

УДК 621.321

Терентьев Павел Валерьевич,
к.т.н., доцент кафедры «ПМФиВМ»,
Нижегородский государственный агротехнологический
университет им. Флорентьева Л. Я.

Сулимов Даниил Максимович, магистрант,
Нижегородский государственный агротехнологический
университет им. Флорентьева Л. Я.

Зуев Александр Серафимович, магистрант,
Нижегородский государственный агротехнологический
университет им. Флорентьева Л. Я.

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
СВЕТИЛЬНИКОВ НАРУЖНОГО ОСВЕЩЕНИЯ ДЛЯ СЕЛЬСКИХ
НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ В УСЛОВИЯХ ОТКЛОНЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ
COMPARATIVE ANALYSIS OF PERFORMANCE CHARACTERISTICS
OF OUTDOOR LIGHTING FIXTURES FOR RURAL SETTLEMENTS
UNDER CONDITIONS OF VOLTAGE FLUCTUATIONS**

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального исследования влияния отклонений питающего напряжения на электротехнические и светотехнические параметры различных типов светильников наружного освещения, применяемых в сельских сетях. В лабораторных условиях были протестированы светильники с лампами ДРЛ (125 и 400 Вт), ДНаТ (250 Вт), МГЛ (250 Вт) и современные светодиодные светильники (80 и 100 Вт). Измерения проводились с шагом напряжения 5 В в диапазоне от 205 до 255 В с фиксацией силы тока, освещенности, коэффициента пульсаций, температуры корпуса, полной, активной и реактивной мощности, а также коэффициента мощности. Установлено, что светодиодные светильники демонстрируют высочайшую стабильность светового потока и энергетических показателей при изменении напряжения, имеют минимальный нагрев и коэффициент пульсаций. Газоразрядные лампы (ДРЛ, ДНаТ, МГЛ) показали значительную зависимость своих параметров от напряжения, что приводит к нестабильности освещения, повышенным энергопотерям и сокращению срока службы в условиях типичных для сельских сетей отклонений напряжения. Проведенное технико-экономическое обоснование подтверждает высокую эффективность и целесообразность массового внедрения светодиодных систем освещения в сельской местности.

Abstract. This article presents the results of an experimental study examining the impact of supply voltage fluctuations on the electrical and lighting parameters of various types of outdoor lighting fixtures used in rural networks. Luminaires with HID lamps (125 and 400 W), DNaT (250 W), and MH (250 W), as well as modern LED luminaires (80 and 100 W), were tested under laboratory conditions. Measurements were conducted in 5 V increments over a range from 205 to 255 V, recording current, illuminance, ripple factor, housing temperature, apparent, active, and reactive power, and power factor. It was found that LED luminaires exhibit the highest stability of luminous flux and energy performance under voltage fluctuations, and have minimal heating and ripple factor. Gas-discharge lamps (HID, DNaT, and MH) have demonstrated significant voltage dependence in their performance, leading to lighting instability, increased energy loss, and a reduced service life



under typical rural power grid voltage fluctuations. A feasibility study confirms the high efficiency and feasibility of the widespread adoption of LED lighting systems in rural areas.

Ключевые слова: Наружное освещение, сельские сети, светодиодные светильники, ДРЛ, ДНаТ, МГЛ, коэффициент пульсаций, качество электроэнергии, энергоэффективность, технико-экономическое обоснование.

Keywords: Outdoor lighting, rural networks, LED lamps, mercury vapor lamps, high-pressure lamps, high-voltage lamps, metal halide lamps, pulsation coefficient, power quality, energy efficiency, feasibility study.

Системы наружного освещения являются неотъемлемым элементом инфраструктуры сельских населенных пунктов, обеспечивая безопасность, комфорт и социальную активность в темное время суток. Однако электроснабжение сельских территорий часто характеризуется значительными отклонениями напряжения от номинальных значений (ГОСТ 32144-2013), что негативно сказывается на работе традиционных источников света [1, 2]. В настоящее время парк светильников наружного освещения в сельской местности представлен разнородными технологиями: от устаревших ртутных дуговых (ДРЛ) и металлогалогенных (МГЛ) ламп до более эффективных натриевых (ДНаТ) и современных светодиодных (СД) светильников.

