

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАРУЖНОГО ОСВЕЩЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

**Евгений Александрович Андрианов
Алексей Александрович Андрианов
Федор Александрович Тимошенко
Андрей Сергеевич Хромко**

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

Наиболее актуально вопрос сбережения электроэнергии стоит перед сельскохозяйственными предприятиями, где работы зачастую ведутся круглосуточно. Одним из ресурсосберегающих направлений повышения эффективности использования прожекторного освещения сельскохозяйственных производственных объектов является оптимизация их конструктивно-технологических параметров. В задачи исследований входило определение координат расположения, углов поворота и наклона прожекторов, а также расстояния от мачт до освещаемой площадки. Для выбора оптимальных конструктивно-технологических параметров прожекторной установки авторами предложен метод планирования эксперимента с использованием специальной компьютерной программы DIALux 4.9. Приведены расчетные схемы для обоснования параметров прожекторной установки. Для получения эмпирических моделей использовали ортогональный центрально-композиционный план (ОЦКП) второго порядка. В качестве критериев оптимизации выбраны коэффициент неравномерности освещения и средняя освещенность площадки. С целью получения уравнений регрессии, которые адекватно аппроксимируют расчетные значения, использовали программы «Statistica» и «Excel». Приведен пример расчета прожекторного освещения двора ремонтной мастерской с обоснованием его конструктивно-технологических параметров. В результате обработки расчетных данных получены уравнения регрессии, позволяющие определить координаты расположения, углы поворота и наклона прожекторов, а также расстояние от мачт до освещаемой площадки. Уравнения регрессии адекватно описывают расчетные данные с относительной погрешностью не более 2,5%. В результате анализа полученных графических зависимостей установлены конструктивно-технологические параметры прожекторной установки: координаты расположения 1-й и 2-й мачты; расстояние от мачт прожекторов до освещаемой площадки; угол наклона прожекторов; углы поворота 1-го и 2-го прожекторов; мощность прожекторной установки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сельскохозяйственные объекты, конструктивно-технологические параметры, координата расположения, угол поворота, угол наклона, ортогональный центрально-композиционный план.

IMPROVEMENTS IN EFFECTIVENESS OF AN EXTERIOR LIGHTING OF AGRICULTURAL PRODUCTION FACILITIES

**Evgeniy A. Andrianov
Aleksey A. Andrianov
Fyodor A. Timoshenko
Andrey S. Khromko**

Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

Many agricultural enterprises with continuous operation throughout the day face a task of energy conservation. One of the possible ways of energy saving practices and efficiency enhancement of floodlighting of agricultural production facilities is optimization of design and process parameters of equipment components being in use. The authors undertook a study with the purpose of determining the coordinates of the location, the angles of rotation and the inclination of the projectors, as well as the distance from the towers to the illuminated object, proposed experiment planning procedure using special computer program DIALux 4.9, and also discussed the examples of calculation model of floodlighting device. In order to obtain empirical models, second-order orthogonal central composite design was used. Illumination irregularity ratio and average illumination of the area were selected as optimization criteria. In order to obtain regression equations that adequately approximate the calculated values, a set of software packages and add-ons Statistica, as well as an operating system Excel were used. The example of calculation of flood lighting of the yard of the repair shop with design and process parameters validation was

given. As a result of processing the calculation data the regression equations were obtained. These equations made it possible to determine the coordinates of the location, the angles of rotation, the inclination of the projectors, as well as the distance from the towers to the illuminated object. The regression equations adequately govern the estimated data with an accuracy of no more than 2.5%. Design and process parameters of floodlight unit were defined as follows from the analysis of the obtained characteristic curves: i.e. coordinates of location of the 1st and the 2nd towers; the distance from floodlight towers to the illuminated area; the angles of inclination of the projectors; the angle of rotation of the 1st and the 2nd floodlights; power of floodlight unit.

KEYWORDS: agricultural production facilities, design and process parameters, coordinate of location, angle of rotation, angle of inclination, orthogonal central composite design.

Введение

Наружное освещение предназначено для создания необходимых условий различения объектов перед входами в здания, на дорогах и охраняемых площадках. Установки прожекторного освещения, которые используются для наружного освещения, требуют значительного расхода электроэнергии на их эксплуатацию. Наиболее актуально вопрос ресурсосбережения стоит перед сельскохозяйственными предприятиями, где работы зачастую ведутся круглосуточно. Одним из ресурсосберегающих направлений повышения эффективности использования прожекторного освещения сельскохозяйственных производственных объектов является оптимизация их конструктивно-технологических параметров [1, 4, 5, 8, 9, 11].

Цель проведенных исследований заключалась в повышении эффективности использования прожекторных установок на основе оптимизации их конструктивно-технологических параметров.

Методика исследований

Объектом исследования является наружное освещение территории двора ремонтной мастерской сельскохозяйственного предприятия.

