

Оценка влияния неравномерности газового зазора на характеристики объемного барьерного разряда

ЛЫСОВ Н.Ю., ОРЛОВ А.В., ТЕМНИКОВ А.Г., ЧЕРНЕНСКИЙ Л.Л., КИВШАР Т.К.,
ВОЕВОДИН В.В., СОКОЛОВА М.В.

Приведены результаты моделирования работы генераторов озона на основе объемного барьерного разряда с учетом неравномерности геометрических параметров. Оценено влияние неравномерности газового зазора на энергетические характеристики барьерного разряда. Представлены результаты расчетов распределения плотности мощности вдоль генератора озона при монотонно меняющемся по размеру газовом зазоре. Приведены кривые распределения плотности мощности в зависимости от размера зазора при различном превышении напряжения над начальным для четырех видов генераторов озона. Представлены новые данные по моделированию разрядных процессов в генераторах озона с неравномерным зазором и влиянию этой неоднородности на эффективность использования разряда. Полученные результаты могут быть использованы при создании реальных озонаторов, в том числе и большой производительности. Даны рекомендации по выбору оптимального среднего размера газового зазора в зависимости от качества изготовления электродов и точности выставления и регулировки газового зазора.

К л ю ч е в ы е с л о в а: *объемный барьерный разряд, моделирование, плотность мощности, озон, вольт-кулонная характеристика*

В настоящее время для производства озона в промышленных масштабах как из осушенного воздуха, так и из кислорода применяют генераторы озона (ГО) на основе объемного барьерного разряда [1]. Известно, что уменьшение размера газового зазора положительно влияет на эффективность синтеза озона, позволяет получать более высокие предельные концентрации и в целом упрощать конструкцию генератора озона, в первую очередь за счет более эффективного отвода тепла из объема газа и снижения напряжения возникновения разряда. В современных промышленных озонаторах ведущих производителей газовый зазор составляет порядка 200–300 мкм, однако существуют конструкции и с зазором вплоть до 150 мкм [2].

Очевидно, что на столь малых расстояниях помимо проблемы организации протока необходимого количества рабочего газа через сечение газового промежутка существенное влияние начнет оказывать и точность соблюдения расстояния между электродами. Неравномерность может возникать как за счет неодинаковой толщины используемого диэлектрического барьера, так и за счет кривизны металлических электродов или же по обеим причинам сразу. Основные мировые производители борются с неравномерностью зазора наряду с регулированием его размера различными способами, например в [3] предлагается в протяженных трубчатых внешних электродах использовать секциониро-

ванные внутренние электроды небольшой длины, соединенные последовательно.

С помощью специально созданной расчетной модели была проведена оценка влияния неравномерности газового зазора на эффективность использования объемного барьерного разряда при оптимальных значениях плотности мощности на примере генератора озона. Кроме того, при различном давлении рабочих газов была проведена экспериментальная проверка результатов моделирования на реальных ГО разной площади, с различными диэлектрическими барьерами и с разными размерами газового зазора. Сначала оценивалась неравномерность газового зазора в плоском генераторе озона с однородным по толщине диэлектрическим барьером, расположенным на каждом из электродов. Эскиз ГО с основными геометрическими параметрами представлен на рис. 1.

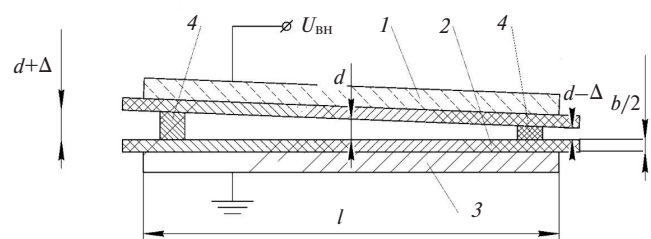


Рис. 1. Эскиз генератора озона: 1 – высоковольтный электрод; 2 – диэлектрический барьер; 3 – заземленный электрод; 4 – дистанцирующие проставки

В основе созданной модели лежит представление ГО как большого числа параллельно соединенных маленьких ГО эффективной площадью в 10–20 мм² каждый, что по порядку соответствует площади, занимаемой одним микроразрядом в реальных ГО при газовых промежутках размером от долей до единиц миллиметров [4].