Выбор оптимального типа светильника должен основываться на комплексном анализе его эксплуатационных характеристик, учитывающем не только номинальные показатели, но и поведение в реальных условиях нестабильного электропитания. Целью данного исследования является сравнительный анализ эксплуатационных характеристик различных типов светильников наружного освещения при варьировании входного напряжения для выработки научно обоснованных рекомендаций по их применению в сельских электросетях.

Исследования проводились на кафедре «ПМФиВМ» НГАТУ им. Л.Я. Флорентьева. Лабораторный стенд включал в себя (рисунок 1):

Лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) для плавного регулирования напряжения.

Мультиметр UNI-T UT39В для точного контроля напряжения.

Люксметр-пульсметр ТКА-ПКМ (08) для измерения освещенности (Е, лк) и коэффициента пульсаций светового потока (Кп, %).

Цифровые клещи UT210Е для измерения силы тока (I, А).

Пирометр GM320 для контроля температуры корпуса светильника (Т, °С).

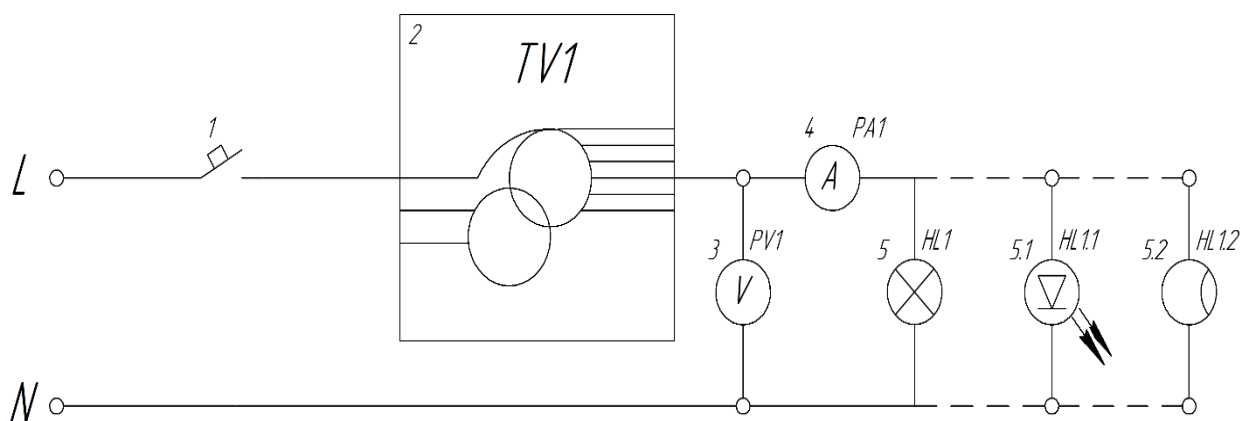


Рисунок 1. Схема лабораторного стенда

- 1 – автоматический выключатель; 2 – лабораторный автотрансформатор;
3 – мультиметр, измеряющий напряжение; 4 – цифровые клещи переменного тока;
5 – металлогалогенный светильник; 5.1 – светодиодный светильник;
5.2 – газоразрядные светильники высокого давления



Объекты исследования:

Светильник с лампой ДРЛ (125 Вт);

Светильник с лампой ДРЛ (400 Вт);

Светильник с лампой ДНаТ (250 Вт);

Светильник с металлогалогенной лампой (МГЛ) LUXE (250 Вт);

Светодиодный светильник СДУ (80 Вт);

Светодиодный светильник LC-STREET (100 Вт).

Методика испытаний заключалась в подаче на каждый светильник напряжения в диапазоне от 205 В до 255 В с шагом 5 В. На каждом этапе фиксировались значения силы тока, освещенности, коэффициента пульсаций и температуры. На основе полученных данных рассчитывались или дополнительно замерялись анализатором качества электроэнергии CIRCUTOR серий AR.5L полная (S, ВА), активная (P, Вт), реактивная (Q, Вар) мощности и коэффициент мощности ($\cos \phi$).

Результаты и обсуждение

В результате проведенных экспериментов были получены данные, сведенные в таблицы 1-3.

Таблица 1.