Предмет исследования – закономерности изменения показателей наружного освещения территории двора ремонтной мастерской сельскохозяйственного предприятия в зависимости от его конструктивно-режимных параметров.

Требуется определить положения мачт прожекторов территории двора ремонтной мастерской сельскохозяйственного предприятия, при которых коэффициент неравномерности освещения будет минимальным, а средняя освещенность максимальной.

Для решения задачи, при которой достигаются оптимальные координаты расположения прожекторов, предлагается установка мачт прожекторов согласно схеме (рис. 1).

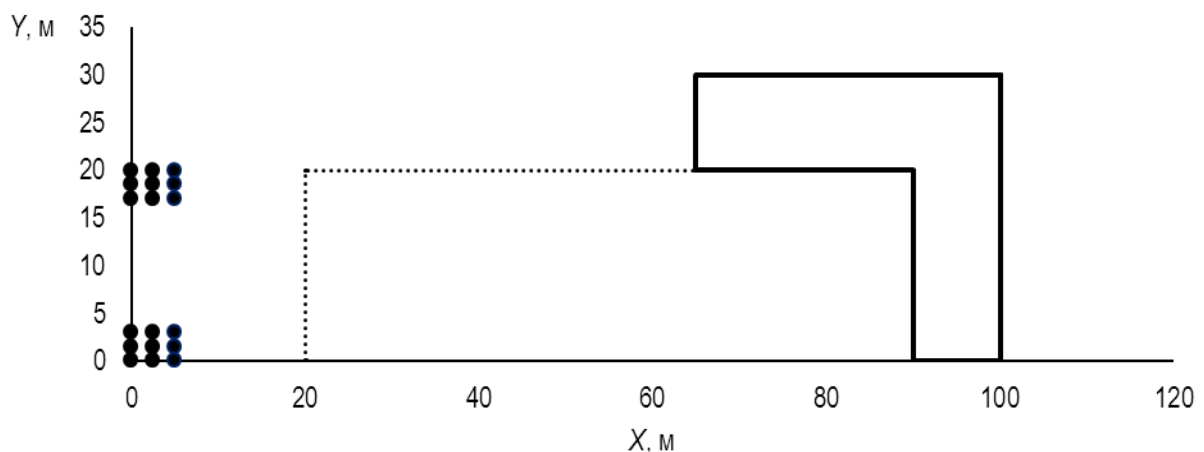


Рис. 1. Схема установки мачт прожекторов

Так как оптимальное расположение мачт прожекторов при заданных условиях определяется двумя факторами (y_1 и y_2 – координатами их расположения), в качестве ядра ортогонального центрально-композиционного плана (ОЦКП) второго порядка принимаем план ПФЭ 2^2 . Проведем кодирование координат расположения мачт (табл. 1).

Границами области исследования будут нижний и верхний уровни изменения соответствующих факторов [6, 7].

Таблица 1. Уровни варьирования для двух факторов

Наименование фактора	Кодированное обозначение	Интервал варьирования	Уровни варьирования		
			-1	0	+1
Y_1 – координата расположения 1-й мачты, м	y_1	2	0	2	4
Y_2 – координата расположения 2-й мачты, м	y_2	2	16	18	20

Далее необходима оптимизация расстояния от мачт прожекторов до освещаемой площадки, то есть требуется определить расстояния от мачт до освещаемой площадки, при которых коэффициент неравномерности освещения будет минимальным. Границами области исследования будут нижний и верхний уровни изменения соответствующего фактора. Результаты кодирования представлены в таблице 2.

Таблица 2. Уровни варьирования для фактора

Наименование фактора	Кодированное обозначение	Интервал варьирования	Уровни варьирования		
			-1	0	+1
s – расстояние от мачт до освещаемой площадки, м	x	4	11	15	19

После того как установлены координаты расположения мачт прожекторов и их расстояние от освещаемой площадки, необходима оптимизация углов поворота прожекторов, то есть требуется определить углы поворота прожекторов, при которых коэффициент неравномерности освещения будет минимальным. Схема установки прожекторов показана на рисунке 2.

