

УДК 537.527.9

EDN RMRRVH

**ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
УСТАНОВКАХ НА ОСНОВЕ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА**

**Н.Ю. Лысов**

ORCID: 0000-0003-4929-9894 e-mail: streamer.corona@gmail.com  
Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
*Москва, Россия*

**А.В. Клубков**

ORCID: 0009-0005-3929-9796 e-mail: klubkovalv@mpei.ru  
Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
*Москва, Россия*

**А.А. Нестеренко**

ORCID: 0009-0003-1522-3530 e-mail: nesterenkoala@mpei.ru  
Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
*Москва, Россия*

**Н.А. Акинин**

ORCID: 0009-0008-1449-1185 e-mail: akininna@mpei.ru  
Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
*Москва, Россия*

Приведены результаты экспериментального исследования применимости композитных диэлектрических барьеров на основе алюминиевой керамики и наполненных корундом эпоксидных компаундов в электротехнологических установках на основе барьерного разряда. Рассмотрены и количественно оценены уровни адгезии разработанного композитного барьера к электродам из нержавеющей стали с различным уровнем механической обработки (с различной шероховатостью поверхности). Представлены результаты экспериментальных исследований потерь активной мощности в барьерных генераторах озона с различными типами барьера. Измерения потерь мощности проводились методом непосредственного интегрирования произведения мгновенных значений тока и напряжения на обкладках генератора озона. Показано, что применение предложенного композитного диэлектрического барьеракратно снижает уровень таких потерь. Проведена оценка эффективности синтеза озона в специально созданном экспериментальном озонаторе с возможностью оперативного изменения электродной системы и типа диэлектрического барьера. Полученные кинетические кривые показывают эффективность применения композитного барьера в области высоких плотностей мощности за счет более эффективного отвода тепла из разрядной области, где происходит синтез озона. Показаны плюсы

и минусы создания плоских генераторов озона с композитным диэлектрическим барьером.

**Ключевые слова:** барьерный разряд, композитная изоляция, озон, потери в изоляции.

**Для цитирования:** Лысов Н.Ю., Клубков А.В., Нестеренко А.А., Акинин Н.А. Применение композиционных материалов в высоковольтных электротехнологических установках на основе барьерного разряда // Интеллектуальная Электротехника. 2024. № 4. С. 100-113. EDN RMRRVH

## **APPLICATION OF COMPOSITE MATERIALS IN HIGH-VOLTAGE ELECTROTECHNOLOGICAL INSTALLATIONS BASED ON DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE**

**N.Yu. Lysov**

ORCID: **0000-0003-4929-9894** e-mail: **streamer.corona@gmail.com**  
National Research University «MPEI»  
*Moscow, Russia*

**A.V. Klubkov**

ORCID: **0009-0005-3929-9796** e-mail: **KlubkovAIV@mpei.ru**  
National Research University «MPEI»  
*Moscow, Russia*

**A.A. Nesterenko**

ORCID: **0009-0003-1522-3530** e-mail: **nesterenkoala@mpei.ru**  
National Research University «MPEI»  
*Moscow, Russia*

**N.A. Akinin**

ORCID: **0009-0008-1449-1185** e-mail: **akininna@mpei.ru**  
National Research University «MPEI»  
*Moscow, Russia*

**Abstract.** The paper presents the results of experimental study of applicability of composite dielectric barriers based on aluminum ceramics and corundum-filled epoxy compounds in barrier discharge-based electro-technological installations. The adhesion levels between the developed composite barrier and stainless-steel electrodes with different levels of mechanical processing (with different surface roughness) have been considered and quantitatively evaluated. The results of experimental studies of active power losses in ozone barrier generators with different types of barriers are presented. Power loss

measurements were carried out by the method of direct integration of the production of instantaneous values of current and voltage on the ozone generator shells. It is shown that the use of the proposed composite dielectric barrier significantly decreases the level of such losses. The efficiency of ozone synthesis in a specially designed experimental ozonator with the possibility of operative change of the electrode system and dielectric barrier type has been evaluated. The obtained kinetic curves show the efficiency of composite barrier application in the region of high-power densities due to more efficient heat removal from the discharge region where ozone synthesis takes place. The pros and cons of creating planar ozone generators with a composite dielectric barrier are shown.