Результаты экспериментальных измерений и расчетов для светильников
 наружного освещения с лампами ДРЛ (125 и 400 Вт)

U, В	ДРЛ 125						ДРЛ 400					
	S, ВА	P, Вт	Q, вар	E, кЛк	Кп, %	T, оС	S, ВА	P, Вт	Q, вар	E, кЛк	Кп, %	T, оС
205	136,5	72,4	115,8	1,82	88,7	56,1	507,0	430,9	267,1	2,45	104,6	64,3
210	158,0	83,7	133,9	2,05	108,7	48,8	560,0	476,0	295,0	2,82	105,3	63,5
215	174,3	92,4	147,8	2,37	104,6	54,5	600,6	510,5	316,4	3,05	105	66,1
220	189,0	100,2	160,3	2,6	102,5	52,7	661,5	562,3	348,5	3,36	100,6	66
225	206,4	109,4	175,0	2,85	101,5	67,4	709,5	603,1	373,8	3,6	98,4	67,7
230	220,0	116,6	186,6	3,05	100,2	73,5	748,0	635,8	394,0	4,05	97	68
235	234,0	124,0	198,4	3,24	100,2	65,8	819,0	696,1	431,4	4,1	96	69,2
240	255,3	135,3	216,5	3,48	99,1	68,1	855,6	727,3	450,7	4,45	93	73,4
245	270,2	143,2	229,2	3,73	97,2	74,5	923,5	785,0	486,5	4,74	92,7	73,7
250	290,4	153,9	246,3	3,94	97,5	68,7	998,4	848,6	525,9	4,94	92,5	75,9
255	313,6	166,2	265,9	4,2	99,9	78,8	1087,8	924,6	573,0	5,53	90,6	77,6

Таблица 2.

Результаты экспериментальных измерений и расчетов для светильников
 наружного освещения с лампами ДНаТ и МГЛ (250 Вт)

U, В	ДНаТ 250						МГЛ 250					
	S, ВА	P, Вт	Q, вар	E, кЛк	Кп, %	T, оС	S, ВА	P, Вт	Q, вар	E, кЛк	Кп, %	T, оС
205	294,5	176,7	235,6	6,75	71,2	103	321,8	193,1	257,4	8,85	91	66,9
210	316,0	189,6	252,8	7,13	70,2	103,6	342,0	205,2	273,6	8,75	91,6	68,8
215	332,1	199,3	265,7	7,64	69,1	110,6	362,9	217,7	290,3	8,91	90,5	73,4



220	359,1	215,5	287,3	8,53	67,1	104,9	380,1	228,1	304,1	9,35	91	80,8
225	376,3	225,8	301,0	9,21	66,2	115,6	408,5	245,1	326,8	10	91	80,8
230	402,6	241,6	322,1	10,2	64,5	109,7	424,6	254,8	339,7	10,6	91,4	84,2
235	418,5	251,1	334,8	10,5	64,1	108,6	441,0	264,6	352,8	11,3	91,6	87,1
240	443,9	266,3	355,1	11,5	63,1	124,4	462,3	277,4	369,8	12,4	91,1	91,5
245	467,7	280,6	374,1	12,5	64,3	120,3	472,4	283,4	377,9	13,1	91	91,3
250	484,8	290,9	387,8	14,7	61,8	112,9	489,6	293,8	391,7	14	91,4	93,7
255	512,1	307,2	409,6	15,4	61,2	123,7	504,7	302,8	403,8	14,9	91,7	98,1

Таблица 3.

Результаты экспериментальных измерений и расчетов
 для светодиодных светильников наружного освещения (80 и 100 Вт)

U, В	СД 80						СД 100					
	S, ВА	P, Вт	Q, вар	E, кЛк	Кп, %	T, оС	S, ВА	P, Вт	Q, вар	E, кЛк	Кп, %	T, оС
205	79,2	77,6	15,8	6,41	6,6	23,6	91,8	90,0	18,3	5,84	7,2	30
210	79,6	78,0	15,8	6,41	6,7	24,1	91,4	89,6	18,2	5,84	7,2	30,8
215	79,7	78,2	15,9	6,41	6,7	24,6	91,4	89,6	18,2	5,83	7,3	31,4
220	80,0	78,4	15,9	6,41	6,6	24,9	91,8	89,9	18,3	5,82	7,2	31,4
225	79,8	78,2	15,9	6,41	6,6	25,2	91,6	89,8	18,2	5,82	7,3	31,8
230	79,6	78,0	15,8	6,4	6,7	25,7	91,9	90,1	18,3	5,81	7,2	32,3
235	79,9	78,3	15,9	6,39	6,7	25,9	91,4	89,5	18,2	5,8	7,3	32,4
240	80,5	78,9	16,0	6,39	6,7	26,3	91,5	89,7	18,2	5,8	7,3	32,8
245	80,4	78,8	15,9	6,4	6,7	26,5	91,7	89,8	18,2	5,8	7,4	33,1
250	81,4	79,7	16,2	6,39	6,7	27,3	91,7	89,8	18,2	5,79	7,4	33,8
255	81,6	79,9	16,2	6,4	6,7	27,5	91,6	89,8	18,2	5,76	7,4	33,7