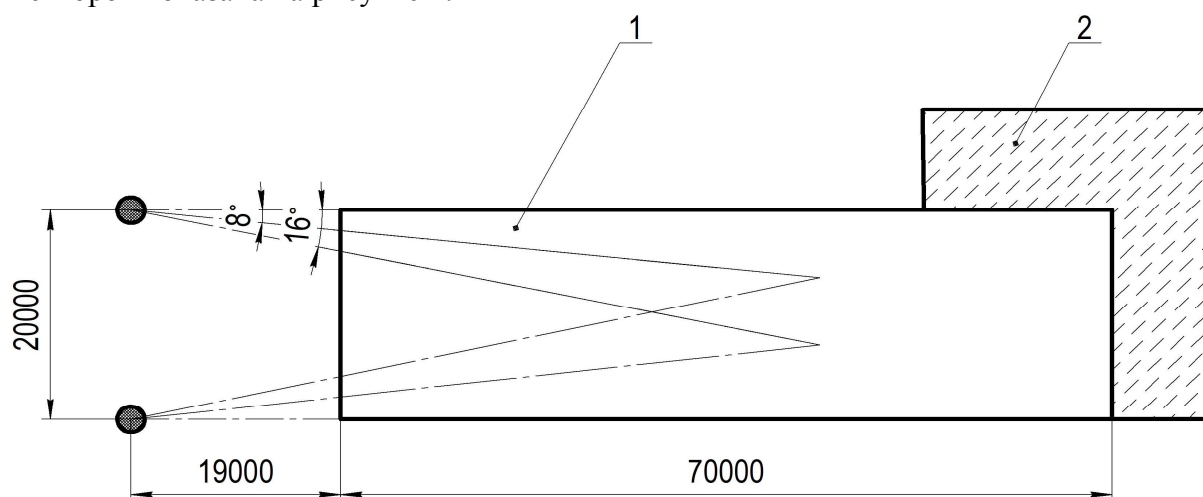


Рис. 2. Схема установки углов поворота прожекторов:
1 – освещаемая площадка; 2 – здание

Так как оптимальное положение прожекторов при заданных условиях определяется двумя факторами (x_1 и x_2 – углом их поворота от центрального положения), в качестве ядра ОЦКП второго порядка принимаем план ПФЭ 2^2 . Границами области исследова-

дования будут нижний и верхний уровни изменения соответствующего фактора, результаты кодирования которых представлены в таблице 3 [6, 7].

Таблица 3. Уровни варьирования для двух факторов

Наименование фактора	Кодированное обозначение	Интервал варьирования	Уровни варьирования		
			-1	0	+1
φ_1 – угол поворота 1-го прожектора, град	x_1	8	0	8	16
φ_2 – угол поворота 2-го прожектора, град	x_2	8	0	8	16

Далее, установив величины углов поворота прожекторов, проводим оптимизацию угла наклона прожектора относительно поверхности освещаемой площадки, при котором коэффициент неравномерности освещения будет минимальным, а средняя освещенность – максимальной. Схема установки прожекторов показана на рисунке 3. Границами области исследования будут нижний и верхний уровни изменения соответствующего фактора, результаты кодирования которых представлены в таблице 4.

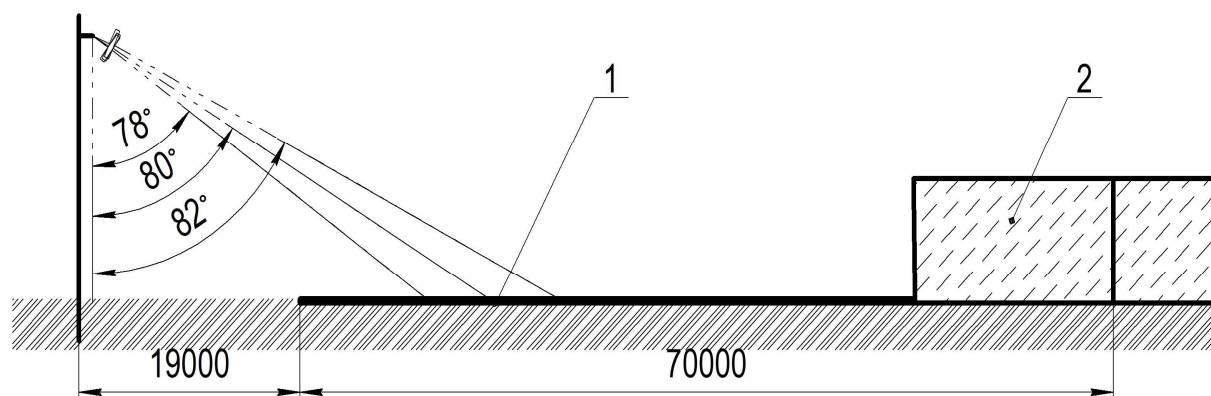


Рис. 3. Схема установки угла наклона прожектора: 1 – освещаемая площадка, 2 – здание

Таблица 4. Уровни варьирования для фактора

Наименование фактора	Кодированное обозначение	Интервал варьирования	Уровни варьирования		
			-1	0	+1
α – угол наклона прожектора, град	x	2	78	80	82

Метод планирования эксперимента позволяет определить конструктивно-технологические параметры проектируемого технического средства. Для получения уравнений регрессии по определению коэффициента неравномерности освещения и средней освещенности использовали ортогональный центрально-композиционный план (ОЦКП) [7]. При проведении расчетов коэффициента неравномерности освещения и средней освещенности площадки использовали специальную программу DIALux 4.9, при этом мощность одного прожектора устанавливали равной 1 кВт [12].

