

DOI 10.15589/jnn20160311

УДК 537.523

Б73

STUDY OF VOLUME DISCHARGE IN ELECTROFILTRATION GAS SYSTEMS

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕМНОГО РАЗРЯДА В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРАЦИИ ГАЗОВ

Leonid Z. Boguslavskiy

dpes@iipr.com.ua

ORCID: 0000-0001-6738-1889

Larisa Ye. Ovchinnikova

lora947@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0421-9731

Serhiy V. Chushchak

chushchak89@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8495-3137

Serhiy S. Kozyrev

skozyrev@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1725-1415

Л. З. Богуславский,канд. техн. наук, доц.^{1,2}**Л. Е. Овчинникова,**канд. техн. наук, доц.^{1,2}**С. В. Чушчак,**инженер¹**С. С. Козырев,**канд. техн. наук, доц.²¹*Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine, Mykolaiv*²*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*¹*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев*²*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев*

Abstract. It addresses the use of volume discharge electrofiltration for industrial gases. The experimental study of the process volume discharge, studied the effect of the structure of the electrode systems and gas flow rate on the ignition conditions and support a stable volume discharge. For volume discharge, which occupies the entire volume of the electrode, the electrode system is necessary to use such as «brush» with a symmetrical arrangement with respect to the collecting electrodes. The ignition voltage and the intense glow of the discharge of 55–60 kV at a pulse repetition rate of between 1 and 3 kHz. Gas flow rate to 20 m / c does not affect the appearance and maintenance of a stable ignition discharge. Pulse repetition frequency should be equal $f_{lim} = v / l_0$. This will eliminate the effect of hydrodynamic instabilities in the discharge.

Keywords: volume discharge; electrode system; electrofiltration industrial gases; gas flow rate; ignition modes of volume discharge.

Аннотация. Рассмотрены вопросы использования объемного разряда для электрофильтрации промышленных газов. Проведены экспериментальные исследования процесса зажигания объемного разряда, исследовано влияние конструкции электродных систем и скорости газового потока на условия зажигания и поддержку стабильного объемного разряда.

Ключевые слова: объемный разряд; электродная система; электрофильтрация промышленных газов; скорость газового потока; режимы зажигания объемного разряда.

Анотація. Розглянуто питання використання об'ємного розряду для електрофільтрації промислових газів. Проведено експериментальні дослідження процесу запалювання об'ємного розряду, досліджено вплив конструкції електродних систем і швидкості газового потоку на умови запалювання та підтримку стабільного об'ємного розряду.

Ключові слова: об'ємний розряд; електродна система; електрофільтрація промислових газів; швидкість газового потоку; режими запалювання об'ємного розряду.

REFERENCES

- [1] Boguslavskiy L. Z., Miroshnichenko L. N., Kazaryan Yu. G., Yaroshinskiy N. S Vliyanie rezhimov raboty vysokovoltного istochnika pitaniya na formirovanie strimernogo koronnogo razryada i effektivnost sistem