В предполагаемой схеме номинальное значение зазора d находится в центре протяженной электродной системы длиной l и глубиной h . Отклонение зазора предполагается только вдоль стороны l и равняется Δ . Отклонение описывается линейным законом и изменяется в интервале от $d+\Delta$ до $d-\Delta$ на краях электрода. Барьер с диэлектрической проницаемостью ϵ и толщиной $b/2$ расположен на каждом металлическом электроде. Разряды происходят между поверхностями барьера. Разрядный промежуток разбивается на n частей, каждая из которых представляет собой самостоятельный разрядный промежуток, соединенный параллельно с $n-1$ другими. В первый момент времени на поверхности барьеров отсутствует осевший заряд. Общая схема замещения представлена на рис. 2.

Значения емкости вычисляются по выражениям:

$$C'_{6k} = \frac{\epsilon\epsilon_0 S'}{b}; \quad C'_{rk} = \frac{\epsilon_0 S'}{Z_k},$$

где S' – площадь единичного разрядного промежутка; Z_k – его средняя высота.

При достаточно высоком значении n поле в каждом отдельно взятом промежутке можно считать однородным, тогда площадь S' и высота Z_k определяются как

$$Z_k = \frac{nd + \Delta(2k - n - 1)}{n}; \quad S' = lh/n; \quad k \in [1; n].$$

Напряженность, при которой выполняется условие самостоятельности в газовом зазоре, вычислялась по следующему выражению:

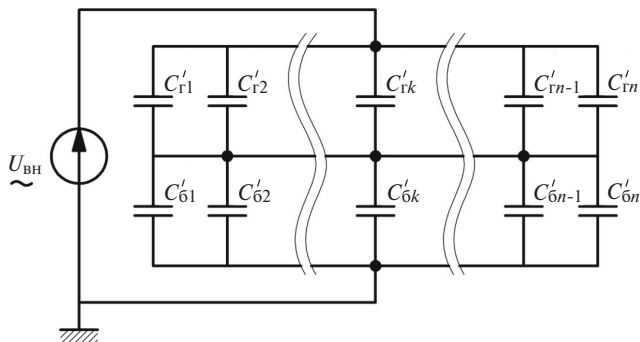


Рис. 2. Схема замещения модели генератора озона: C'_{rk} – емкость k -го газового промежутка; C'_{6k} – емкость барьера, соответствующая каждому промежутку; $U_{ВН}$ – источник высокого переменного напряжения

$$E_{на} = A\delta + B\sqrt{\delta/d}, \quad \text{кВ/см}, \quad (1)$$

где A и B – коэффициенты, зависящие от вида газа [5] (для воздуха $A=24,5$, $B=6,4$, для кислорода 26 и 6,35 соответственно); d – зазор в см; δ – относительная плотность газа:

$$\delta = PT_0 / TP_0,$$

где P и T – давление и температура в разрядной области; P_0 и T_0 – нормальные значения давления и температуры соответственно.

Начальное напряжение также определялось по закону подобия [6]:

$$U_{на} = A\delta d + B\sqrt{\delta d}, \quad \text{кВ}. \quad (2)$$

Важно понимать, что для зажигания разряда начальное напряжение должно возникнуть на газовом зазоре (U_r), т.е. напряжение зажигания на электродах (U_3) при этом определяется из соотношения емкостей газового зазора и барьера:

$$U_3 = U_r \frac{C_6 + C_r}{C_6}. \quad (3)$$

При моделировании считалось, что значения напряженности в газовом зазоре $E_{qг}$ и диэлектрическом барьере $E_{qб}$, которые создают заряд ΔQ , осевший на поверхности диэлектрического барьера после протекания микроразряда, можно вычислять как напряженность, создаваемую заряженной пластиной из-за значительного превышения геометрических размеров, занимаемых зарядом, над толщиной зазора и барьера:

$$E_{qг} = \frac{\Delta Q_k}{2S_q \epsilon_0}; \quad E_{qб} = \frac{\Delta Q_k}{2S_q \epsilon \epsilon_0},$$

где S_q – площадь, занимаемая зарядом, осевшим на диэлектрическом барьере.

При этом (см. рис. 3) напряженность в газовом зазоре падает, а в барьере возрастает. Снижение