Результаты и их обсуждение

Матрица планирования и результаты расчетов коэффициента неравномерности освещения для выбора координат мачт прожекторов представлены в таблице 5.

Таблица 5. Рабочая матрица планирования и результаты расчетов

№	Факторы эксперимента		Критерий оптимизации
	Y_1 – координата расположения 1-й мачты, м	Y_2 – координата расположения 2-й мачты, м	K – коэффициент неравномерности
1	4	20	5,91716
2	4	16	6,17284
3	0	20	5,376344
4	0	16	5,649718
5	2	18	5,813953
6	4	18	6,060606
7	0	18	5,524862
8	2	20	5,649718
9	2	16	5,91716

Для аппроксимации расчетных значений использовали программу «Statistica 12» с целью получения уравнения регрессии [10].

После раскодирования уравнение регрессии приобретает вид

$$K = 5,12981 + 0,12429 Y_1 + 0,11307 Y_2 + 0,00110 Y_1 Y_2 - 0,0027 Y_1^2 - 0,00504 Y_2^2, \quad (1)$$

где K – коэффициент неравномерности освещения;

Y_1 – координата расположения 1-й мачты, м;

Y_2 – координата расположения 2-й мачты, м [10].

Уравнения регрессии адекватно описывают расчетные данные с абсолютной погрешностью $\delta = 0,006$ м (или с относительной погрешностью $\Delta = 0,106\%$).

Графическая зависимость коэффициента неравномерности освещения от координат мачт прожекторов представлена на рисунке 4.

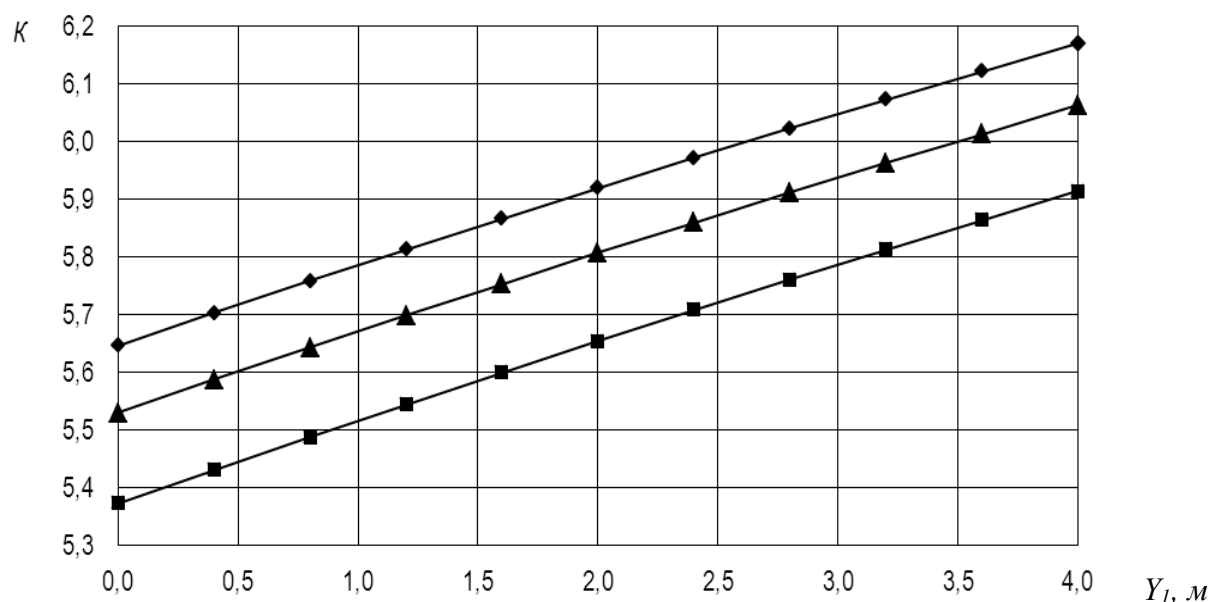


Рис. 4. Графическая зависимость коэффициента неравномерности освещения от координат мачт прожекторов: \blacklozenge – $Y_2 = 16$ м; \blacktriangle – $Y_2 = 18$ м; \blacksquare – $Y_2 = 20$ м

В результате анализа графической зависимости установлены координаты расположения мачт:

- координата расположения 1-й мачты $Y_1 = 0$ м;
- координата расположения 2-й мачты $Y_2 = 20$ м.

Матрица планирования и результаты расчетов коэффициента неравномерности освещения и средней освещенности площадки для выбора необходимого расстояния от мачт прожекторов до освещаемой площадки представлены в таблице 6.