- gazoochistki [Effect of high voltage power supply modes on the formation of a streamer corona discharge and efficiency of gas purification systems]. *Tekhnichna elektrodynamika. Tem. vyp. Sylova elektronika ta enerhoeffektivnist. [Technical electrodynamicics. Power Electronics and Energy Efficiency]*. 2011, pp. 44–49.
- [2] Boguslavskiy L. Z., Miroshnichenko L. N., Diordiychuk V. V., Vinnichenko D. V., Yaroshinskiy N. S. Sozдание maketnykh obraztsov vysokovoltного oborudovaniya kompleksnykh sistem elektrofiltratsii ekologicheski opasnykh promyshlennykh vybrosov [Creating prototypes of high-voltage equipment of integrated systems of electrofiltration of environmentally hazardous industrial emissions]. *Vestnik «KhPI». Tem. vyp. «Tekhnika i elektrofizika vysokikh napryazheniy» — Bulletin of KhPI. «Technique and electrophysics of high voltages», 2012, no 52 (958), pp. 31–39.*
- [3] Boguslavskiy L. Z., Miroshnichenko L. N. Elektrofiltratsiya raznoimpedansnykh gazovykh vybrosov v kompleksnoy sisteme pylegazoochistki ekologicheski opasnykh promyshlennykh obektov [Electrofiltration of gas emissions of different impedance in complex system of gas and dust purification of environmentally hazardous industrial facilities]. *Vestnik «KhPI». Tem. vyp. «Tekhnika i elektrofizika vysokikh napryazheniy» — Bulletin of KhPI. «Technique and electrophysics of high voltages», 2014, no 21, pp. 12–16.*
- [4] Mesyats G. A. Impulsnaya energetika i elektronika [Pulse power engineering and electronics]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 704 p.
- [5] Osipov V. V. Samostoyatelnyy obemnyy razryad [Independent volume discharge]. *UFN Publ.*, 2000, vol. 170, pp. 225–245.
- [6] Bohuslavskiy L. Z., Myroshnychenko L. M., Diordiichuk V. V. Sposib destrukttsii riznoimpedansnykh hazovykh vykydiv nebezpechnykh promyslovykh obiektiv [Method destruction riznoimpedansnykh gas emissions of hazardous industrial facilities] Patent UA, no. u 2013 11731; 2014.
- [7] Rodionov A. I., Klushin V. N., Sister V. G. Tekhnologicheskie protsessy ekologicheskoy bezopasnosti [Technological processes of ecological safety]. Kaluga, Bochkareva N. Publ., 2000. 800 p.
- [8] Chekalov L. V. Osnovy razrabotki i konstruirovaniya elektrofiltrov novogo pokoleniya [Fundamentals of design and development of a new generation of electrostatic precipitators]. *InformTsement Publ.*, 2006, no 5, pp. 67–69.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Высокая интенсивность исследований объемного разряда обусловлена его уникальными параметрами и широким практическим использованием. Объемный разряд является основой для создания наиболее мощных газовых лазеров, используется для создания плазмохимических реакторов, а также для инициирования и поддержания различных процессов на поверхности твердых тел.

В последнее время объемный разряд все более широко применяется в системах комплексной пылегазоочистки экологически опасных промышленных объектов [2]. Установлено, что для возбуждения объемных разрядов в больших объемах в электрофильтрах необходимо перенапряженное поле, частота следования импульсов в килогерцовом диапазоне и наносекундный фронт импульсов [3].

Несмотря на большое количество проведенных исследований, многие вопросы по зажиганию и поддержанию стабильного объемного разряда на разветвленных площадях острийных электродов, используемых в промышленных электрофильтрах, на сегодняшний день остаются открытыми и требуют проведения дополнительных исследований.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В настоящее время актуальными являются задачи по защите атмосферы от загрязнения промышленными

выбросами [3, 7, 8]. В современных условиях значение пылегазоочистки резко возрастает, поскольку объемы выбрасываемых отходов постоянно возрастают, что связано как с громадными объемами вырабатываемой энергии, так и с использованием низкосортного топлива. Ужесточены также требования к содержанию пыли в газах после очистки, что резко увеличило объемы газов, нуждающихся в газоочистке, расширена номенклатура пылей, от которых необходимо очищать воздух. Для решения данных задач необходимо создание электрофильтров нового поколения с использованием объемного разряда [3, 6], что требует углубленного изучения условий его зажигания, влияния на его параметры технологических особенностей электрофильтрации, газодинамических процессов в генерируемой плазме и конструктивных характеристик электродных систем.

К настоящему времени изучены значения параметров объемного разряда и их взаимосвязи при использовании стандартных острийковых электродов. Найдены условия его зажигания, характеристики горения и возможные причины контракции [4, 5].

Использование объемного разряда в комбинированных системах электрофильтрации промышленных выбросов имеет свои особенности, вызванные особенностями конструкции электродных систем и технологическими свойствами электрофильтров, определяющими скорость газового потока [1], что

существенно влияет на режимы объемного разряда его стабильность и требуют проведения углубленных исследований.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ — изучение особенностей использования объемного разряда в комбинированных системах электрофльтрации промышленных выбросов, исследование влияния конструкции электродных систем, газодинамических процессов в генерируемой плазме, в частности скорости газового потока, на условия зажигания и поддержку стабильного объемного разряда.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Анализ электродных систем электрофильтров показал, что формы и конструкции коронирующих электродов, применяющихся в электрофильтрах отечественного и зарубежного производства, по мере их совершенствования, претерпели многочисленные изменения.

