птицы // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2023. Т. 70, № 3 (52). С. 41–47. DOI 10.22314/2658-4859-2023-70-3-41-47. EDN CJUJH.
3. Галлямова Т. Р. Метод оценки оптимальных параметров системы светодиодного освещения при напольном содержании птиц // Достижения науки и техники АПК. 2016. Т. 30, № 7. С. 100–104.
4. Гладин Д. В., Кавтарашвили А. Ш. Алгоритм организации светодиодного освещения при содержании птиц на полу // Птицеводство. 2020. № 9. С. 48–52.
5. Гладин Д. В., Кавтарашвили А. Ш. Современная концепция освещения в птицеводстве // Вестник аграрной науки. 2022. № 1 (94). С. 45–53. DOI: 10.17238/issn2587-666X.2022.1.45.
6. Кнорринг Г. М. Светотехнические расчеты в установках искусственного освещения. Ленинград: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1973. 200 с.
7. Кузнецов А. Ф., Никитин Г. С. Современные технологии и гигиена содержания птицы. Санкт-Петербург: Лань, 2012. 352 с.
8. Наставления по использованию светодиодного освещения в птицеводстве / А. Ш. Кавтарашви-

ли, Д. В. Гладин, Е. Н. Новоторов [и др.]. Сергиев Посад: Лика, 2020. 171 с.

9. Обоснование критерия оптимального расположения линий освещения горизонтальной рабочей поверхности объекта АПК / Т. Р. Галлямова, П. Н. Покоев, Л. А. Пантелеева, И. В. Решетникова // Современные тенденции технологического развития АПК: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной Десятилетию науки и технологий и 300-летию Российской академии наук. В 2 томах. Ижевск, 2024. С. 250–252.

10. Показатели энергоэффективного производства в вопросах экономии электроэнергии / З. Р. Кудяев, А. Б. Барагунов, А. А. Кумахов, С. Х. Кушаев // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2023. Т. 70, № 3 (52). С. 35–40. DOI 10.22314/2658-4859-2023-70-3-35-40. EDN JCWJBI.

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

12. Юферев Л. Ю. Энергосберегающее освещение сельскохозяйственных помещений и расчет его параметров // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15, № 3. С. 28–34.

13. Li G., Li B., Shi Z., et al. Design and evaluation of a lighting preference test system for laying hens. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018; 147: 118-125.

14. Thomson A., Corscadden K. Improving energy efficiency in poultry farms through LED usage: a provincial study. *Energy Efficiency*. 2018; 11 (4): 927-938.

References

1. Attetkov A. V., Galkin S. V., Zarubin V. S. *Metody optimizatsii* / Pod red. V. S. Zarubina, A. P. Krishchenko. Moskva: MGTU im. N. E. Bauman, 2001. 440 s.

2. Gallyamova T. R. Kriterial'naya ocenka optimal'nogo raspolozheniya prodol'nyh linii svetil'nikov pri napol'nom sodержanii pticy // *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2023. Т. 70, № 3 (52). С. 41–47. DOI 10.22314/2658-4859-2023-70-3-41-47. EDN CJUJH.

3. Gallyamova T. R. Metod ocenki optimal'nyh parametrov sistemy svetodiodnogo osveshcheniya pri napol'nom sodержanii ptic // *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*. 2016. Т. 30, № 7. С. 100–104.

4. Gladin D. V., Kavtarashvili A. Sh. Algoritm organizatsii svetodiodnogo osveshcheniya pri sodержanii ptic na polu // *Pticevodstvo*. 2020. № 9. С. 48–52.

5. Gladin D. V., Kavtarashvili A. Sh. Sovremennaya koncepciya osveshcheniya v pticevodstve // *Vestnik agrarnoj nauki*. 2022. № 1 (94). С. 45–53. DOI: 10.17238/issn2587-666X.2022.1.45.

6. Knorring G. M. *Svetotekhnicheskie raschety v ustanovkakh iskusstvennogo osveshcheniya*. Leningrad: Energiya, Leningr. otd-nie, 1973. 200 s.

7. Kuznecov A. F., Nikitin G. S. *Sovremennye tekhnologii i gigiena sodержaniya pticy*. Sankt-Peterburg: Lan', 2012. 352 s.

8. Nastavleniya po ispol'zovaniyu svetodiodnogo osveshcheniya v pticevodstve / A. Sh. Kavtarashvili, D. V. Gladin, E. N. Novotorov [i dr.]. Serгиеv Posad: Lika, 2020. 171 s.

9. Obosnovanie kriteriya optimal'nogo raspolozheniya linii osveshcheniya gorizontальной rabochej poverhnosti ob"ekta APK / Т. Р. Gallyamova, P. N. Pokoev, L. A. Panteleeva, I. V. Reshetnikova // *Sovremennye tendencii tekhnologicheskogo razvitiya APK: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj Desyatiletiju nauki i tekhnologii i 300-letiyu Rossijskoj akademii nauk*. V 2 tomah. Izhevsk, 2024. С. 250–252.