Таблица 6. Рабочая матрица планирования и результаты расчетов

№	Фактор эксперимента	Критерий оптимизации	
	x – координата расположения, м	K – коэффициент неравномерности	E_{cp} – средняя освещенность
1	11	5,747126	12
2	15	5,376344	10
3	19	5,025126	8,5

Для аппроксимации расчетных значений использовали программу «Excel» с целью получения уравнения регрессии [2, 3].

После раскодирования уравнение регрессии для получения коэффициента неравномерности освещения приобретает вид

$$K = -0,0903 s + 6,7366, \quad (2)$$

где K – коэффициент неравномерности освещения;

s – расстояние от мачт прожекторов до освещаемой площадки, м.

После раскодирования уравнение регрессии для получения средней освещенности приобретает вид

$$E_{cp} = 0,0156 s^2 - 0,9063 s + 20,078, \quad (3)$$

где E_{cp} – средняя освещенность, лк.

Графики зависимостей по данным уравнениям регрессии представлены на рисунке 5.

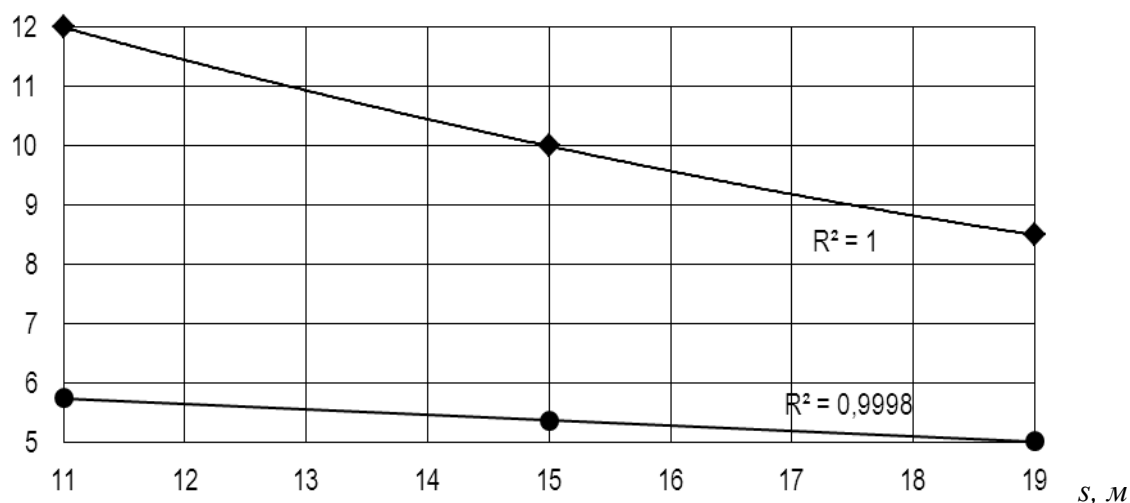


Рис. 5. Графическая зависимость коэффициента неравномерности освещения и средней освещенности от расстояния от мачт прожекторов до освещаемой площадки: —●— — коэффициент неравномерности освещения, K ; —◆— — средняя освещенность, E_{cp} , лк

В результате анализа данных рисунка 5 установлено расстояние от мачт прожекторов до освещаемой площадки $s = 19$ м.

Матрица планирования и результаты расчетов коэффициента неравномерности освещения и средней освещенности площадки для выбора угла поворота прожекторов представлены в таблице 7.

Таблица 7. Рабочая матрица планирования и результаты расчетов

№	Факторы эксперимента		Критерий оптимизации	
	φ_1 – угол поворота 1-го прожектора, град	φ_2 – угол поворота 2-го прожектора, град	K – коэффициент неравномерности освещения	E_{cp} – средняя освещенность
1	16	16	5,71	9,27
2	16	0	5,59	8,78
3	0	16	5,59	8,77
4	0	0	5,03	8,31
5	8	8	5,26	9,14
6	16	8	5,75	9,22
7	0	8	5,21	8,74
8	8	16	5,41	9,19
9	8	0	5,35	8,72

Для аппроксимации расчетных значений использовали программу «Statistica 12» с целью получения уравнения регрессии [10].

После раскодирования уравнение регрессии для получения коэффициента неравномерности освещения приобретает вид

$$K = 5,0519 + 0,00451 \varphi_1 + 0,01980 \varphi_2 - 0,00169 \varphi_1 \varphi_2 + 0,002163 \varphi_1^2 + 0,00058 \varphi_2^2, \quad (4)$$

где K – коэффициент неравномерности освещения;

φ_1 – угол поворота 1-го прожектора, град;

φ_2 – угол поворота 2-го прожектора, град.

Уравнение регрессии адекватно описывает расчетные данные с абсолютной погрешностью $\delta = 0,12$ град (или с относительной погрешностью $\Delta = 2,31\%$).