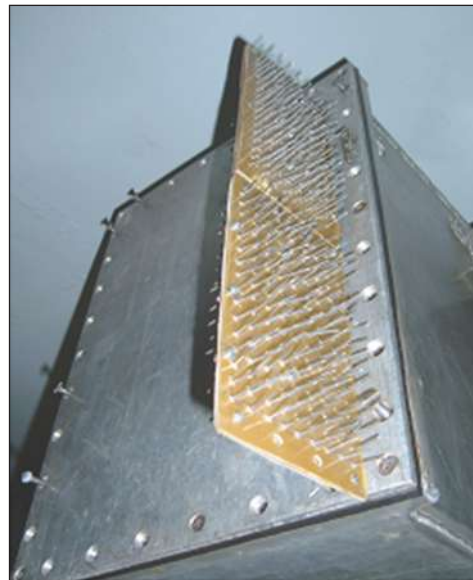
При проведении исследований для реализации объемного стримерного разряда были предложены острые электроды типа «щетка» двух видов на изоляционном и металлическом основании (рис. 1).

При замене стандартного острийкового электрода на электрод типа «щетка» в разрядном промежутке реализуется объемный разряд (рис. 2). Объемный разряд был реализован как на электродах с диэлектрическим основанием (рис. 2,а), так и на металлическом основании (рис. 2,б). При малых промежутках между щеткой и осадительным электродом (до 80 мм) реализуется только объемный разряд. В случае увеличения промежутка одновременно наблюдается как

При малых промежутках между щеткой и осадительным электродом (до 80 мм) реализуется только объемный разряд. В случае увеличения промежутка одновременно наблюдается как



а)



б)

Рис. 1. Остриевые электроды типа «щетка»:

а) на металлическом основании; б) на изоляционном основании



а)



б)



в)

Рис. 2. Генерация объемного разряда:

а) острийковый электрод типа «щетка» на изоляционном основании; б) острийковый электрод типа «щетка» на металлическом основании; в) одновременное получение коронного и объемного разрядов на параллельных электродных системах

объемный разряд, так и коронный разряд на параллельных электродных системах (рис. 2,в). Объемный разряд зажигается не мгновенно с подачей напряжения на промежуток, а в течение времени от 30 до 60 с, в зависимости от длины разрядного промежутка. Наилучший стабильный результат в зажигании разряда наблюдался, когда амплитуда импульса напряжения нарастала постепенно за тот же промежуток времени от 30 до 60 с.

Симметричное расположение электрода типа «щетка» относительно осадительных электродов позволяет получить объемный разряд, занимающий весь объем электродной системы (рис. 3). Напряжение зажигания такого разряда 55 кВ при частоте следования импульсов 1,3 кГц. Наиболее интенсивное свечение объемного разряда наблюдалось при величине рабочего напряжения примерно от 58 до 60 кВ. При этом напряжении в диапазоне частот следования импульсов от 1 до 3 кГц разряд поддерживался достаточно длительное время (в данных экспериментах до 30 мин.). При этом наблюдался очень высокий выход озона (по потемнению идентификационного фильтра). На более продолжительный период времени экспериментальную установку не оставляли включенной так, как в лаборатории становилось опасно находиться без специальной системы вытяжки наработанного озона. На данной электродной системе удалось генерировать общий объем плазменного образования до 10 л. Потребляемая из сети средняя мощность на поддержание стабильного объемного разряда в данном объеме составляла 0,8 кВт.

Такое поведение объемного разряда можно частично объяснить в рамках феноменологической модели [7], рассматривающей развитие разряда в предварительно ионизованной среде между двумя плоскими электродами при подаче на них высоковольтного импульса с фронтом нарастания напряжения i_ϕ . По данной модели объясняется появления цуга лавин от катода к аноду. Поскольку скорость движения электронов вдоль силовых линий поля больше,