Ниже приведем анализ зависимости светотехнических характеристик, энергетических показателей и теплового режима.

Освещенность (Е): Газоразрядные лампы продемонстрировали сильную зависимость светового потока от напряжения. Например, у ДНаТ (250 Вт) при снижении напряжения с 230 В до 205 В освещенность падала с 10,2 кЛк до 6,75 кЛк (на 34%). Аналогичная картина наблюдалась у ДРЛ и МГЛ. Это приводит к резкому ухудшению качества освещения при просадках напряжения, типичных для сельских сетей. В отличие от них, светодиодные светильники (СДУ 80 Вт и LC 100 Вт) показали исключительную стабильность освещенности во всем диапазоне напряжений (изменение не более 1-2%), что гарантирует постоянный уровень освещенности независимо от отклонений в сети.

Коэффициент пульсаций (Кп): Данный параметр критически важен для комфорта зрения и безопасности. Светодиодные светильники имели крайне низкий Кп (6,6-7,4%), что соответствует строгим санитарным нормам. В то же время, газоразрядные лампы, особенно светильники с лампами ДРЛ, показали недопустимо высокие значения пульсаций (от 90,6% до 108,7%), что создает стробоскопический эффект и повышает утомляемость. ДНаТ и МГЛ имели меньшие, но все еще значительные пульсации (61-71% и ~91% соответственно).



Потребляемая мощность (P , S): Активная мощность газоразрядных светильников линейно возрастала с увеличением напряжения (рисунок 2). Например, мощность ДРЛ (400 Вт) при 255 В составила 924.6 Вт, что более чем в 2 раза превышает номинальную. Это указывает на значительный перерасход электроэнергии при повышенном напряжении. Светодиодные светильники сохраняли практически постоянную потребляемую мощность на всем диапазоне напряжений, демонстрируя высокий КПД и стабильность встроенных драйверов.

Коэффициент мощности ($\cos \varphi$): Светодиодные светильники имели высокий $\cos \varphi$ (0.98), что свидетельствует о минимальной реактивной мощности и снижении потерь в сети. Газоразрядные лампы, особенно ДРЛ (125 Вт) с $\cos \varphi=0.53$, являются источником значительной реактивной мощности, что требует установки компенсирующих устройств и увеличивает нагрузку на сеть.

Температура корпуса (T): Наибольший нагрев наблюдался у лампы ДНаТ (до 124°C), что связано с высокой рабочей температурой горелки. Светодиодные светильники имели минимальную температуру (до 34°C), что свидетельствует о высокой энергоэффективности, снижении тепловой нагрузки на конструкцию и повышенной пожарной безопасности.