После раскодирования уравнение регрессии для определения средней освещенности приобретает вид

$$E_{cp} = 8,3133 + 0,07168 \varphi_1 + 0,0773130 \varphi_2 + 0,000117 \varphi_1 \varphi_2 - 0,0026 \varphi_1^2 - 0,0030 \varphi_2^2, \quad (5)$$

где E_{cp} – средняя освещенность, лк.

Графики зависимостей по данным уравнениям регрессии представлены на рисунках 6 и 7.

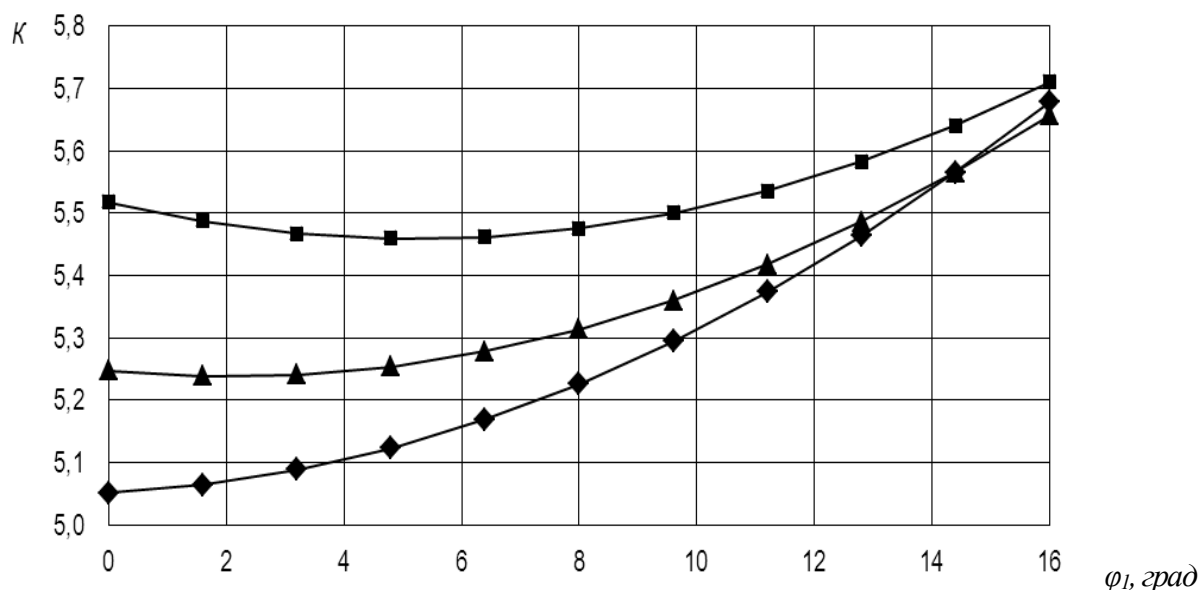


Рис. 6. Графическая зависимость коэффициента неравномерности освещения от угла поворота прожекторов: \blacklozenge – $\varphi_2 = 0$ град; \blacktriangle – $\varphi_2 = 8$ град; \blacksquare – $\varphi_2 = 16$ град

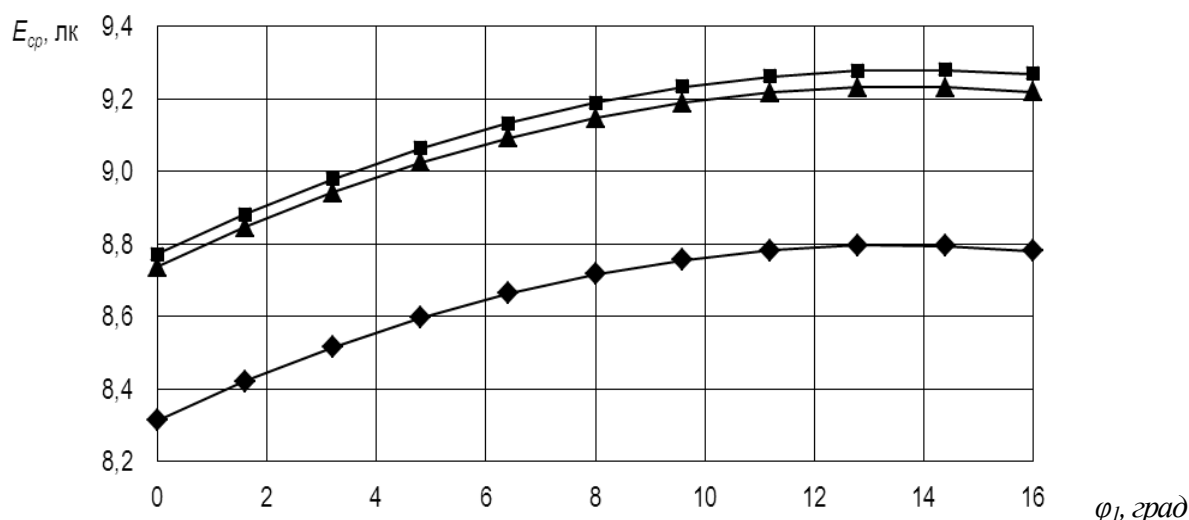


Рис. 7. Графическая зависимость средней освещенности площадки от угла поворота прожекторов:
 -◆- - $\varphi_2 = 0$ град; -▲- - $\varphi_2 = 8$ град; -■- - $\varphi_2 = 16$ град