**Keywords:** barrier discharge, composite insulation, insulation losses, ozone.

**For citation:** N.Yu. Lysov, A.V. Klubkov, A.A. Nesterenko and N.A. Akinin, "Application of composite materials in high-voltage electrotechnological installations based on dielectric barrier discharge", *Smart Electrical Engineering*, no. 4, pp. 100-113, 2024. EDN RMRRVH

### I. Введение

Области применения барьерного разряда, где в промежутке между металлическими электродами присутствует слой диэлектрика, на сегодняшний день весьма разнообразны. Данный вид разряда применяется как для модификации поверхностей и газификации угля, так и для создания эксимерных ламп и плазменных экранных панелей [1]. Безусловно, наиболее широкое применение барьерный разряд нашел в синтезе озона из кислородсодержащих газов. Здесь можно говорить о промышленных масштабах использования данного вида газового разряда, функционируют целые заводы с установленной мощностью генераторов озона, превышающей 20 МВт [2]. Неотъемлемой частью большинства современных озонаторов является диэлектрический барьер.

Оптимизации параметров и выбору материала барьера посвящено множество работ [3-7], на основе которых можно выделить ряд требований, выдвигаемых к барьеру при использовании его в конструкции озонатора:

- возможность длительного пребывания в среде озона без повреждения, деформации или потери диэлектрических свойств материала;
- долговременная стойкость к развивающемуся по поверхности разряду;
- высокое поверхностное сопротивление материала;
- высокая диэлектрическая проницаемость;
- низкое значение тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ ;
- высокая теплопроводность;
- высокая электрическая прочность;
- хорошая адгезия к электроду.

Авторам неизвестно о существовании диэлектрического материала,

удовлетворяющего всем вышеперечисленным требованиям, при этом разработчиками и производителями современного озонаторного оборудования уделяется особое внимание вопросу использования многослойных диэлектрических барьеров, где каждый из слоев несет на себе определенные функции. Известны способы [8, 9] наносить на металлические электроды два слоя стекломали: 1) обеспечивающий хорошую долговременную адгезию диэлектрика к металлу, в том числе, за счет схожих коэффициентов температурного линейного расширения; 2) обеспечивающий высокую стойкость барьера к разряду и эффективный синтез озона. Большинство подобных работ посвящено созданию генераторов озона с цилиндрической формой электродов (т.н. конструкция Велсбаха [10]), где диэлектрик чаще всего наносится на электроды посредством эмалирования. Конструкция же плоских генераторов озона зачастую подразумевает расположение пластинчатых диэлектриков на дисковых или прямоугольных электродах, что неизбежно сопровождается неплотностью прилегания барьера к электроду и, как следствие, образованию газовых полостей различного размера между ними. В данных полостях могут развиваться разрядные явления, снижающие эффективность работы электротехнологической установки из-за отсутствия протока через них рабочего газа. Также присутствие газовых полостей ухудшает отвод тепла из области разряда, что приводит к интенсификации процессов разложения озона.

Определенное количество исследовательских работ посвящено нанесению специальных покрытий на поверхность диэлектрика, находящуюся в разрядной зоне. В результате такой модификации существенно повышается эффективность образования озона. Так, например, в [11] при нанесении на поверхность стеклянных электродов слоя тетрабората натрия («буры») концентрация озона возросла на 30-50 %. Однако большинство подобных модификаций весьма недолговечны, либо реализуемы на небольших лабораторных озонаторах, где эффективность синтеза озона невелика.

Основной задачей данной работы является модификация плоского барьера электротехнологических установок таким образом, чтобы при сохранении эффективности их работы на высоком уровне снизить потери активной мощности и улучшить механические характеристики и надежность конструкций.

Выбор материалов композиционного барьера обуславливался доступностью материалов, их технологичностью и соответствием озвученным выше требованиям. Было принято решение изготовить диэлектрический барьер из тонкой керамической ( $Al_2O_3$ ) пластины толщиной 0,35 мм и специального наполненного компаунда на основе эпоксидной смолы марки ЭД-20. В качестве наполнителя использовалось стекло с высокой диэлектриче-

ской проницаемостью и электрокорунд в различных пропорциях. Слой керамики находился в непосредственном контакте с разрядной зоной, компаунд же выступал в качестве дополнительного композитного слоя и обеспечивал надежное прилегание керамического диска к электроду и отсутствие воздушных включений между керамикой и металлом.