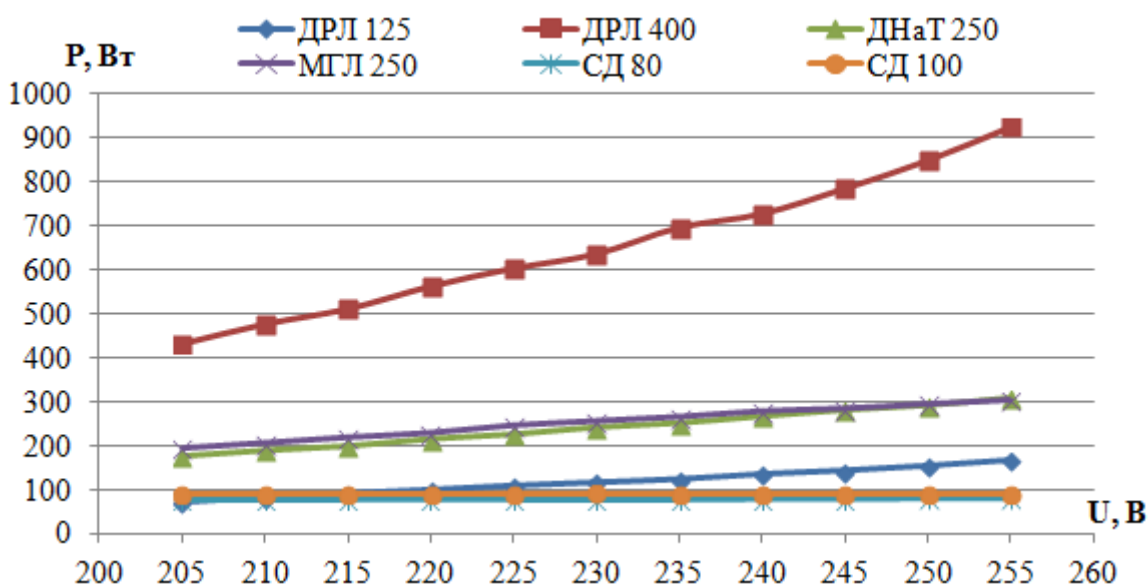


Рисунок 2. Зависимость изменения потребляемой мощности исследуемыми светильниками наружного освещения от отклонения питающего напряжения

Технико-экономическое обоснование

На основе полученных данных и с учетом работ [3–5] проведено упрощенное технико-экономическое сравнение замены парка светильников с ДНаТ (250 Вт) на светодиодные LC-STREET (100 Вт), обеспечивающие сопоставимый уровень освещенности.

Исходные данные:

Тариф на электроэнергию: 6,41 руб./кВт*ч.

Время работы в год: 3500 часов.

Количество светильников: 100 шт.

Стоимость светильника ДНаТ: 4500 руб.

Стоимость лампы ДНаТ 250 Вт: 450 руб.

Стоимость светодиодного светильника: 8000 руб.

Срок службы ДНаТ: 15000 часов.



Срок службы СД: 50000 часов.

Расчет для системы с ДНаТ (250 Вт):

Годовое потребление энергии: $100 \text{ шт.} \times 0,25 \text{ кВт} \times 3500 \text{ ч} = 87\,500 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$.

Годовые затраты на электроэнергию: $87\,500 \times 6,41 = 560\,875 \text{ руб/год}$.

Затраты на замену ламп за период службы СД (50 000 часов): $(50\,000 \text{ ч} / 15\,000 \text{ ч}) \approx 3,33$ замены. Требуется 3 полные замены парка ламп.

Капитальные затраты на замену ламп (без учета работ): $3 \text{ замены} \times 100 \text{ шт.} \times 450 \text{ руб./шт.} = 135\,000 \text{ руб.}$

Расчет для системы со СД (100 Вт):

Годовое потребление энергии: $100 \text{ шт.} \times 0,1 \text{ кВт} \times 3500 \text{ ч} = 35\,000 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$.

Годовые затраты на электроэнергию: $35\,000 \times 6,41 = 224\,350 \text{ руб/год}$.

Затраты на замену за 50 000 часов: 0 руб (срок службы светильников не исчерпан).

Сравнение затрат за жизненный цикл светодиодных светильников (50 000 часов $\approx 14,3$ года):

Капитальные затраты:

Система с ДНаТ (первоначальная закупка): $100 \text{ шт.} \times 4500 \text{ руб.} = 450\,000 \text{ руб.}$

Система со СД (первоначальная закупка): $100 \text{ шт.} \times 8000 \text{ руб.} = 800\,000 \text{ руб.}$

Превышение капитальных затрат у СД: $800\,000 - 450\,000 = 350\,000 \text{ руб.}$

Эксплуатационные затраты за 14,3 года:

Затраты на электроэнергию (ДНаТ): $560\,875 \text{ руб/год} \times 14,3 \text{ лет} = 8\,020\,512 \text{ руб.}$

Затраты на электроэнергию (СД): $224\,350 \text{ руб/год} \times 14,3 \text{ лет} = 3\,208\,205 \text{ руб.}$

Экономия на электроэнергии со СД: $8\,020\,512 - 3\,208\,205 = 4\,812\,307 \text{ руб.}$

Затраты на замену ламп (для ДНаТ):

Как рассчитано выше, за 50 000 часов требуется затратить 135 000 руб на покупку новых ламп ДНаТ.