В результате анализа данных, представленных на рисунках 6 и 7, установлены углы поворота прожекторов:

- угол поворота 1-го прожектора $\varphi_1 = 14$ град;
- угол поворота 2-го прожектора $\varphi_2 = 13$ град.

Матрица планирования и результаты расчетов коэффициента неравномерности освещения и средней освещенности площадки для выбора угла наклона прожекторов представлены в таблице 8.

Таблица 8. Рабочая матрица планирования и результаты опытов

№	Фактор эксперимента	Критерий оптимизации	
	α – угол наклона прожектора, град	K – коэффициент неравномерности	$E_{ср}$ – средняя освещенность
1	78	6,329114	9,96
2	80	5,555556	9,29
3	82	4,901961	8,54

Для аппроксимации расчетных значений использовали программу «Excel» с целью получения уравнения регрессии [2, 3].

После раскодирования уравнение регрессии для коэффициента неравномерности освещения приобретает вид

$$K = 0,015 \alpha^2 - 2,7561 \alpha + 130,07, \quad (6)$$

где K – коэффициент неравномерности освещения;
 α – угол наклона прожектора, град.

После раскодирования уравнение регрессии для средней освещенности приобретает вид

$$E_{ср} = -0,01 \alpha^2 + 1,245 \alpha - 26,31, \quad (7)$$

где $E_{ср}$ – средняя освещенность, лк.

Графики зависимостей коэффициента неравномерности освещения и средней освещенности площадки от угла наклона прожекторов представлены на рисунке 8.

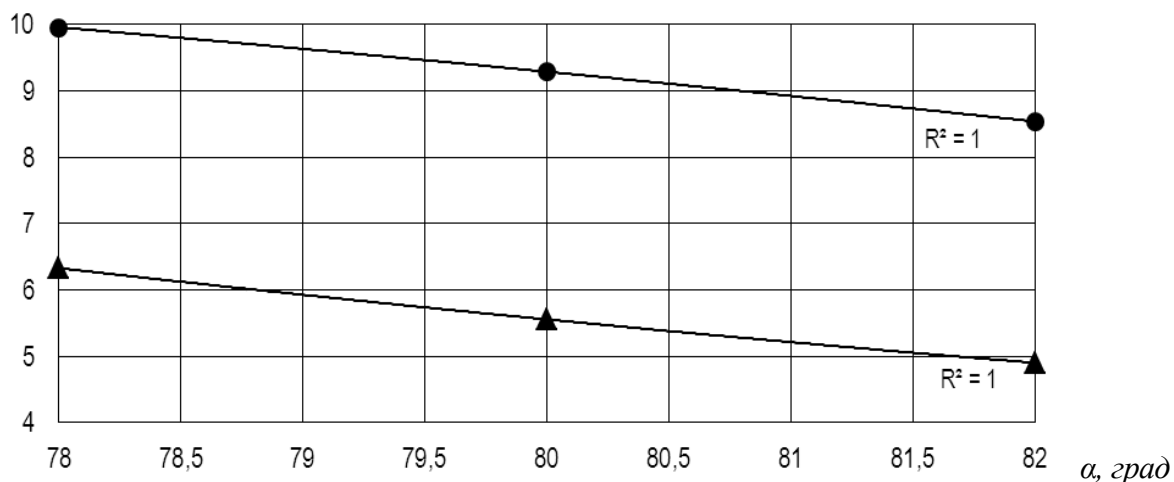


Рис. 8. Графическая зависимость коэффициента неравномерности освещения и средней освещенности площадки от угла наклона прожекторов:
 —●— — коэффициент неравномерности освещения, K ;
 —▲— — средняя освещенность, $E_{ср}$, лк

В результате анализа данных рисунка 8 установлен угол наклона прожекторов $\alpha = 82$ град.

Выводы

Рассчитаны конструктивно-технологические параметры прожекторной установки, обеспечивающие равномерное освещение двора ремонтной мастерской при минимальном энергопотреблении:

- координата расположения 1-й мачты $y_1 = 0$ м;
- координата расположения 2-й мачты $y_2 = 20$ м;
- расстояние от мачт прожекторов до освещаемой площадки $s = 19$ м;
- угол наклона прожекторов $\alpha = 82$ град;
- угол поворота 1-го прожектора $\varphi_1 = 14$ град;
- угол поворота 2-го прожектора $\varphi_2 = 13$ град;
- мощность прожекторной установки $P = 2$ кВт.