Процесс создания композитного барьера состоял из большого числа последовательных технологических процессов, включавших вакуумирование отдельных компонентов, смешение, наполнение, заливку, выдерживание при различных температурах и давлениях, конденсацию и т.д. Технологии создания материала будет посвящена отдельная работа. Состав и технология заливки были подобраны таким образом, чтобы обеспечить возможность создания промежуточного слоя толщиной менее 0,5 мм, при этом удалось добиться следующих параметров материала при рабочих частотах установки: относительная диэлектрическая проницаемость 5,5, тангенс угла диэлектрических потерь  $0,9 \cdot 10^{-2}$ , теплопроводность 0,52 Вт/м·К. Измерения параметров проводились согласно [12-14]. Суммарная толщина многослойного диэлектрического барьера в результате составляла 0,67 мм. Данная толщина была выбрана с целью сравнения технологической установки с композитным барьером с установкой, работающей с дисковым керамическим барьером такой же толщины.

Для устранения неплотного прилегания барьера к плоским электродам поверхности как электрода, так и барьера стремятся сделать максимально гладкими и плоскими. Высокая шероховатость поверхности барьера, находящейся в разрядной области, еще и негативно сказывается на эффективности синтеза озона [4, 5]. Производители керамики на сегодняшний день выпускают листы любой формы с достаточной точностью по толщине и уровню плоскостности с низкой шероховатостью ( $R_a$  порядка 1 мкм) [15].

Добиться подобной шероховатости на рабочих поверхностях металлических электродов можно только прибегнув к процессам дополнительной шлифовки или полировки. Однако и эти процессы не гарантируют наличия газовых полостей в пространстве между барьером и электродом. Полировка электродов из нержавеющей стали усложняет и удорожает конструкцию генератора озона.

В работе с целью определения уровня адгезии композитного диэлектрика к поверхности электродов и допустимого уровня шероховатости металла было исследовано три вида электродов с различной чистотой обработки поверхностей. Образцы композитного компаунда наносились на пластины, поверхность которых или сохранялась в состоянии, полученном после фрезерной обработки, или же дополнительно обрабатывалась для увеличения или снижения уровня шероховатости: подвергалась дробеструйной

обработке или полировалась, соответственно. Испытания проводились в соответствии с [16]. Данные экспериментальных исследований сведены в табл. 1.

*Таблица 1.*

**Результаты испытаний адгезивной способности композитного компаунда к поверхности металла**

*Table 1.*

**Test results of the adhesive ability of the composite compound to the metal surface**

Вид обработки	Шероховатость $R_a$ , мкм	Адгезия, МПа
Полировка	0,5	2,8
Токарная/фрезерная	6,3	9,6
Дробеструйная	12,5	15,2

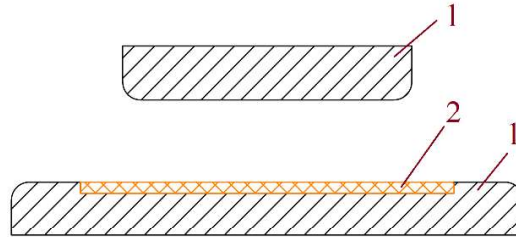
Видно, что применение электродов без дополнительной обработки дает уровень адгезии, позволяющий говорить о надежном прилегании барьера к электроду.

## **II. Описание экспериментальной установки**

В качестве объекта экспериментов был создан специальный плоский генератор озона, позволявший оперативно изменять конфигурацию электродной системы. Электроды изготавливались из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. В большем из электродов диаметром 230 мм в специальном пазе размещался диэлектрический барьер диаметром 100 мм толщиной 0,63 мм из алюминиевой керамики  $Al_2O_3$  (рис. 1). Меньший из электродов диаметром 80 мм располагался на расстоянии 0,4 мм над поверхностью барьера. В подобной конфигурации площадь барьера, занимаемая разрядом, составляла 50 см<sup>2</sup>. Было изготовлено несколько пар электродов с разной степенью шероховатости поверхности и разной глубиной барьерного паза.

Проток кислорода от медицинского концентратора ОХУ 6000 осуществлялся через технологическое отверстие в центре верхнего электрода к его периферии. На электроды подавалось синусоидальное напряжение частотой 25 кГц от специализированного источника питания, позволявшего плавно регулировать напряжение от 0,2 до 10 кВ (амплитуда).