Суммарный экономический эффект за жизненный цикл:

Экономия на электроэнергии: 4 812 307 руб.

Экономия на замене ламп (для ДНаТ): 135 000 руб.

Итого экономия: $4\,812\,307 + 135\,000 = 4\,947\,307 \text{ руб.}$

Вычитаем превышение капитальных затрат: $4\,947\,307 - 350\,000 = 4\,597\,307 \text{ руб.}$

Вывод по технико-экономическому обоснованию:

Несмотря на то, что первоначальные инвестиции в светодиодное освещение на 350 000 рублей выше, совокупный экономический эффект в течение жизненного цикла светильников составляет около 4,6 млн. рублей. Основными источниками экономии являются:

Снижение потребления электроэнергии на 60%, что в денежном выражении дает экономию более 4,8 млн руб.

Отсутствие затрат на замену источников света, что экономит еще 135 тыс. руб., которые пришлось бы потратить на покупку новых ламп ДНаТ.

Модернизация освещения со сроком окупаемости, рассчитанным только на экономии электроэнергии ($350\,000 \text{ руб.} / (560\,875 - 224\,350) \text{ руб/год} \approx 1,04 \text{ года}$), является высокоэффективным и стратегически важным мероприятием для сельских муниципалитетов.

Выводы

Проведенное комплексное исследование позволило сформулировать следующие выводы:

По устойчивости к отклонениям напряжения: Светодиодные светильники демонстрируют абсолютное превосходство. Их светотехнические (освещенность, пульсации) и электротехнические (мощность, $\cos \phi$) параметры остаются стабильными в широком



диапазоне питающего напряжения (205-255 В), что делает их идеальным решением для нестабильных сельских сетей.

По энергоэффективности: Светодиодные светильники потребляют в 2-3 раза меньше активной мощности для создания сопоставимого с газоразрядными лампами уровня освещенности. Высокий коэффициент мощности ($\cos \varphi \approx 0.98$) позволяет дополнительно снизить потери на передачу реактивной мощности.

По качеству света: Светодиодные светильники имеют коэффициент пульсаций менее 8%, что соответствует современным требованиям по зрительному комфорту и безопасности. Газоразрядные лампы, особенно ДРЛ, генерируют неприемлемо высокие пульсации (свыше 90%), негативно влияющие на здоровье человека.

По тепловому режиму и безопасности: Рабочая температура светодиодных светильников в 2-4 раза ниже, чем у ДНаТ и ДРЛ, что снижает риски возгорания и продлевает срок службы самого светильника.

По экономической целесообразности: Техничко-экономическое обоснование подтверждает, что массовая замена устаревших газоразрядных светильников на светодиодные в сельской местности является высокоэффективной инвестицией, окупаемой за счет резкого сокращения затрат на электроэнергию и обслуживание.

Рекомендация: Для модернизации систем наружного освещения сельских населенных пунктов целесообразно проводить плановую замену светильников с лампами ДРЛ, ДНаТ и МГЛ на современные светодиодные светильники, оснащенные качественными драйверами, обеспечивающими стабильность работы при отклонениях напряжения.

Список литературы:

1. Филатов Д.А., Терентьев П.В. Качество электроэнергии и электромагнитная совместимость в электроэнергетике сельского хозяйства: учеб. пос.: Нижегородская ГСХА, 2017. – 116 с.
2. ГОСТ 32144 – 2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартиформ, 2014. – 16 с.
3. Терентьев П.В., Щербаков В.С., Исследование современных источников наружного освещения //Флагман науки: научный журнал. Декабрь 2024.-СПб., Изд.ГНИИ "Нацразвитие"-2024. №12 (23).
4. Терентьев П.В. Техничко-экономическое обоснование внедрения источников наружного освещения в сельской местности в условиях светового календаря / П.В. Терентьев, С.В. Шильников, Е.В. Евстифеева, А.А. Каманин // Агротехника и энергообеспечение./ Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина. – 2022. № 4 (37). С. 40-46.
5. Терентьев П.В. Сравнительный экспериментальный анализ искусственных источников света для освещения сельских территорий / П.В. Терентьев, Д.А. Филатов, М.А. Плаксин // Интеллектуальная электротехника./ Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. – 2019. № 2. С. 28-41.