Библиографический список

1. Безопасность жизнедеятельности : учеб. пособие / Е.А. Андрианов, А.В. Полуэктов, А.А. Андрианов, Е.А. Галкин ; под общ. ред. Е.А. Андрианова. – Воронеж : ФГБОУ ВПО Воронежский ГАУ, 2013. – 356 с.
2. Вадзинский Р. Статистические вычисления в среде Excel. Библиотека пользователя / Р. Вадзинский. – Санкт-Петербург : Питер, 2008. – 608 с.

3. Вуколов Э.А. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL : учеб. пособие / Э.А. Вуколов. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : ФОРУМ, 2008. – 464 с.
4. Высшая математика. Краткий курс : учеб. пособие / В.П. Шацкий, П.В. Москалев, В.П. Богатова, И.В. Гриднева ; под ред. проф. Шацкого В.П. – Воронеж : ФГБОУ ВПО Воронежский ГАУ, 2009. – 240 с.
5. Дипломное проектирование по безопасности жизнедеятельности : учеб. пособие / А.А. Андрианов, Е.А. Андрианов, В.И. Писарев, Е.А. Галкин. – Воронеж : Истоки, 2004. – 218 с.
6. Мельников С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С.В. Мельников, В.Р. Алешкин, П.М. Рощин. – Ленинград : Колос, 1980. – 168 с.
7. Петков А.А. Ортогональное центральное композиционное планирование в технике и электрофизике высоких напряжений: учеб.-метод. пособие / А.А. Петков. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2007. – 61 с.
8. Современные проблемы науки и производства в агроинженерии : учебник ; под ред. А.И. Завражнова. – Санкт-Петербург : Лань, 2013. – 496 с.
9. Франс Дж. Математические модели в сельском хозяйстве / Дж. Франс, Дж.Х.М. Торнли ; пер. с англ. А.С. Каменского ; под ред. Ф.И. Ерешко ; предисл. Ф.И. Ерешко и А.С. Каменского. – Москва : Агропромиздат, 1987. – 400 с.
10. Халафян А.А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных : учебник / А.А. Халафян. – 3-е изд. – Москва : ООО «Бином-Пресс», 2007. – 512 с.
11. Электробезопасность : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению 110800 «Агроинженерия» / В.И. Писарев, А.А. Андрианов, Е.А. Андрианов, Н.А. Попов. – Воронеж : ФГБОУ ВПО Воронежский ГАУ, 2013. – 190 с.
12. Яковлев А.Н. Расчет освещения и проектирование осветительных установок для внутреннего освещения зданий с использованием программного комплекса DIALux : методические указания для выполнения курсовых работ по дисциплине «Проектирование осветительных установок» / А.Н. Яковлев, Т.В. Гречкина. – Томск : Изд-во ТПУ, 2007. – 14 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Евгений Александрович Андрианов – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры технологического оборудования, процессов перерабатывающих производств, механизации сельского хозяйства и безопасности жизнедеятельности ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, e-mail: evgeniy377@gmail.com.

Алексей Александрович Андрианов – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры технологического оборудования, процессов перерабатывающих производств, механизации сельского хозяйства и безопасности жизнедеятельности ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: alexey739@gmail.com.

Федор Александрович Тимошенко – магистрант кафедры технологического оборудования, процессов перерабатывающих производств, механизации сельского хозяйства и безопасности жизнедеятельности ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: tf-a11@yandex.ru.

Андрей Сергеевич Хромко – магистрант кафедры технологического оборудования, процессов перерабатывающих производств, механизации сельского хозяйства и безопасности жизнедеятельности ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», г. Воронеж, Российская Федерация, e-mail: bgd@agroeng.vsau.ru.

Дата поступления в редакцию 02.09.2018

Дата принятия к печати 18.09.2018

AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Evgeniy A. Andrianov – Doctor of Agricultural Sciences, Professor, the Dept. of Technological Equipment, Processing Plants' Processes, Agricultural Engineering, Health and Safety, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, e-mail: evgeniy377@gmail.com.

Aleksey A. Andrianov – Candidate of Agricultural Sciences, Docent, the Dept. of Technological Equipment, Processing Plants' Processes, Agricultural Engineering, Health and Safety, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, e-mail: alexey739@gmail.com.

Fyodor A. Timoshenko – Master's Degree Student, the Dept. of Technological Equipment, Processing Plants' Processes, Agricultural Engineering, Health and Safety, e-mail: tf-a11@yandex.ru.

Andrey S. Khromko – Master's Degree Student, the Dept. of Technological Equipment, Processing Plants' Processes, Agricultural Engineering, Health and Safety, e-mail: bgd@agroeng.vsau.ru.

Received September 02, 2018

Accepted September 18, 2018