

Излучательные характеристики импульсного разряда по струе воды в воздухе

А.В. Кривоносенко, Д.А. Кривоносенко, В.Е. Прокопьев*

*Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3*

Поступила в редакцию 22.10.2011 г.

Приведены результаты исследования излучения в воздухе при атмосферном (и ниже) давлении из разрядного промежутка, образованного соосно расположенными торцами трубчатых электродов, по оси которых истекает струя обрабатываемой среды. Обнаружено, что при возбуждении трубчатого разряда наносекундного диапазона длительности с находящейся внутри струей воды можно реализовать режимы работы, которые обеспечивают селективное возбуждение и излучение отдельных атомов и молекул, образующихся из молекул воды и воздуха. Исследуются режимы получения, возбуждения и излучения атомов и молекул азота, кислорода, водорода, оксида азота, ОН в водно-воздушной смеси в области 200–1100 нм со спектральным разрешением от 0,03 до 1 нм.

Ключевые слова: вода, воздух, импульсный разряд; the water, the air, discharge impulse.

Введение

Электрический разряд в газе является инструментом по преобразованию энергии импульса (энергии поля) в энергию излучения спектров молекул и атомов, а также источником активных частиц — атомов, радикалов, ионов. Продукты электрического разряда в воздухе и в бинарных смесях $O_2:N_2$ используются для обезвреживания загрязнений в воде [1], для обработки нефти [2], природного газа [3]. Причем в [4] отмечено, что для разрыва химических связей в загрязнителе необходима конкретная длина волны, которая поглощается этим загрязнителем, вызывая его диссоциацию. А так как в воде обычно много разных загрязнителей, то необходимо много селективных источников излучения УФ-диапазона, что сложно реализовать, или, с другой стороны, необходим широкополосный излучатель, но разработка таких излучателей тоже сложная проблема. В связи с этим авторы [4] предлагают решение проблемы обезвреживания загрязнений воды путем использования УФ-излучения в системе с H_2O_2 , O_3 , $H_2O_2 + O_3$. Это воздействие при обработке воды приводит к синергетическому эффекту, заключающемуся в возрастании скоростей окисления загрязнений на порядки и исключающему образование более вредных и устойчивых для других методов обезвреживания загрязняющих веществ. Синергетический эффект также отмечен при деструкции микроорганизмов и обработке пластмасс.

Заманчивы технология и устройство, в котором УФ-облучение и смесь (H_2O_2 , O_3 , $H_2O_2 + O_3$) получались бы в разряде в одной системе. Это не лишено практического смысла, поскольку одним из методов получения УФ-излучения являются разряды в парах воды, а указанные выше частицы системы являются продуктами диссоциации воды. Так, в [5] описана система барьерного разряда с импульсным питанием, через которую обрабатывали водно-воздушную смесь. Исследование эмиссионных спектров излучения позволило зарегистрировать спектры с длинами волн 310,8–316,0 нм, принадлежащие ОН.

В работе [6] детально исследованы спектры излучения системы «ОН — инертные газы» в диапазоне длин от 140–315 нм в тлеющем импульсном разряде. Исследование импульсного высоковольтного разряда в воздухе в смеси с водой представляет интерес также с точки зрения понимания грозовых явлений в атмосфере, а также возникновения и устойчивости феномена шаровой молнии, водородной энергии, гидрирования и растворения каменного угля и т.д.

В [7] предложена электроразрядная система для обработки воды, а в [8] описаны конструкция и ее разрядные характеристики. Разряд трубчатой формы зажигается в газовой среде, по оси которой истекает струя воды, захватывающая продукты разряда и обрабатываемая излучением от разряда. Электрический импульсный разряд в воздухе и в бинарных смесях различается по типам: диффузный — объемный, переходный (струйчатый), искровой, обусловленные параметрами воздействующего на газовый промежуток импульса напряжения, конструкцией электродов, составом газовой среды. Причем существенное влияние на диффузно-объемный тип разряда,

* Анатолий Викторович Кривоносенко (kav@iae.hcei.tsc.ru); Дмитрий Анатольевич Кривоносенко (kav@iae.hcei.tsc.ru); Владимир Егорович Прокопьев (prokop@ogl.hcei.tsc.ru).

а также струйчатый, при которых наиболее эффективно вводится энергия в газовую среду, оказывает влажность газовой среды, поскольку с увеличением влажности возрастает прилипание электронов к молекулам воды, вызывая возрастание напряжения на газовом зазоре, приводящее по отношению к газу к уменьшению длительности диффузно-объемной стадии разряда и переходу его к искровому типу [9].