Рис. 3. Объемный разряд, реализуемый во всем объеме электродной системы

чем в других направлениях, то электроны при своем дрейфе от катода к аноду образуют цуг лавин, идущих по следу друг друга и формирующих токовую нить. При этом радиус нити R_n будет увеличиваться со скоростью диффузии электронов. Одновременно с расширением нити будет нарастать число электронов и ионов в ней. По мере нарастания концентрации электронов и ионов скорость расширения нити будет замедляться из-за торможения электронов полем ионов и скорость ее расширения начнет определяться скоростью движения ионов (амбиполярная диффузия). Это случится, когда радиус нити R_n станет равным радиусу Дебая. Тогда, приравняв радиус нити к радиусу Дебая и вводя величину $n_{окр} = 1/R_n^3$, можно определить $n_{окр}$. Если $n_0 < n_{окр}$, то разряд будет состоять из множества тонких диффузных нитей, которые в совокупности создают впечатление однородного разряда. Нитевидная структура разряда наблюдалась при вырезании оптическим способом тонкой полоски разряда. Кроме того, при возрастании n_0 до $n_{окр}$ предельная энергия, вводимая в газ, будет расти вследствие увеличения числа нитей, следовательно, площади, занимаемой разрядом, что также установлено в экспериментах [5]. Однако, если даже удастся сформировать однородный плазменный столб ($n_0 = n_{окр}$), это является необходимым, но не достаточным условием возбуждения разряда в объемной форме. На рассматриваемой стадии, когда существует плазменный столб, катодное падение потенциала, обеспечивающее самоподдержание разряда, еще не сформировано, важным условием формирования однородного разряда является обеспечение равномерной эмиссии (выхода) электронов с поверхности катода.

Это условие может быть реализовано только за счет бомбардировки катода фотонами из плазменного столба. Причем из-за неидеальности катода и необходимости уменьшения влияния неоднородности эмиссии, возникающей за счет других факторов, нужно, чтобы фотоэмиссия превышала другие виды эмиссии от 50 до 100 раз. При этом число квантов, выбивающих электроны из катода, пропорционально объему плазменного столба V и концентрации электронов в нем n . Для обеспечения выбивания электронов в нужном количестве значение nV должно быть больше некоторой критической величины $(nV)_{кр}$, которая зависит от условий зажигания разряда.

Таким образом, требования к n_0 в больших и малых объемах различны. Если в малых объемах для возбуждения объемного разряда необходимо выполнить только условие по перекрытию токовых нитей, то в больших объемах требования к n_0 возрастают и диктуются условием $nV \geq (nV)_{кр}$. Согласно этой модели, на длительность фронта высоковольтного импульса накладывается дополнительное ограничение: она не должна быть меньше времени перекрытия токовых нитей.

Были проведены исследования влияния скорости потока воздуха на зажигание и поддержку стабильного объемного разряда. Исследования проведены на макете электродной системы с продувкой воздуха на остриях типа «щетка» (рис. 4). Скорость потока воздуха регулировалась в диапазоне от 0 до 20 м/с.

Результаты экспериментальных исследований (рис. 5) показали, что при скорости 20 м/с, наблюдается небольшое сдувание плазмы из зоны области разряда (темная область в правой нижней части межэлектродного промежутка). В этом случае наблюдалась и временная задержка зажигания разряда на время от 40 до 50 с. При скоростях потока менее 20 м/с плазменная область разряда и времена задержек зажигания оставались идентичными варианту без потока воздуха.

Проведенные экспериментальные исследования объемного разряда показали необходимость учета газодинамических процессов в генерируемой плазме. Первым необходимо решить вопрос о влиянии газодинамических процессов на устойчивость разряда. Согласно приведенным экспериментальным данным поток до 20 м/с внешне не влияет на зажигание и поддержание стабильного разряда, однако в плазме возможно возникновение различного рода неустойчивостей, которые могут приводить к контракции разряда либо сдуванию плазмы. Сами параметры объемной плазмы, создаваемой стационарными разрядами с конвективным охлаждением, ограничены развивающимися в плазме неустойчивостями. По этой причине значения параметров плазмы, которые достижимы в стационарных разрядах в газовых потоках, ограничены условием

$$\frac{l_0}{v} < \tau_x, \tag{1}$$

где τ_x — характерное время развития самой быстрой из неустойчивостей плазмы, с; v — скорость потока газа, м/с; l_0 — размер, вдоль которого осуществляется прокачка газа, м.

При выполнении условия (1) накапливающиеся возмущения будут вынесены из разрядной зоны раньше, чем они успеют развиваться и нарушить однородность плазмы.

Одним из способов возбуждения конвективно охлаждаемых газовых сред, оставляющих возможность широкой вариации параметров плазмы, является осуществление импульсно-периодического режима поддержания газового разряда. При выполнении условия (1) следующий импульс тока последует не раньше, чем через время $T = l_0/v$. За это время с одной стороны, среда успеет охладиться к следующему импульсу, а с другой — в процессе возбуждения снимается ограничение (1). Это означает, что в импульсе могут быть реализованы параметры, свойственные не стационарному, а импульсному разряду. Например, скорость выделения энергии в импульсе не ограничена условием (1) и потому может быть значительно выше, чем средняя скорость выделения энергии.

