

ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИММЕРСИОННОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ В СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТИЛЬНИКАХ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Вадим Алексеевич Чернышов
Максим Валерьевич Новиков

Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина

Рассмотрены специфика работы светодиодной техники, ее конструктивные особенности и характеристики, а также реалии современного производства. Обоснована одна из основных проблем термоменеджмента светодиодной отрасли, заключающаяся в снижении рабочего ресурса светодиодных источников света вследствие их перегрева, связанного с несовершенством конструкции теплоотвода и конструкции их корпуса. Проведен патентный поиск, который показал, что наиболее революционной технологией охлаждения электронных устройств, используемой передовыми интернет-компаниями для охлаждения своих серверов, является иммерсионное охлаждение. Рассмотрена идея реализации двухфазного иммерсионного охлаждения светодиода, согласно которой в роли теплоносителя выступает сухая вода – фторкетон, находящийся в рассеивателе. Фторкетон закипает при нагреве светодиода свыше 49°C и обеспечивает отведение от него лишней тепловой энергии. После превращения в пар фторкетон конденсируется на верхней металлической части корпуса светильника и стекает обратно в рассеиватель. Установлена высокая эффективность предлагаемого теплоотвода при проведении экспериментальных исследований изготовленного прототипа светодиодного светильника с иммерсионным охлаждением. Обоснована возможность трехкратного увеличения срока службы светодиодов с иммерсионным охлаждением, а также возможность формирования оптимального потока в течение всего срока их службы. Отмечена необходимость проведения дальнейших комплексных исследований, связанных с применением иммерсионного охлаждения в светотехнике. Предложенный авторами способ иммерсионного охлаждения позволит эффективно решать проблему перегрева светодиодов и может быть весьма полезен разработчикам светодиодного освещения при проектировании агропромышленных светодиодных светильников нового поколения с повышенным ресурсом и улучшенной светоотдачей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: иммерсионное охлаждение, фторкетон, светодиодный светильник, перегрев, теплоотвод, термоменеджмент.

THE RATIONALE FOR THE USE OF IMMERSION COOLING IN LED LAMPS OF AGRICULTURAL DESIGNATION

Vadim A. Chernyshov
Maxim V. Novikov

Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin

The authors consider the matters of the operation specifics, design features and characteristics of LED equipment as well as the modern production realities. The authors have grounded one of the main problems of thermal management in the LED industry, which consists in a reduced working life of LED light sources due to their overheating associated with an imperfect design of their heat sink and hull. A performed patent search showed that the most revolutionary technology for cooling of electronic devices used by the leading Internet companies to cool their servers is immersion cooling. The authors consider the idea of implementing a two-phase immersion cooling of an LED, according to which the coolant is dry water (fluoroketone located in the diffuser). Fluoroketone boils when the LED is heated above 49°C and provides a bypass for excess thermal energy. After conversion into vapor, the fluoroketone is condensed on the upper metal part of the lamp hull and flows back into the diffuser. A high efficiency of the proposed heat sink was established during the experimental studies of the prototype of the LED lamp with immersion cooling. The authors have proved the possibility of a three-fold increase in the service life of LEDs with immersion cooling, as well as the possibility of forming an optimal flow during their entire service life. The need for further complex studies related to the use of immersion cooling in lighting equipment has been noted. The method of immersion cooling proposed by the authors will effectively solve the problem of overheating of LEDs and can be very useful for the developers of LED lighting when designing the agroindustrial LED lamps of a new generation with an increased service life and improved luminous efficiency.

KEY WORDS: immersion cooling, fluoroketone, LED lamp, overheating, heat removal, thermal management.

Высокие эксплуатационные и светотехнические характеристики светодиодов сделали их производство самой динамично развивающейся отраслью светотехники. На основе светодиодов сегодня создаются самые разнообразные источники света: прожекторы, лампы, линейные светильники, светодиодные линейки, светосигнальные приборы и многие другие [7].

Срок службы светодиода определяется не только качеством его изготовления, но и параметрами других узлов и конструкцией осветительного прибора. Применение современных материалов и электронных компонентов, а также правильно спроектированные драйвер и система охлаждения позволяют довести срок службы светодиода до максимального значения, заявленного производителем [1].