Электродная сборка располагалась в специальном герметичном фторопластовом корпусе, допускающем повышение давления газа внутри до 2 ата. Контроль концентрации кислорода осуществлялся посредством измерителя ПКГ-4 с соответствующим датчиком, его влажность – прибором ИВА-8. Концентрация озона в озono-кислородной смеси на выходе из генератора озона регистрировалась прибором Медозон 254/5. Электрические параметры регистрировались цифровым запоминающим осциллографом *Tektronix* 3012.



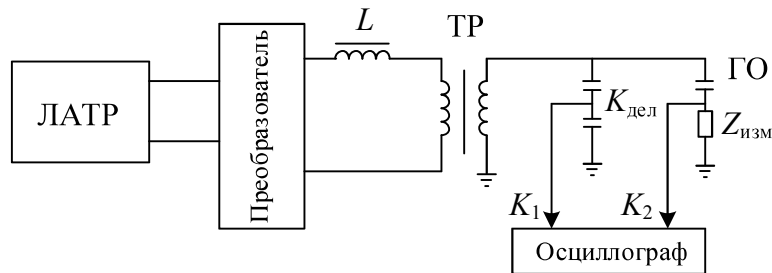
**Рис. 1. Электродная система:**

*1 – металлические электроды; 2 – диэлектрический барьер*

**Fig. 1. Electrode system:**

*1 – metal electrodes; 2 – dielectric barrier*

Принципиальная электрическая схема установки представлена на рис. 2. На выходе лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) установлен преобразователь, к которому, в свою очередь, через дроссель  $L$  подключен высоковольтный трансформатор (ТР). К высокой стороне трансформатора присоединен генератор озона (ГО), который на схеме представлен емкостью. С емкостного делителя напряжения с коэффициентом деления  $K_{\text{дел}}$  на вход  $K_1$  осциллографа поступает сигнал, эквивалентный сигналу напряжения на генераторе озона. На вход  $K_2$  сигнал поступает с измерительного элемента, который представлен на схеме сопротивлением  $Z_{\text{изм}}$ . В ходе эксперимента использовались специально выполненные миниатюрные малоиндуктивные емкостной и резистивный элементы.



**Рис. 2. Схема измерений**

**Fig. 2. Measurement scheme**

Измерение мощности разрядных явлений проводилось методом непосредственного интегрирования мгновенных значения тока и напряжения [17]. Применялся активный измерительный шунт с измерительным сопротивлением  $R_{\text{изм}} = 3,277 \text{ Ом}$ .

С помощью встроенного в осциллограф пакета MATH на его дисплей

выводились не только кривые изменения тока и напряжения (1 и 2 канал, соответственно), но и результат интегрирования их произведения. Пример полученных осциллограмм приведен на рис. 3. При этом фиксировались значения изменения выделенной энергии за промежуток времени ( $\Delta W$  и  $\Delta t$ ), представленные на рис. 3 в правом верхнем углу. Для каждого режима работы снимались значения концентрации озона.