Основными физическими причинами, ограничивающими значение предельной частоты следования импульсов тока разряда $f_{lim} = v/l_0$, являются адиабатическое расширение области нагретого разрядом газа, наличие градиентов плотности газа в разрядном



Рис. 4. Макет электродной системы с продувкой воздуха на остриях типа «щетка»

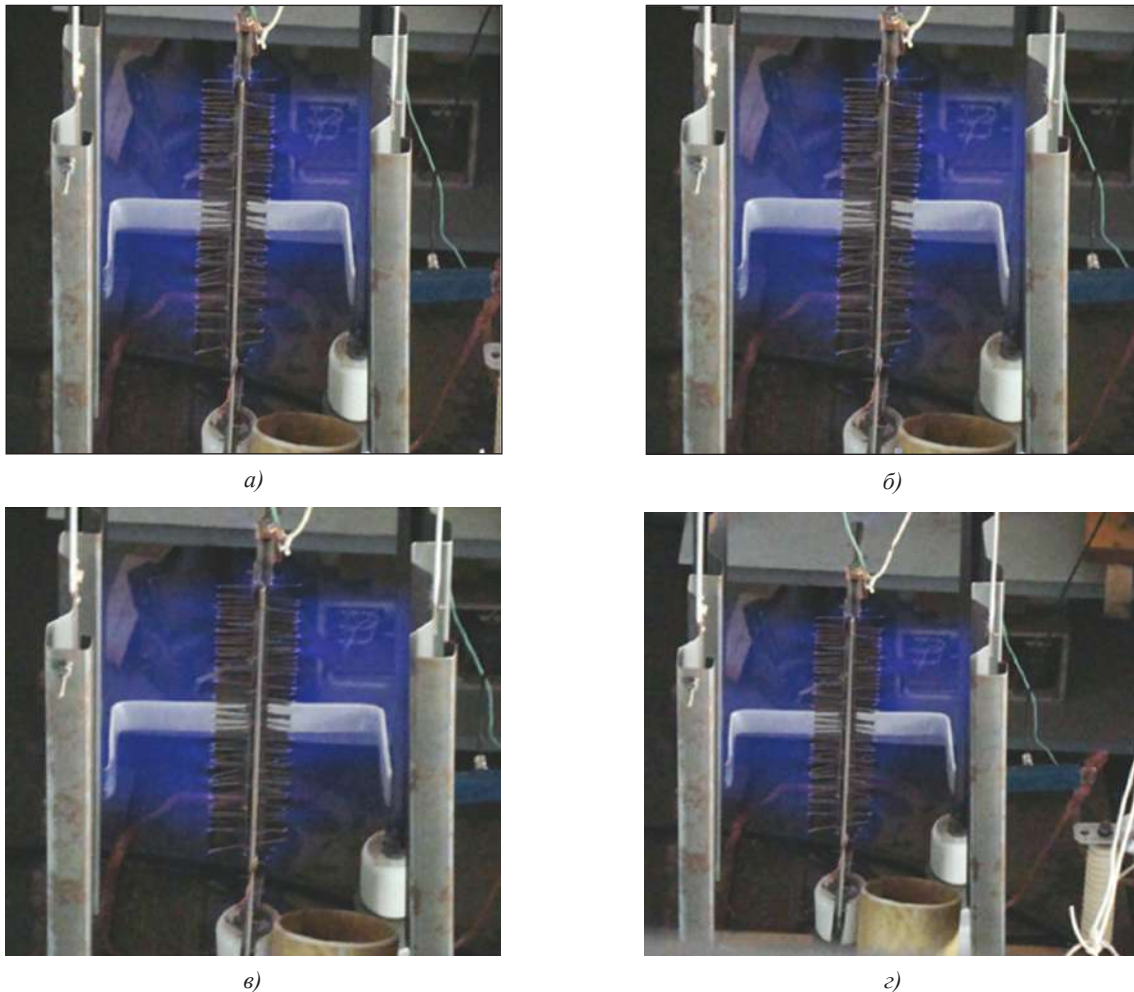


Рис. 5. Объемный разряд при различных скоростях потока воздуха v_n :
 а) $v_n = 0$ м/с; б) $v_n = 10$ м/с; в) $v_n = 15$ м/с; г) $v_n = 20$ м/с

объеме за счет акустических колебаний и развитие перегревно-акустической неустойчивости.