В настоящей статье рассматриваются эмиссионные спектры трубчатого разряда без воды в воздухе и в воздушной среде, окружающей струю воды.

1. Экспериментальная установка и методика эксперимента

Установка (рис. 1) содержит три блока: I — технологический, II — энергосиловой и III — аппаратура для измерения спектров и параметров импульса.

Технологический блок, предназначенный для создания разряжения в разрядной камере и подачи воды в нее, включает бак 1 с водой, соединенный с лопастным насосом Н, который через тройник и вентиль VM1 соединен со струйным насосом NB, труба смешения которого соединена с баком. Всасывающий патрубок струйного насоса с помощью диэлектрической проставки соединен с потенциальным трубчатым электродом реактора обработки, через который производится откачивание газа и воды из разрядной камеры С струйным насосом. Энергосиловой блок II включает генератор импульсов ГИ, преобразователь импульсов ПИ с разрядной камерой С. ГИ выполнен на тиристорном коммутаторе и формирует импульсы длительностью 10 мкс и напряжением до 2 кВ с частотой до 1 кГц [10]. Преобразователь импульсов выполнен на звеньях с магнитным сжатием подобно [11] и формирует импульсы на газовом зазоре по фронту 10–20 нс, по длительности до 60 нс, по амплитуде до 60 кВ.

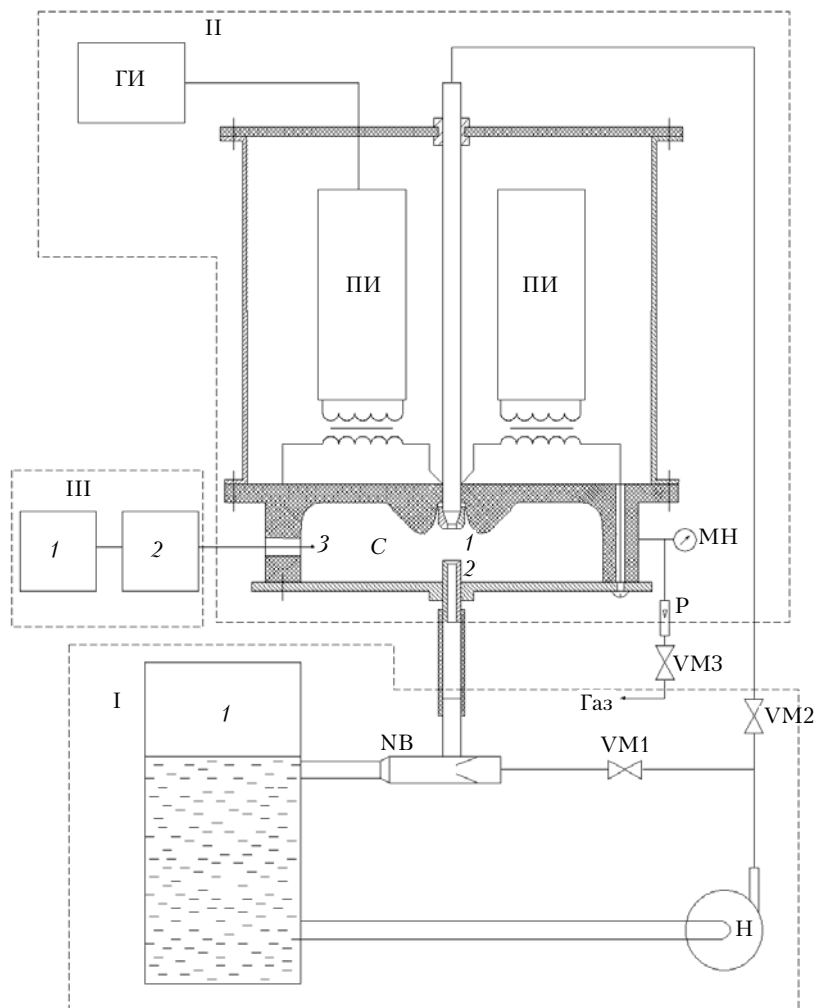


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки по наблюдению спектральных характеристик трубчатого разряда: I — технологический блок (1 — бак с водой; Н — лопастной насос ЭЦВ6-4-130 (GRUNDFOS, SQN-7-40); VM1,2 — шаровые краны; NB — струйный насос 8×16 мм); II — энергосиловой блок (ГИ — генератор исходных импульсов; ПИ — преобразователь импульсов; С — камера обработки: 1 — сопло-электрод, 2 — электрод-горловина камеры смешения, 3 — оптоволоконный кабель, МН — манометр ВТИ, P — ротаметр РМ-1,6ГУЗ, VM3 — натекатель); III — диагностический блок (1 — компьютер, 2 — анализатор спектра Ocean Optics HR-4000)