Обеспечение оптимальной температуры светодиода (а в конечном счете температуры р-п перехода) в заданных пределах путем отвода тепла в светотехнической отрасли называется термоменеджментом, к сфере ведения которого относятся вопросы совершенствования не только конструкции теплоотвода, но и конструкции всего корпуса осветительного прибора [6].

Благодаря герметичному корпусу агропромышленные светодиодные светильники можно эксплуатировать в запыленных помещениях с повышенным уровнем влажности. Однако выполняя возложенную на него защитную функцию, герметичный корпус, во многих случаях, ограничивает свободную конвекцию внутреннего воздуха, что не обеспечивает светодиодам оптимального теплоотвода. При этом при больших температурах окружающей среды ($+50^{\circ}\text{C}$ и более), характерных для энергоемкого агропромышленного производства, температура радиатора (не светодиода, где она будет выше) будет приближаться к критической отметке (более $+90^{\circ}\text{C}$), что весьма существенно скажется на сроке службы светодиодов. Сокращение срока службы светодиодов сильно возрастает при увеличении их мощности, а особенно при фиксированных размерах корпуса. На сегодняшний день известны факты, когда недобросовестные производители устанавливают светодиоды в уже существующие, морально устаревшие корпуса, изначально разработанные под установку люминесцентных ламп. При этом в рекламных проспектах они указывают, как правило, только срок службы светодиодов, тогда как в корпусах их светильников из-за перегрева светодиоды работают значительно меньше заявленного для них срока службы.

Таким образом, одной из основных проблем светодиодной отрасли является снижение рабочего ресурса агропромышленных светодиодных источников света вследствие перегрева светодиодов, связанного с несовершенством конструкции теплоотвода и конструкции их корпуса. И хотя производители светодиодного освещения широко используют в своем арсенале алюминиевые радиаторы различных профилей для охлаждения светодиодных кластеров (модулей) различных размеров и конфигурации, все они неспособны в полной мере гарантировать защиту светодиодного источника света от перегрева и преждевременного истощения своего ресурса.

На основании вышеизложенного обозначенная проблема термоменеджмента является весьма актуальной для современной светодиодной отрасли и требует проведения дополнительных научных исследований, направленных на разработку и практическую реализацию более эффективных технологий отвода тепла для светодиодов.

Проведенный патентный поиск показал, что наиболее революционной технологией охлаждения электронных устройств, используемой передовыми интернет-компаниями для охлаждения своих серверов, является иммерсионное охлаждение [3, 4]. Как известно, жидкости являются отличной охлаждающей средой, по сравнению с воздухом они обладают более высокой теплопроводностью, так как по структуре они гораздо плотнее, а плотные носители обеспечивают более эффективный перенос тепловой энергии [2].

Очевидно, что очень скоро бурный рост научно-технического прогресса сделает эту технологию общедоступной, в том числе и для использования в светотехнике.

Авторы данной публикации предлагают использовать известную технологию иммерсионного охлаждения для обеспечения эффективного теплоотвода в конструкциях агропромышленных светодиодных светильников.

Предполагается, что данное мероприятие предотвратит перегрев светодиодных модулей и, как следствие, их преждевременный выход из строя.

В иммерсионном охлаждении теплоносителем является так называемая сухая вода, или фторкетон. Химическая формула этой сухой воды не H_2O , а более сложная и не содержит водорода – $CF_3CF_2C(O)CF(CF_3)_2$ – перфтор (этил-изопропилкетон), шестиуглеродное вещество, разряд – фторированный кетон [5].

Фторкетон – это синтетическое органическое вещество, в молекуле которого все атомы водорода заменены на прочно связанные с углеродным скелетом атомы фтора. Такие изменения делают вещество инертным с точки зрения взаимодействия с другими молекулами. Данное вещество представляет собой бесцветную прозрачную жидкость со слабовыраженным запахом, которая тяжелее воды в 1,6 раза, и, что самое главное, оно не проводит электричество. Диэлектрическая проницаемость фторкетона равна 2,3 (за единицу в качестве эталона принят осушенный азот). Также важным свойством фторкетона является его крайне низкая растворимость в воде, которая не позволяет данному веществу пройти через клеточные мембраны в организм, делая его пары абсолютно безопасными для человека. Кроме того, фторкетон быстро и легко разрушается в верхних слоях атмосферы под воздействием ультрафиолета [8].