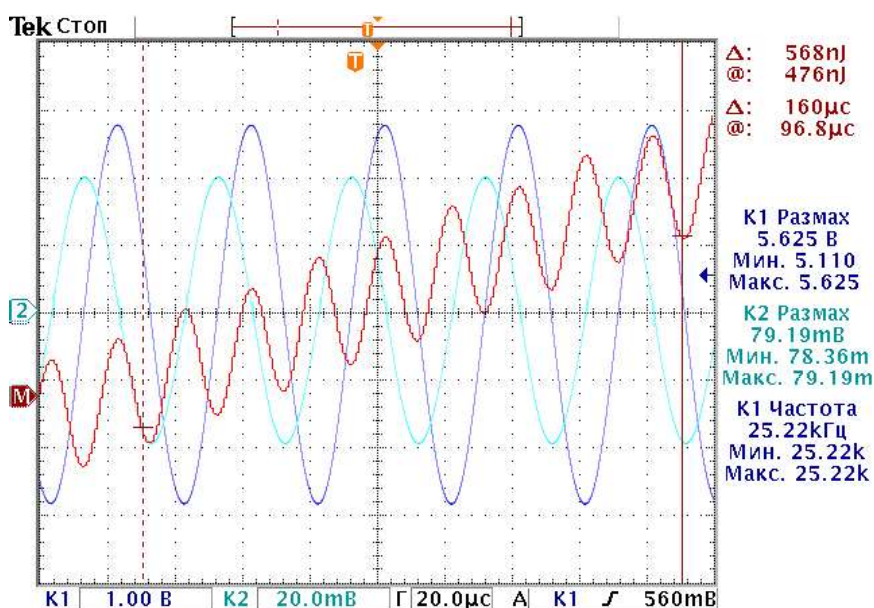


Рис. 3. Осциллограмма тока и напряжения на электродах генератора озона

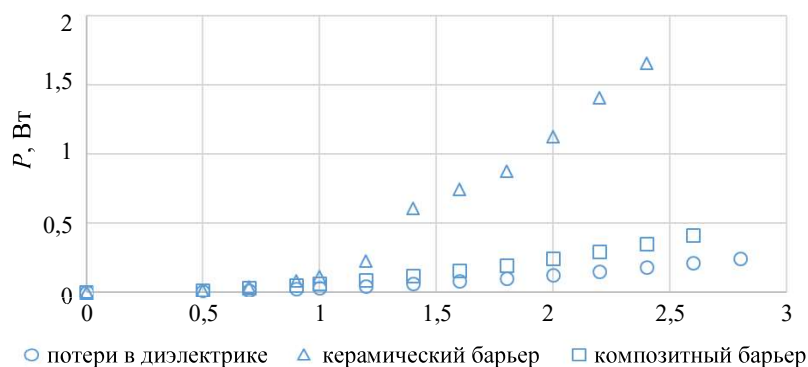
Fig. 3. Oscillogram of current and voltage at the ozone generator electrodes

### III. Проведение эксперимента

Для оценки уровня дополнительных потерь полезной мощности, связанной с неплотностью прилегания, был проведен следующий эксперимент. На первом этапе оценивались активные потери в листе из алюминиевой керамики толщиной 0,67 мм с использованием «водных электродов»: лист помещался между двух емкостей, заполненных водой до определенного уровня, чтобы можно было однозначно оценить площадь контакта воды с диэлектриком и визуально контролировать отсутствие газовых полостей. На втором этапе диск помещался в штатную электродную систему (рис. 1), за тем исключением, что оба электрода касались диэлектрического барьера.



Электроды обладали полированной поверхностью, горение разряда на периферии электродов исключалось нанесением слоя кремнийорганического вазелина. На рис. 4 приведены зависимости измеренных активных потерь на каждом из этапов эксперимента.



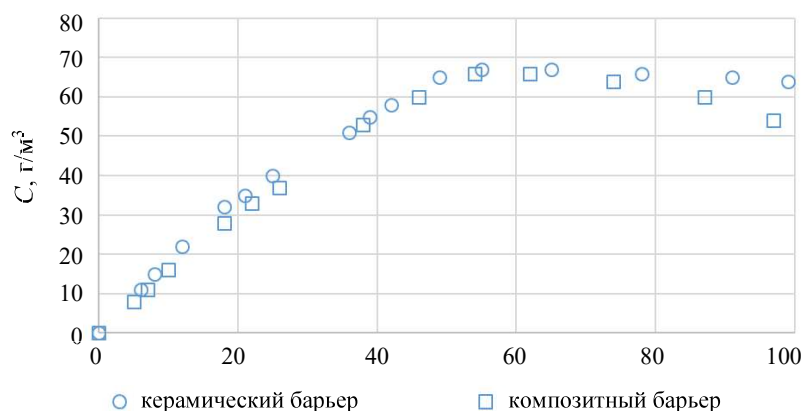
**Рис. 4. Активные потери в генераторе озона при отсутствии полезного разряда**

**Fig. 4. Active losses in ozone generator at absence of useful discharge**

Из зависимостей видно, что при приложении напряжения непосредственно к диэлектрику (маркер  $\circ$ ) уровень потерь находится на достаточно низком уровне и имеет четко выраженную квадратичную зависимость. В случае же использования металлических электродов (маркер  $\Delta$ ) при достижении определенного уровня напряжения зависимость приобретает более крутой вид и при напряжениях, характерных рабочим напряжениям генератора озона, потери кратно превосходят потери в чистом диэлектрике. Можно предположить, что данное превышение происходит как раз из-за наличия разрядных явлений в пространстве между диэлектрическим барьером и металлическим электродом, размер которых достаточен для развития разрядов, несмотря на полировку электродов. Правомерность сравнения уровня потерь основана на отсутствии в генераторах озона диэлектрических потерь, отличимых от потерь основной частоты [18].