10. Pokazateli energoeffektivnogo proizvodstva v voprosah ekonomii elektroenergii / Z. R. Kudaev, A. B. Baragunov, A. A. Kumahov, S. H. Kushaev // *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2023. Т. 70, № 3 (52). С. 35–40. DOI 10.22314/2658-4859-2023-70-3-35-40. EDN JCWJBI.

11. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registratsii programmy dlya EVM № 2015617923 Programma rascheta optimal'nogo chisla svetodiodov v sisteme osveshcheniya ptichnika / Т. Р. Gallyamova, Т. А. Shirobokova; zayavitel' i patentoobladatel' FGBOU VPO Izhevskaya GSKHA. № 2013116823/07; zayavl. 12.01.2015; opubl. 24.07.2015.

12. Yuferev L. Yu. Energoberegayushchee osveshchenie sel'skokozyajstvennyh pomeshchenij i raschet ego parametrov // *Sel'skokozyajstvennyye mashiny i tekhnologii*. 2021. Т. 15, № 3. С. 28–34.

13. Li G., Li B., Shi Z., et al. Design and evaluation of a lighting preference test system for laying hens. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018; 147: 118-125.

14. Thomson A., Corscadden K. Improving energy efficiency in poultry farms through LED usage: a provincial study. *Energy Efficiency*. 2018; 11 (4): 927-938.

Сведения об авторах:

Т. Р. Галлямова , кандидат технических наук, доцент;

Д. А. Васильев, старший преподаватель

Удмуртский ГАУ, ул. Студенческая, 11, Ижевск, Россия, 426069

trgall11@yandex.ru

Original article

SCALAR ESTIMATION OF THE PARAMETERS FOR THE OPTIMAL SPATIAL ARRANGEMENT OF THE LIGHTING LINES IN A POULTRY FLOOR HOUSE

Tatiana R. Gallyamova[✉], Daniil A. Vasiliev

Udmurt State Agricultural University, Izhevsk, Russia

[✉]trgall11@yandex.ru

Abstract. The article considers the poultry floor house, for its lighting N longitudinal lines of LED lamps are used. The location of the lines is characterized by the distance L between them and the height of their suspension H . The need to increase poultry productivity leads to the problem of creating an efficient energy consumption regime at an agricultural unit. The solving of the problem requires consideration of the issue of estimating the parameters of the optimal spatial arrangement of the lines L_{opt} and H_{opt} . The issues of efficient energy consumption in production are of primary importance, so this task is relevant. The purpose of the study is to evaluate the parameters of the optimal spatial arrangement of the lighting lines of the poultry floor house using a scalar criterion that does not depend on the reflected component of illuminance. We determined that the criterion could be $(E_{min})_{max}$, the maximum of minimum light intensity. We converted $(E_{min})_{max}$ into the equivalent criterion of ε_{max} , independent of the reflected component of illuminance. An algorithm for computer evaluation of L_{opt} and H_{opt} according to the ε_{max} criterion was developed. Computer calculations demonstrated the assessment of the L_{opt} and H_{opt} of the poultry house with a width of 18 m. We received an estimate of $L_{opt} = 5.5$ m and $H_{opt} = 3.5$ m, consistent with the values of L and H of the poultry house of LLC Udmurt Poultry Farm. Poultry houses of standard width b , multiple of 6 m, were examined. The results of the evaluation of the L_{opt} and H_{opt} in the form of a table were presented. The tabular dependencies of $L_{opt}(b)$ and $H_{opt}(b)$ were approximated by quadratic functions. We obtained a computer assessment of the L_{opt} and H_{opt} of four poultry houses with a width multiple of 6 m using a scalar criterion independent of the reflected component of illumination. The evaluation results were presented in the table. It has been determined that the approximation of tabular results by analytical functions makes it possible to perform an express assessment of the L_{opt} and H_{opt} of poultry houses, the width of which is in the range of $6\text{ m} \leq b \leq 24\text{ m}$. We can state that an express assessment adequate to computer estimation with an error of no more than 2 % may be of interest to specialists at the design stage of the LED lighting system of poultry houses.

Key words: LED lighting, illumination, energy efficiency, unevenness of illumination, criterion, express assessment, poultry floor house.

For citation: Gallyamova T. R., Vasiliev D. A. Scalar estimation of the parameters for the optimal spatial arrangement of the lighting lines in a poultry floor house. The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy. 2024; 4(80): 150-159. (In Russ.). https://doi.org/10.48012/1817-5457_2024_4_150-159.

Authors:

T. R. Gallyamova[✉], Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

D. A. Vasiliev, Senior Lecturer

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

[✉]trgall11@yandex.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: the authors declare that they have no conflicts of interest.

Статья поступила в редакцию 03.04.2024; одобрена после рецензирования 15.10.2024;
принята к публикации 26.11.2024.

The article was submitted 03.04.2024; approved after reviewing 15.10.2024; accepted for publication 26.11.2024.