Основная идея авторского предложения заключается в том (рис. 1), что в герметичном светодиодном светильнике в процессе нагрева светодиодов до $49^{\circ}C$ происходит закипание фторкетона, обеспечивающее отведение лишней тепловой энергии от светодиодов, после превращения в пар фторкетон конденсируется на верхней части корпуса светильника и стекает обратно в рассеиватель. Таким образом, осуществляется технология двухфазного иммерсионного охлаждения светодиодов.

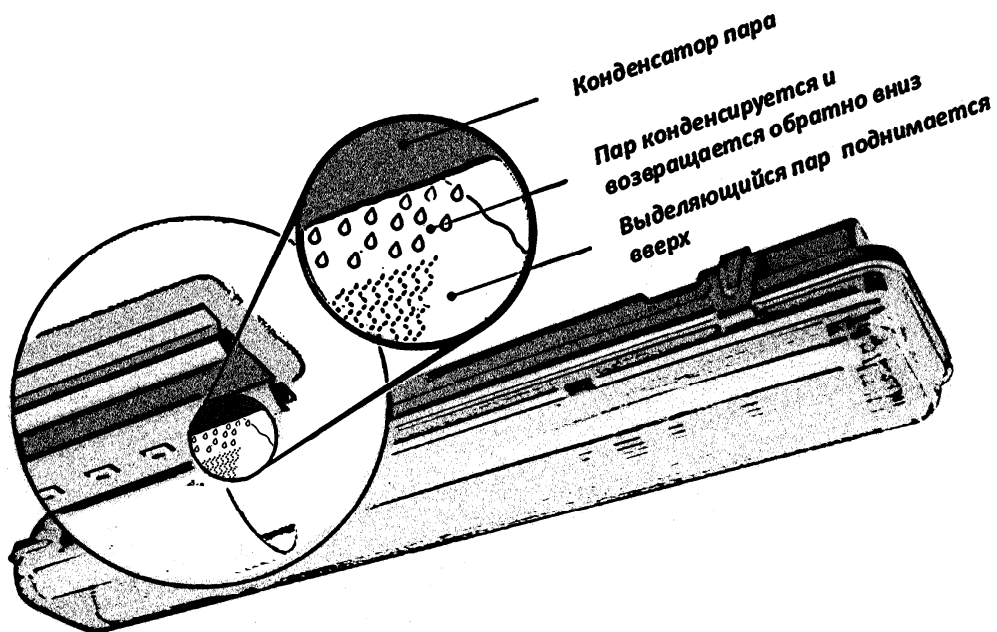


Рис. 1. Принцип работы иммерсионного охлаждения светодиода

При проведении экспериментальных исследований в качестве прототипа для будущего светодиодного светильника с иммерсионным охлаждением был выбран агропромышленный люминесцентный светильник импортного производства, предназначенный для жестких условий эксплуатации со степенью защиты IP67, корпус которого изготовлен из оцинкованной стали (рис. 2).

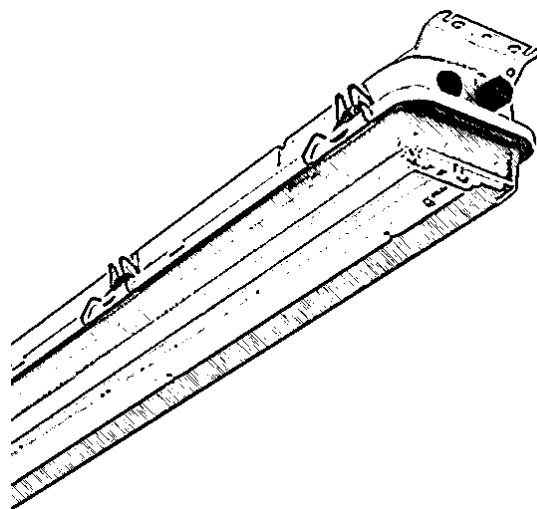


Рис. 2. Прототип светодиодного светильника с иммерсионным охлаждением, выполненный на базе люминесцентного влагозащищенного светильника

Металлический корпус в отличие от пластика обладает более высокой теплопроводностью, что крайне важно для реализации технологии двухфазного иммерсионного охлаждения для светодиодных источников света. Поэтому металлические корпуса влагозащищенных и взрывозащищенных светильников (рис. 3), предназначенных для работы с лампами высокого давления, также можно переоборудовать под установку сверхъярких светодиодов с иммерсионным охлаждением.