На третьем этапе эксперимента в качестве барьера использовался композитный диэлектрический барьер. Результаты измерения потерь также представлены на рис. 4 (маркер  $\square$ ). Видно, что потери значительно снижаются по сравнению с конструкцией с чисто керамическим электродом, но несколько превышают «идеальный» случай чистых потерь в барьере. Причины превышения могут крыться в неполном отсутствии воздушных включений в композите и в увеличении тангенса угла диэлектрических потерь в композитном диэлектрике.

На последнем этапе работы сравнивались кинетические кривые синтеза озона (зависимости концентрации вырабатываемого озона от вложенной в разряд мощности) в конструкции с чисто керамическим и с композитным барьером. Расход кислорода в обоих случаях составлял 1 л/мин, результаты сравнения приведены на рис. 5. Полученные зависимости практически идентичны на стадии роста концентрации озона и начинают расходиться при больших значениях вложенной мощности. Совпадение зависимостей при мощностях до 60 Вт можно объяснить незначительным вкладом потерь в диэлектрике и газовых полостях на фоне принципиально больших значений полезной мощности разряда, а дальнейшее расхождение, по-видимому, связано с более эффективным отводом тепла из разрядной области через композитный барьер, поскольку именно тепловое разложение озона является причиной спада кинетических кривых [18-20].



**Рис. 5. Кинетические кривые синтеза озона при различных типах диэлектрического барьера**

**Fig. 5. Kinetic curves of ozone synthesis at different types of dielectric barrier**

Несмотря на незначительное, пусть и положительное, влияние применения композитного диэлектрического барьера на эффективность синтеза озона, существует ряд преимуществ применения такого метода: отсутствие необходимости дополнительной обработки металлических электродов и жесткая фиксация положения диэлектрического барьера в пространстве за счет высокой адгезии к электроду. Из минусов же стоит отметить достаточно трудоемкий и технически сложный процесс создания композитного диэлектрического компаунда и его нанесения на металлический электрод.

#### IV. Выводы

Предложен способ снижения нежелательных потерь мощности в электротехнологических установках на барьерном разряде за счет создания композиционных диэлектрических барьеров.

Показано, что предложенная конструкция композиционного диэлектрического барьера устраняет возможность смещения различных узлов конструкции относительно друг друга за счет высокой адгезии промежуточного диэлектрического слоя как к металлу, так и к керамике.

Оценено влияние точности обработки металлических электродов на степень адгезии к ним промежуточного диэлектрического слоя. Показано, что при применении такого барьера пропадает необходимость полировки электродов, что снижает конечную стоимость изделий.

Показано, что применение предложенного композитного диэлектрического барьера не снижает эффективности синтеза озона, а в области больших мощностей даже дает положительный эффект.

*Исследование проведено в Национальном исследовательском университете «МЭИ» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FSWF-2024-0004)*

© Лысов Н.Ю., 2024

© Клубков А.В., 2024

© Нестеренко А.А., 2024

© Акинин Н.А., 2024

*Поступила в редакцию 03.10.2024*

*Принята к публикации 16.10.2024*

*Received 03.10.2024*

*Accepted 16.10.2024*

#### Библиографический список

- [1] Kogelschatz U., Eliasson B., Egli W. From ozone generators to flat television screens: history and future potential of dielectric-barrier discharges // Pure and Applied Chemistry. 1999. № 71 (10). P. 1819-1828. DOI: 10.1351/pac199971101819
- [2] Loeb B.L., Thompson C.M., Drago J., Takahara H., Baig S. Worldwide ozone capacity for treatment of drinking water and wastewater: a review // Ozone: Science and Engineering. 2012. № 34 (1). P. 64-77. DOI: 10.1080/01919512.2012.640251
- [3] Сторчай Е.И., Смородин А.И., Лантушенко Л.С., Лантушенко Ю.Н., Голубева И.В. Генераторы озона с электродами нового поколения и способ их изготовления // 33-й Всерос. науч.-практ. семинар «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии», Июнь 25-26, 2014, Москва, Россия. М.: ООО «МАКС Пресс», 2014. С. 10-21.