Разрядная камера С для обработки среды, выполненная из диэлектрика и являющаяся дном корпуса ПИ, представляет собой цилиндрическую полость, со стороны преобразователя импульсов которой по оси расположен патрубок ввода среды с соплом 1, являющимся заземленным электродом разрядной системы, формирующим рабочую струю, а противоположная сторона полости закрыта выходным металлическим соплом с патрубком вывода. Патрубок вывода, являющийся потенциальным электродом 2 разрядной системы, через сопло, шпильками, проходящими сквозь диэлектрик перегородки, соединен с выводом высокого напряжения преобразователя импульсов. Разрядная система «сопло-электрод – выходное сопло с патрубком вывода» также является струйным насосом [12]. В экспериментах использованы два типа сопл: полусферическое сопло, обеспечивающее скользящий разряд по струе воды, и коническое – только в воздухе (по нашему мнению и визуальному наблюдению).

Полученная таким образом конструкция камеры обработки позволяет обеспечить высокое рабочее напряжение на разрядной системе при малой ее индуктивности и высокой надежности. Камера также снабжена каналами со штуцерами для подачи воздуха и окном, закрытым кварцевым стеклом, для регистрации спектров излучения. Каналы входят в камеру по касательной к ее образующей, что исключает образование капель в камере (разбрызгивание струи) от потока воздуха. Штуцеры соединены с ротаметром РМ-1,6 ГУЗ и манометром ВТИ, по показаниям которых устанавливались расход воздуха в камере и его давление. Параметры воздуха обеспечиваются в камере технологическим блоком, приведенным на рис. 1: давление воздуха изменялось от 1 до 0,6 атм, расход воздуха от 0,1 до 1 м³/ч.

Измерение электрических параметров разряда производилось с использованием делителя напряжения и трансформатора тока осциллографом ТДС 2012В. Трансформатор тока был размещен непосредственно в камере.

Измерение спектров излучения из разряда производилось через оптоволоконный кабель с коллиматором, установленным непосредственно у кварцевого окна в одной серии экспериментов, а в другой оптоволоконный кабель вводился в разрядную камеру. Использовались также спектроанализаторы Ocean Optics HR-4000, работающие в диапазоне 200–1100 нм с разрешением 0,3 нм, и два высокоразрешающих спектрометра HR-4000 с разрешением 0,03 нм в области 250–430 нм (каждый спектроанализатор работал в диапазоне 100 нм).

Эксперимент проводился следующим образом. Включался лопастной насос, устанавливались в камере расход воздуха и его давление, включался генератор импульсов, загорался в камере разряд. ГИ снабжен регулировками по частоте и выходному напряжению, что позволяло реализовывать различные типы разрядов. Производилась регистрация излучения и электрических параметров импульса. Затем открывался кран VM2 и в камеру подавалась вода. Измерялся спектр излучения.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

В случае отсутствия воды в установке при включении генератора с низкой частотой следования импульсов (500 Гц) и повышении напряжения в зазоре загорается коронный разряд, визуально наблюдаемый как слабо светящийся диффузный. Как видно из рис. 2, в спектре излучения воздуха возникают полосы, принадлежащие ко второй положительной системе $N_2(C^3\Pi_u, v') \rightarrow (B^3\Pi_g, v'')$ с длинами волн 282,0; 297,5; 315,9; 337,1; 357,7; 380,5; 405,9 нм и т.д.

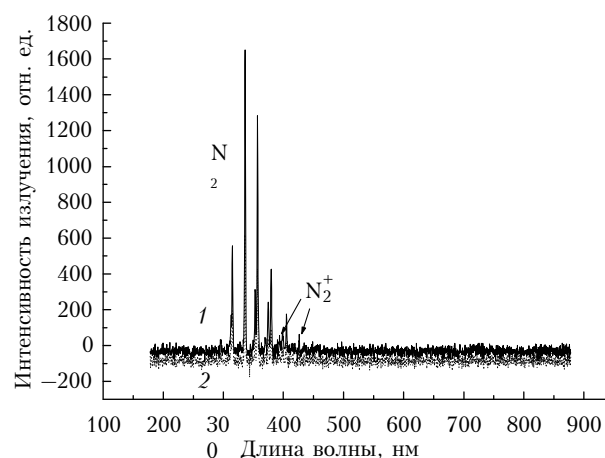


Рис. 2. Спектры излучения диффузного высоковольтного разряда в чистом сухом воздухе при различных параметрах импульсов возбуждения (1, 2)