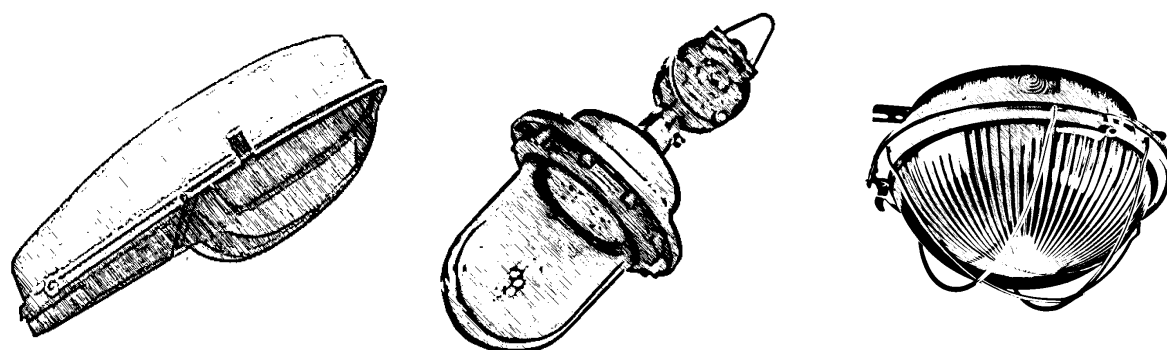


Рис. 3. Светильники, подходящие под установку светодиодных источников света с иммерсионным охлаждением

Процесс изготовления прототипа светодиодного светильника с иммерсионным охлаждением заключается в демонтаже люминесцентных ламп и пускорегулирующей аппаратуры, размещении на дне рассеивателя светодиодных линеек с драйвером и заполнении рассеивателя фторкетеном до полного погружения светодиодных линеек.

Для оценки эффективности теплоотвода при иммерсионном охлаждении в рамках проведения экспериментальных исследований контролировались температура светодиодных линеек и температура воздуха под потолком, в месте подвеса светодиодного светильника.

Для имитации тепловых выбросов от технологического оборудования нагрев воздуха в помещении осуществлялся электрической тепловой пушкой.

При проведении экспериментальных исследований предварительно было установлено следующее.

1. Работа светодиодного светильника с иммерсионным охлаждением характеризуется более равномерной светоотдачей от рассеивателя, что обусловлено оптическим эффектом от подсвечивания фторкетона.

2. В процессе работы светодиодного светильника, при повышении температуры воздуха в помещении до $+60^{\circ}\text{C}$, температура светодиодного модуля не подымалась выше отметки $+49^{\circ}\text{C}$.

3. При закипании фторкетона не было зафиксировано заметных шумового эффекта и пульсаций светового потока через рассеиватель светильника.

На рисунке 4, а представлена зависимость срока службы светодиода от температуры его подложки (в нашем случае алюминиевой пластины) [9, 10].

При иммерсионном охлаждении максимальная температура подложки определяется температурой кипения фторкетона и составляет $+49^{\circ}\text{C}$, поэтому можно однозначно утверждать, что срок службы светодиодов с иммерсионным охлаждением будет составлять не менее 90 тыс. часов. При этом среднестатистический срок службы светодиодов составляет 10-30 тыс. часов. Таким образом, использование технологии двухфазного иммерсионного охлаждения светодиодов позволяет трехкратно увеличить срок их службы.