Роль указанных эффектов можно в значительной степени уменьшить соответствующим подбором элементов газодинамического канала электрофильтра. Так, адиабатическое расширение горячего газа по потоку вверх можно ограничить, используя входной канал малого сечения. Развитие же перегревно-акустической неустойчивости, происходящее при совпадении частоты следования импульсов с какой-либо из собственных частот акустического резонатора, можно подавить изменением длины канала, через который прокачивается газ.

ВЫВОДЫ. 1. Проведенные исследования влияния конструкции электродных систем на условия зажигания и поддержку стабильного объемного разряда показали, что для получения объемного разряда, занимающего весь межэлектродный объем, необходимо применение электродной системы типа «щетка» с симметричным расположением относительно осадительных электродов. Напряжение зажигания и интенсивного

свечения такого разряда 55–60 кВ при частоте следования импульсов от 1 до 3 кГц. На данной электродной системе удалось генерировать общий объем плазменного образования до 10 л. Потребляемая из сети средняя мощность на поддержание стабильного объемного разряда в данном объеме составляла 0,8 кВт.

2. Исследование влияния газодинамических процессов на устойчивость объемного разряда показали, что скорость газового потока до 20 м/с внешне не влияет на зажигание и поддержание стабильного разряда, однако в плазме возможно возникновение различного рода неустойчивостей, которые могут приводить к контракции разряда. Для недопущения причин возникновения контракции минимальная частота следования импульсов должна быть пропорциональна скорости потока газа v и обратно пропорциональна длине канала l_0 прокачки газа: $f_{\text{им}} = v/l_0$. В этом случае за время между импульсами ионизированные молекулы газа будут удалены из межэлектродного объема, что устранил влияние газодинамических неустойчивостей на разряд.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Богуславский, Л. З.** Влияние режимов работы высоковольтного источника питания на формирование стримерного коронного разряда и эффективность систем газоочистки [Текст] / Л. З. Богуславский, Л. Н. Мирошниченко, Ю. Г. Казарян, Н. С. Ярошинский // *Технічна електродинаміка. Тем. вип. Силова електроніка та енергоефективність.* — Ч. 1. — 2011. — С. 44–49.
- [2] **Богуславский, Л. З.** Создание макетных образцов высоковольтного оборудования комплексных систем электрофильтрации экологически опасных промышленных выбросов [Текст] / Л. З. Богуславский, Л. Н. Мирошниченко, В. В. Диордийчук, Д. В. Винниченко, Н. С. Ярошинский // *Вестник «ХПИ». Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений».* — Харьков : НТУ «ХПИ», 2012. — № 52 (958). — С. 31–39.
- [3] **Богуславский, Л. З.** Электрофильтрация разноимпедансных газовых выбросов в комплексной системе пылегазоочистки экологически опасных промышленных объектов [Текст] / Л. З. Богуславский, Л. Н. Мирошниченко // *Вестник «ХПИ». Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений».* — Харьков : НТУ «ХПИ», 2014. — № 21. — С. 12–16.
- [4] **Месяц, Г. А.** Импульсная энергетика и электроника [Текст] / Г. А. Месяц. — М. : Наука, 2004. — 704 с.
- [5] **Осипов, В. В.** Самостоятельный объемный разряд [Текст] / В. В. Осипов // *УФН.* — 2000. — Т. 170. — С. 225–245.
- [6] **Пат. 90293** Україна, МПК (2014) B01D 53/32 (2006.01) C10K 1/00 H1T 19/00. Спосіб деструкції різноімпедансних газових викидів небезпечних промислових об'єктів / Л. З. Богуславський, Л. М. Мирошниченко, В. В. Діордійчук, заявник та патентовласник Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України. — № u 2013 11731; заявл. 04.10.2013; опубл. 26.05.14. Бюл. № 10.
- [7] **Родионов, А. И.** Технологические процессы экологической безопасности / А. И. Родионов, В. Н. Клушин, В. Г. Систер. — Калуга : Изд-во Н. Бочкаревой, 2000. — 800 с.
- [8] **Чекалов, Л. В.** Основы разработки и конструирования электрофильтров нового поколения / Л. В. Чекалов // *ИнформЦемент.* — 2006. — № 5. — С. 67–69.

© Л. З. Богуславський, Л. Є. Овчиннікова, С. В. Чушак, С. С. Козирєв

Надійшла до редколегії 11.07.2016

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *О. М. Сізоненко*