Увеличение амплитуды напряжения выше 20 кВ сопровождалось появлением слабых линии иона молекулярного азота (переход $N_2^+(B^2\Sigma_u^+, v') \rightarrow (X^2\Sigma_g^+, v'')$), первая отрицательная система N_2^+ с длинами волн 391,4 ($v' = 0, v'' = 0$) и 427,8 нм ($v' = 0, v'' = 1$). Интенсивность этих полос на разрядном промежутке растет как при понижении давления воздуха, так и при увеличении напряжения. В целом спектр испускания данного вида разряда близок к спектру испускания коронного разряда, хотя и намного (порядки) более интенсивного [13]. В таком типе разряда полностью отсутствуют линии атомарного кислорода, что указывает на невысокую скорость образования озона при этих условиях. Согласно большому количеству проведенных исследований данный вид высоковольтного наносекундного разряда в атмосфере или чистом азоте можно отнести к разновидностям стримерного разряда [9].

При дальнейшем понижении давления в сухой разрядной камере путем повышения скорости прокачки реализуется однородно горячая разновидность разряда с красноватым оттенком и тонкими красноватыми нитями. В этом случае наряду с указанными выше спектральными полосами молекул азота появляются сильные спектральные линии атома кислорода 777 и 844 нм, иона азота 500 нм и сравнительно сильные красные и инфракрасные полосы первой положительной системы молекулы азота

с максимумом вблизи длины волны 656 нм. Последние и придают красноватый цвет разряду и нитям. При этом напряжение на зазоре по сравнению с напряжением коронного разряда снижается на 5–10%, а ток возрастает примерно на ту же величину. При определенных оптимальных (с точки зрения наработки атомов кислорода и молекул озона) условиях разряда полосы второй положительной системы излучают незначительно, в то время как атомы кислорода и молекулы озона образуются максимально (рис. 3).

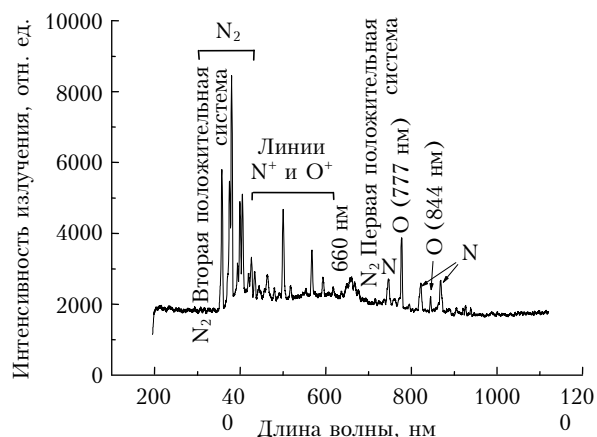


Рис. 3. Спектр диффузного разряда в сухом чистом воздухе с красноватым свечением

При дальнейшем повышении напряжения нити увеличиваются в диаметре, а их цвет изменяется на сине-фиолетовый. Этот режим имеет следующую особенность: при изменении напряжения генератора на 5–10% напряжение на зазоре уменьшается до 0,1 амплитудного значения, а ток возрастает до номинального значения. При достижении критических значений напряжения, приводящих к пробое разрядного промежутка и возникновению ярко светящихся искр между электродами, дополнительно к указанной выше эмиссии возникает множество линий излучения атомов и ионов основных атмосферных газов и сплошного спектра в видимой области. При этом интенсивность молекулярных полос испускания азота существенно уменьшалась (рис. 4).