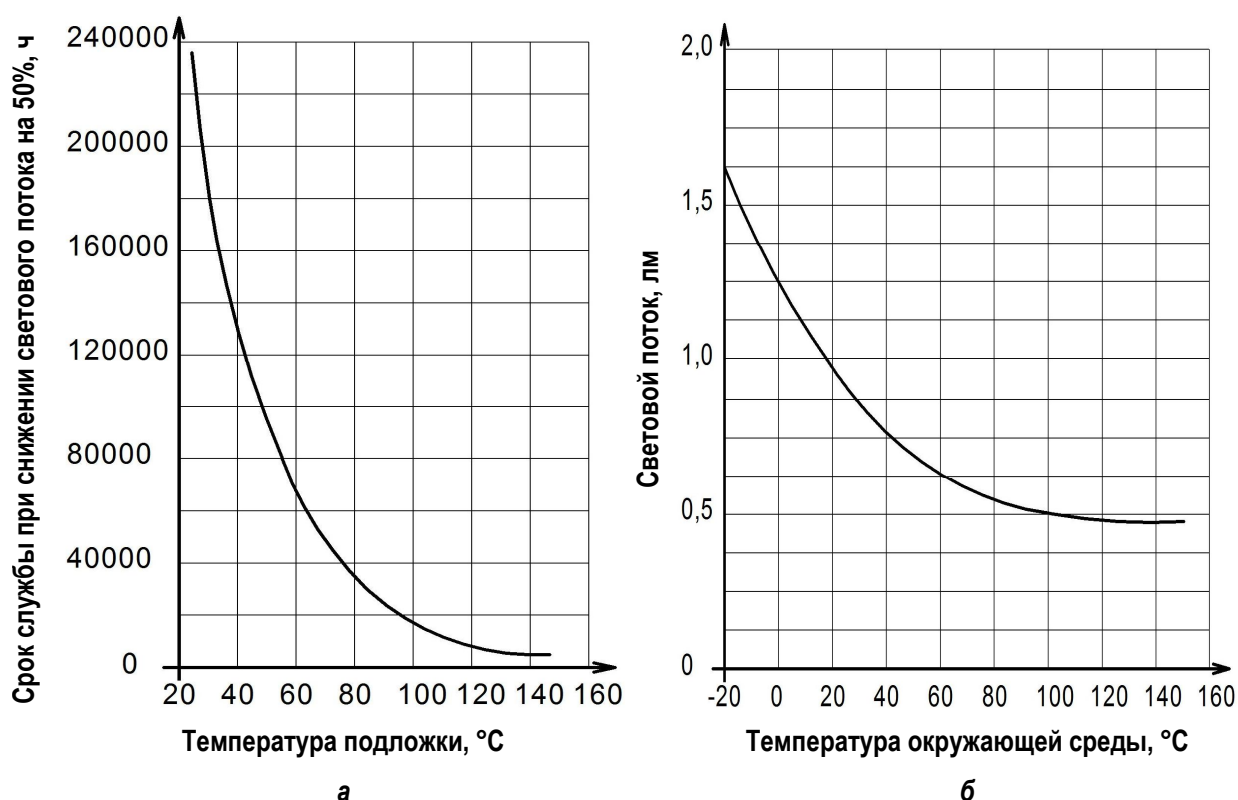


Рис. 4. Зависимость срока службы светодиода от температуры подложки (а) и светового потока от температуры окружающей среды (б)

При воздушном охлаждении светодиодов температура окружающей среды определяет также и параметры светового потока (рис. 4, б) [9, 10]. Так, например, при температуре окружающей среды $20-25^{\circ}\text{C}$ световой поток светодиода оптимальный, так как температура его кристалла не превышает 80°C , а температура подложки не превышает $50-60^{\circ}\text{C}$. При росте температуры окружающей среды с 25 до 75°C , температура подложки повышается с 60 до 90°C , а температура самого кристалла достигает критического значения, обеспечивая уменьшение его светового потока почти в два раза. Использование технологии двухфазного иммерсионного охлаждения не позволяет температуре подложки вырасти более чем на 49°C , что независимо от температуры окружающей среды обеспечивает постоянство оптимального светового потока в течение всего срока службы светодиода.