- [4] Murata T., Tatsukawa M., Okita Y., Yasuoka K. Polarity effect of silent discharge // *Ozone: Science and Engineering*. 1995. № 17 (5). P. 575-585. DOI: 10.1080/01919512.1995.10555768
- [5] Okita Y., Amano A., Nouda K., Murata T., Terai K. Effects of the cooling method on ozone generation // *Proceedings of 13th Ozone World Congress, 1997, Kyoto, Japan*. P. 847-852.
- [6] Самойлович В.Г., Панин В.В., Крылова Л.Н. Современные тенденции в конструировании промышленных озонаторов // *Первая Всерос. конф. «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии»*, Июнь 7-9, 2005, Москва, Россия. М.: 2005. С. 138.
- [7] Кравченко Г.А., Макаров А.М., Пичугин Ю.П. Оценка ресурса системы высоковольтных электродов генератора озона с многослойным диэлектрическим барьером // *Вестник Чувашского университета*. 2013. № 3. С. 193-196.
- [8] Петцольд А., Пёшманн Г. Эмаль и эмалирование. М.: Металлургия, 1990. – 576 с.
- [9] Варгин В.В. Эмалирование металлических изделий. Л.: Машиностроение, 1972. – 495 с.
- [10] Кожин В.Ф., Кожин И.В. Озонирование воды. М.: Стройиздат, 1974. – 160 с.
- [11] Ливке В.А., Плысюк А.А., Бондарь П.Г. Способ получения озона. Патент SU 477940 А1, заявл. 25.09.1972; опубл. 25.07.1975.
- [12] ГОСТ 6433.4-71. Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости при частоте 50 Гц. Введ. 1972-07-01. М.: Издательство стандартов, 1972. – 19 с.
- [13] ГОСТ 23372-77. Материалы диэлектрические. Методы определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне частот от 100 до  $5 \cdot 10^6$  Гц. Введ. 1978-01-01. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1978. – 19 с.
- [14] ГОСТ 23630.2-79. Пластмассы. Метод определения теплопроводности. Введ. 1981-07-01. 1981. – 8 с.
- [15] Кузин В.В., Фёдоров С.Ю. Взаимосвязь режимов алмазного шлифования с состоянием поверхности  $Al_2O_3$ -керамики // *Новые огнеупоры*. 2016. № 7. С. 65-70. DOI: 10.17073/1683-4518-2016-7-65-70
- [16] ГОСТ 14759-69. Клеи. Метод определения прочности при сдвиге. Введ. 1970-01-01. М.: ИПК Издательство стандартов, 1970. – 13 с.
- [17] Пашин М.М., Лысов Н.Ю. Измерение энергозатрат в озонаторах с объемным барьерным разрядом // *Электричество*. 2011. № 12. С. 21-26.
- [18] Филиппов Ю.В., Вобликова В.А., Пантелеев В.И. Электросинтез озона. М.: Издательство Московского университета, 1987. – 237 с.
- [19] Лунин В.В., Самойлович В.Г., Ткаченко С.Н., Ткаченко И.С. Теория и практика получения и применения озона. М.: Издательство Московского университета, 2016. – 416 с.
- [20] Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. М.: Изд-во МГУ, 1989. – 176 с.