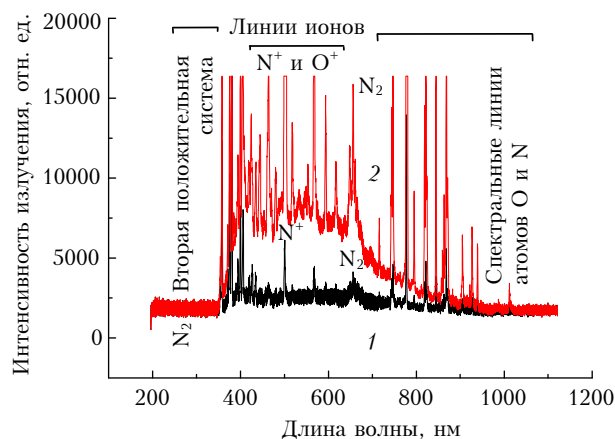


Рис. 4. Спектры излучения при переходе от диффузного (1) к искровому типу импульсного разряда (2)

Спад напряжения до нуля происходит за 4 нс. Такая же динамика разрядов наблюдается при повышении частоты при фиксированном напряжении. Переход стримерного разряда к импульсному пробую сопровождается кардинальными изменениями в спектре излучения. Во время искрового пробоя хорошо прослеживается характерный для дугового канала вид спектра, содержащий многочисленные атомные и ионные линии, в том числе атомов и ионов материала электродов, наложенные на мощный континуум, связанный с тепловым, тормозным и рекомбинационным излучением квазиравновесной плазмы дугового канала.

Интересно отметить, что в области 700–1100 нм наблюдаются преимущественно очень сильные спектральные линии атомов кислорода и азота, в то время как молекулярные линии второй положительной системы азота, как и в предыдущем случае, уменьшаются. При этом можно, отметить, что на отдельных участках межэлектродного промежутка наблюдался как стримерный, так и искровой разряды. Такая же динамика разрядов наблюдается при повышении частоты при фиксированном напряжении.

Заметим, что на рис. 3 и 4 показаны спектры излучения разряда, зафиксированные через выходные окна из стекла К8, не пропускающего излучение в области 200–340 нм.

Разряд и свечение из разрядного промежутка принципиально меняются при поступлении в камеру и разрядный промежуток воды в виде паров, капель или струи. При повышении амплитуды напряжения до и выше 25–26 кВ в спектре разряда первыми появляются известные полосы испускания молекулы ОН (313, 308 нм и т.д.), H_2 и NO , лежащие в области 200–300 нм (рис. 5).

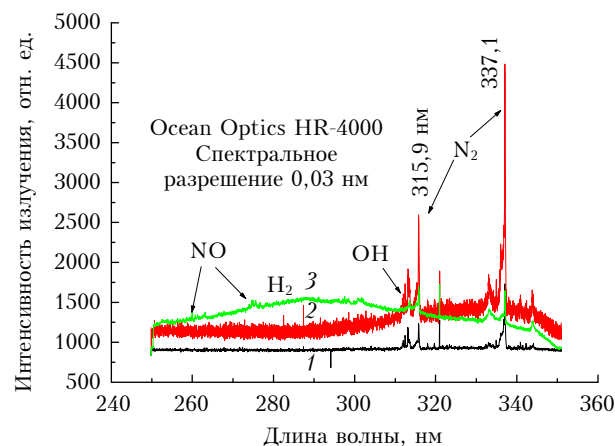


Рис. 5. Полосы излучения молекулярного водорода (3) и молекул ОН и NO (1, 2) при различных параметрах импульса возбуждения в разряде с водой: 1 – диффузный (стримерный) разряд; 2 – предпробивной разряд; 3 – пробой

Следует заметить, что эти полосы возникали в разряде в основном только при наличии воды (струи или паров воды) в области разряда. Этот результат указывает на то, что основным каналом образования окислов азота являются молекулы воды H_2O , а не молекулярный кислород [14].

С нашей точки зрения, наиболее интересный результат, полученный нами, заключается в следующем. При определенных условиях возбуждения импульсно-периодического трубчатого разряда и наличии прокачиваемой струи воды возникает воздушно-капельная среда, в которой реализуется селективное возбуждение только атомов водорода и кислорода. Интенсивность излучения других атомов и молекул, в том числе молекул азота, незначительна (рис. 6).

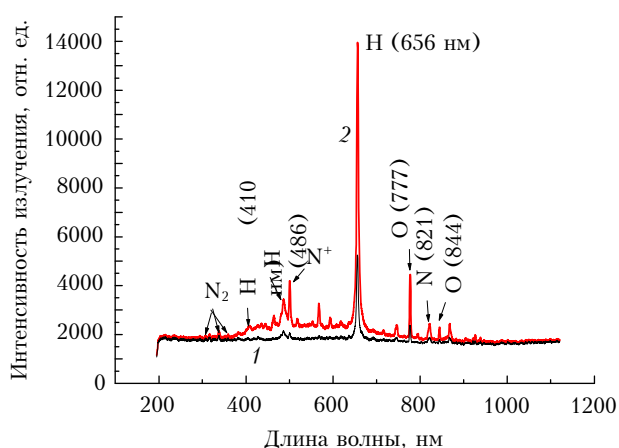


Рис. 6. Спектры излучения разряда с водой при различных параметрах импульса тока. (Разложение воды на водород и кислород)

Таким образом, в разряде возникают условия для накопления и возбуждения атомов водорода и кислорода, что может служить отправной точкой для исследования процессов, связанных с атмосферными и энергетическими проявлениями свободного водорода и кислорода.