Несмотря на исчерпывающее теоретическое обоснование предлагаемой авторами идеи, подкрепленное положительными результатами предварительных экспериментальных исследований, стоит признать, что пока еще рано утверждать о комплексной целесообразности применения иммерсионного охлаждения в агропромышленных светодиодных светильниках. В перспективе потребуются детальная проработка целого ряда вопросов социального, технического и экономического плана, связанных с эксплуатацией светодиодных светильников с иммерсионным охлаждением в условиях современного энергонасыщенного агропромышленного производства.

Однако уже сейчас можно смело утверждать, что авторами предложен оригинальный с инженерно-технической точки зрения способ иммерсионного охлаждения, который позволит эффективно решать проблему перегрева светодиодов и может быть весьма полезен разработчикам светодиодного освещения при проектировании агропромышленных светодиодных светильников нового поколения с повышенным ресурсом и улучшенной светоотдачей.

Библиографический список

1. Васильев А.В. Светодиоды-долгожители: правда или мистификация? / А.В. Васильев // Новости электроники + Светотехника. – 2010. – № 0 (1). – С. 10-12.
2. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре : учебник для вузов по специальности «Конструирование и производство радиоэлектронной аппаратуры» / Г.Н. Дульнев. – Москва : Высшая школа, 1984. – 247 с.
3. Иммерсионное охлаждение серверов набирает популярность: [сайт] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://telecomblgger.ru/16082> (дата обращения: 15.06.2017).
4. Основы научных исследований : учеб. пособие / И.Н. Кравченко, А.В. Коломейченко, В.Н. Логачев и др. – Санкт-Петербург : Лань, 2015. – 304 с.
5. Сухая вода Novoc® 1230 для защиты серверных и не только: [сайт] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://habrahabr.ru/company/3mrusia/blog/200840/> (дата обращения: 15.06.2017).
6. Шаракшанэ А. Практический тепловой менеджмент / А. Шаракшанэ // Полупроводниковая светотехника. – 2012. – № 5. – С. 66–74.
7. Юнович А.Э. Светодиоды как основа освещения будущего / А.Э. Юнович // Светотехника. – 2003. – № 3. – С. 2–7.
8. Material safety data sheet 3M™ Novoc™ 1230 Fire Protection Fluid [FK-5-1-12] 08/28/13 – Паспорт безопасности (MSDS 16-3425-2) 3M™ Novoc™ 1230 Fire Protection Fluid [FK-5-1-12]. Документ: 16-3425-2. Номер версии: 3.01. Дата выпуска: 07/07/2017. Дата переиздания: 31/03/2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.novoc-1230.ru/documents/01-safety-data-sheet-novoc-1230.pdf> (дата обращения: 15.06.2017).
9. Narendran N. Estimating junction temperature of high-flux white LEDs / N. Narendran, Y. Gu, R. Hosseinzadeh // Proceedings of SPIE. – 2004. – P. 158–160.
10. Tringh Q.V. Accurate measurement of the p-n-Junction Temperature of HP-LEDs / Q.V. Tringh, S. Bruckner, Q.K. Tran // Methods and results – Proceedings of the International Symposium for Automotive Lighting (ISAL). – Darmstadt, 28-29 Sept., 2011. – P. 809–827.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Вадим Алексеевич Чернышов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение» ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина», Российская Федерация, г. Орел, E-mail: blackseam78@mail.ru.

Максим Валерьевич Новиков – магистрант по направлению подготовки 35.04.06 «Агроинженерия», профиль «Электрооборудование и электротехнологии» ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина», Российская Федерация, г. Орел, E-mail: maxim-2017.novikov@yandex.ru.

Дата поступления в редакцию 23.06.2017

Дата принятия к печати 28.08.2017

AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Vadim A. Chernyshov – Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrical Supply, Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin, Russian Federation, Orel, E-mail: blackseam78@mail.ru.

Maxim V. Novikov – Master's Degree Student in Agroengineering Training Program 35.04.06, Electrical Equipment and Electrotechnics Educational Program Specification, Orel State Agrarian University named after N.V. Parakhin, Russian Federation, Orel, E-mail: maxim-2017.novikov@yandex.ru.

Date of receipt 23.06.2017

Date of admittance 28.08.2017