## References

- [1] U. Kogelschatz, B. Eliasson and W. Egli, "From ozone generators to flat television screens: history and future potential of dielectric-barrier discharges", *Pure and Applied Chemistry*, vol. 71, no. 10, pp. 1819-1828, Oct. 1999. DOI: 10.1351/pac199971101819
- [2] B.L. Loeb, C.M. Thompson, J. Drago, H. Takahara and S. Baig, "Worldwide ozone capacity for treatment of drinking water and wastewater: a review", *Ozone: Science and Engineering*, vol. 34, no. 1, pp. 64-77, Jan. 2012. DOI: 10.1080/01919512.2012.640251
- [3] E.I. Storchay, A.I. Smorodin, L.S. Lantushenko, Yu.N. Lantushenko and I.V. Golubeva, "Generatory ozona s elektrodami novogo pokoleniya i sposob ih izgotovleniya [Ozone generator with new generation electrodes and method of their manufacture]", in proc. *33rd All-Russian scientific and practical seminar Ozon i drugie ekologicheski chistye okisliteli. Nauka i tekhnologii [Ozone and other environmentally friendly oxidizers. Science and technology]*, June 25-26, 2014, Moscow, Russia, pp. 10-21 (in Russian).
- [4] T. Murata, M. Tatsukawa, Y. Okita and K. Yasuoka, "Polarity effect of silent discharge", *Ozone: Science and Engineering*, vol. 17, no. 5, pp. 575-585, 1995. DOI: 10.1080/01919512.1995.10555768
- [5] Y. Okita, A. Amano, K. Nouda, T. Murata and K. Terai, "Effects of cooling method on ozone generation", in proc. *13th Ozone World Congress*, 1997, Kyoto, Japan, pp. 847-852.
- [6] V.G. Samoylovich, V.V. Panin and L.N. Krylova, "Sovremennye tendencii v konstruirovanii promyshlennykh ozonatorov [Modern trends in the design of industrial ozonizers]", in proc. *First All-Russian conf. "Ozon i drugie ekologicheski chistye okisliteli. Nauka i tekhnologii posvyashchennaya [Ozone and other environmentally friendly oxidizers. Science and technology]"*, June 7-9, 2005, Moscow, Russia, p. 138 (in Russian).
- [7] G.A. Kravchenko, A.M. Makarov and Yu.P. Pichugin, "Resource assessment of ozone generator high voltage electrodes with multilayer dielectric barrier", *Vestnik Chuvashskogo Universiteta*, no. 3, pp. 193-196, 2013.
- [8] A. Pettsol'd and G. Poshmann, *Emal' i emalirovaniye [Enamel and enameling]*. Moscow: Metallurgy, 1990 (in Russian).
- [9] V.V. Vargin, *Emalirovanie metallicheskih izdelij [Enameling of metal products]*. Leningrad: Mashinostroenie, 1972 (in Russian).
- [10] V.F. Kozhinov and I.V. Kozhinov, *Ozonirovaniye vody [Ozonation of water]*. Moscow: Stroyizdat, 1974 (in Russian).
- [11] V.A. Livke, A.A. Plysyuk and P.G. Bondar'. *Sposob polucheniya ozona [Method for producing ozone]*. Patent SU 477940 A1, July 25, 1975 (in Russian).
- [12] Solid electrical insulating materials. Methods for evaluation of dielectric power factor and permittivity at power (50 Hz) frequency, GOST 6433.4-71, July 1972.
- [13] Dielectric materials. Methods of determination of permittivity and powerfactor with in a frequency range of 100 to 5  $10^6$  Hz, GOST 23372-77, January 1978.
- [14] Plastics. Method for the determination of thermal conductivity, GOST 23630.2-79, July 1981.

- [15] V.V. Kuzin and S.Yu. Fedorov, "Correlation between the diamond grinding condition and surface state of  $Al_2O_3$ -base ceramics", *Novye Ogneupory (New Refractories)*, no. 7, pp. 65-70, 2016. DOI: 10.17073/1683-4518-2016-7-65-70
- [16] Adhesives. Method of determination of shear strength, GOST 14759-69, Jan. 1970.
- [17] M.M. Pashin and N.Yu. Lysov, "Izmereniye energozatrat v ozonatorakh s ob'yemnym bar'yernym razryadom [Measurement of energy consumption in ozonizers with volume barrier discharge]", *Electricity*, no. 12, pp. 21-26, 2011 (in Russian).
- [18] Yu.V. Filippov, V.A. Voblikova and V.I. Pantelev, *Elektrosintez ozona [Electrosynthesis of ozone]*. Moscow: Moscow University Publishing House, 1987 (in Russian).
- [19] V.V. Lunin, V.G. Samoylovich, S.N. Tkachenko and I.S. Tkachenko, *Teoriya i praktika polucheniya i primeneniya ozona [Theory and practice of obtaining and using ozone]*. Moscow: Moscow University Publishing House, 2016 (in Russian).
- [20] V.G. Samoylovich, V.I. Gibalov and K.V. Kozlov, *Fizicheskaya khimiya bar'yernogo razryada [Physical chemistry of barrier discharge]*. Moscow: Moscow State University Publishing House, 1989 (in Russian).

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Лысов Николай Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Российская Федерация. **Nikolay Yu. Lysov**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the National Research University MPEI, Moscow, Russian Federation.

**Клубков Александр Владимирович**, аспирант Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Российская Федерация. **Aleksandr V. Klubkov**, postgraduate student of the National Research University MPEI, Moscow, Russian Federation.

**Нестеренко Александр Алексеевич**, инженер-исследователь Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Российская Федерация. **Alexander A. Nesterenko**, research engineer of the National Research University MPEI, Moscow, Russian Federation.

**Акинин Никита Алексеевич**, лаборант-исследователь Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Российская Федерация. **Nikita A. Akinin**, laboratory research assistant of the National Research University MPEI, Moscow, Russian Federation.