В настоящей статье описана установка для создания и возбуждения атомов и молекул высоковольтным импульсным разрядом в воздушно-капельной среде. Показано, что при наличии воды в разрядном промежутке можно реализовать условия для селективного накопления и возбуждения определенных атомов (H, N, O) и молекул (H₂, OH, NO, O₃).

В заключение авторы приносят искреннюю благодарность к.ф.-м.н. В.К. Ошлакову за техническую помощь и полезное обсуждение результатов работы.

A.V. Krivonosenko, D.A. Krivonosenko, V.E. Prokop'ev. The emission characteristics of a pulsed discharge in a water jet in air.

The results of studies of atmospheric radiation in air at the atmospheric and lower pressure of the discharge gap formed by the coaxially arranged tubular ends of the electrodes along the jet axis will expire the treated medium. It is found that excitation of the discharge tube with nanosecond duration inside the water jet, modes can be implemented, which provide selective excitation and emission of individual atoms and molecules, formed from water and air. We study the modes of production, excitation, and emission of spectra of atoms and molecules of nitrogen, hydrogen, nitrogen oxide, and OH in water-air mixture in range 200–1100 nm with a spectral resolution from 0.03 to 1 nm.

1. Луин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н. Физическая химия озона. М.: Изд-во МГУ, 1998. 480 с.
2. Камьянов В.Ф., Лебедев А.К., Северилов П.П. Озонолиз нефтяного сырья. Томск: РАСКО, 1997. 271 с.
3. Алексеев С.Б., Медведев Ю.В., Орловский В.М., Панарин В.А., Польшгалов Ю.И., Суслев А.И., Тарасенко В.Ф. Динамика конверсии природного газа в режиме дросселирования при ВУФ-облучении // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 8. С. 707–711.
4. Холодкевич С.В., Юшина Г.Г., Апостолова Е.С. Перспективные методы обезвреживания органических загрязнений воды // Экол. химия. 1996. № 5(2). С. 75–106.
5. Корнев Я.И., Яворовский Н.А., Иванов Г.Ф., Савельев Г.Г., Шаманская Т.А. Использование эмиссионных спектров для исследования характеристик барьерного разряда в водно-воздушной среде // Изв. ТПУ. 2003. № 5. С. 67–71.
6. Шуайбов А.К., Генерал А.А., Кельман В.А., Шевера И.В. Эмиссионные характеристики газоразрядного ультрафиолетового излучателя низкого давления на парах воды // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34, вып. 14. С. 6–11.
7. Кривonosенко А.В., Кривonosенко Д.А., Трапильцев В.Н., Хузев А.П. Пат. РФ № 2213702 от 08.04.2002. Опубликовано 10.10.2003. Бюл. № 23.
8. Кривonosенко Д.А. Материаловедение, технологии и экология в 3-м тысячелетии: Матер. 4-й Всерос. конф. молодых ученых (19–21 октября 2009 г., Томск, Россия). Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2009. С. 19–22.
9. Райзер Ю.П. Физика газового разряда: Учеб. руководство. М.: Наука, 1987. 592 с.
10. Кривonosенко Д.А. Материаловедение, технологии и экология в 3-м тысячелетии: Матер. 4-й Всерос. конф. молодых ученых (19–21 октября 2009 г., Томск, Россия). Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2009. С. 16–19.
11. Мешков А.Н. Магнитные генераторы мощных наносекундных импульсов (обзор) // Приборы и техн. эксперим. 1990. № 1. С. 23.
12. Лямаев Б.Ф. Гидроструйные насосы и установки. Л.: Машиностроение, 1988. 256 с.
13. Аникин Н.Б., Баженов С.А., Заценник Д.В., Минтусов Е.И., Панчешный С.В., Стариковская С.М., Стариковский А.Ю. Импульсные наносекундные разряды и их применения // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Тематич. том VIII-1. Химия низкотемпературной плазмы / Гл. ред. В.Е. Фортов. М.: Янус-к, 2005. С. 171–355.
14. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. М.: Изд-во МГУ, 1989. 176 с.