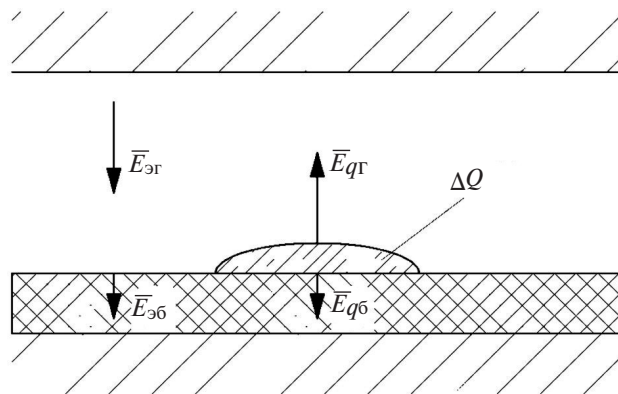


Рис. 3. Распределение напряженностей в межэлектродной области

напряженности в газовом зазоре ниже значения, необходимого для самостоятельного развития разряда, приводит к погасанию микрозаряда. Важно, что напряженность снижается лишь в области протекшего микрозаряда и из-за небольшого размера газового промежутка; напряженность в соседних областях электрода из-за осевшего заряда меняется незначительно. Изменение напряжения на электродах, вызванное разрядными явлениями, происходит одновременно для всех частей рассматриваемого ГО.

Значение заряда, протекшего в ходе одного микрозаряда при наличии барьера с относительной диэлектрической проницаемостью достаточно большого диапазона (от 4 до 50), оценивалось на основе [7–10] пропорционально 0,5 нКл на 1 мм промежутка.

Изменение (скачок) напряжения на электродах генератора озона, вызванное микрозарядом, определялось при условии, что общая емкость газового зазора разряжается на ΔQ , а общая емкость барьера приобретает аналогичный заряд. Выражения, описывающие данные изменения:

$$\Delta U_{rk} = \frac{\Delta Q_k}{C_r}; \Delta U_{6k} = \frac{\Delta Q_k}{C_6}$$

Напряжение, как и напряженность, на газовом зазоре ΔU_r падает, а на диэлектрическом барьере ΔU_6 возрастает, общее же изменение напряжения ΔU определяется суммой этих напряжений:

$$\Delta U = -\Delta U_{rk} + \Delta U_{6k}$$

Стоит отметить, что за время разрядных процессов (десятки наносекунд) источник напряжения, питающий ГО, «не успевает» препятствовать провалу напряжения на электродах ГО из-за конечной мощности и наличия в схеме дросселя, необходимого для работы резонансной схемы питания, наиболее распространенной в озонаторостроении. Восстановление напряжения на электродах ГО происходит со скоростью, задаваемой источником питания. Принципиальная электрическая схема приведена на рис. 4.

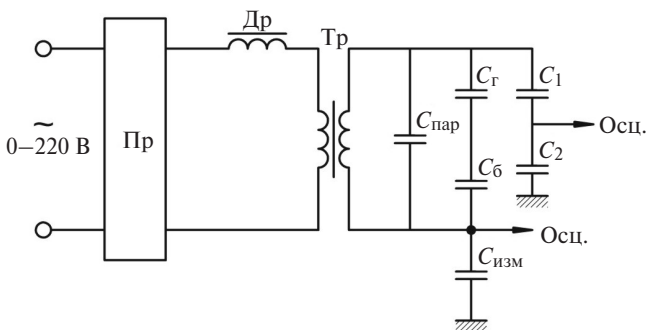


Рис. 4. Принципиальная схема озонатора с измерительными элементами

Генератор озона представлен в виде последовательно соединенных емкостей газового промежутка C_r и барьера C_6 , которые подключены к высокому напряжению трансформатора (Тр), соединенного с преобразователем (Пр) через силовой дроссель (Др). Регулирование высокого напряжения осуществляется плавным изменением входного напряжения на преобразователе. На схеме также показаны измерительная емкость ($C_{изм}$) и емкостный делитель напряжения C_1-C_2 , позволяющие получать вольт-кулонные характеристики (ВКХ) разряда, и параллельная емкость ($C_{пар}$), определяемая присоединениями, ошиновками, охранными электродами и емкостями между электродами и окружающими элементами.

Расчет состояния ГО проводился по следующему алгоритму:

- 1) для каждого момента времени проверялось условие самостоятельности во всех элементах ГО;
- 2) при выполнении условия самостоятельности (1) в элементарном зазоре считалось, что там произошел микрозаряд, на диэлектрический барьер осел заряд ΔQ , произошло изменение напряженности в этом элементе на E_{qr} и E_{q6} и изменение напряжения на общих электродах на ΔU ;
- 3) для следующего момента времени условие самостоятельности проверялось исходя из значения напряжения, скорректированного с учетом ΔU .

На рис. 5 представлена зависимость мгновенных значений напряжения, задаваемого источником, и напряжения на электродах ГО с учетом разрядных явлений. Под напряжением, задаваемым источником, понимается такое напряжение, которое было бы при работе данного источника на нагрузку емкостью, равной общей емкости генератора озона с учетом присоединений. Снижение обусловлено зажиганием микрозарядов в момент времени t_3 .

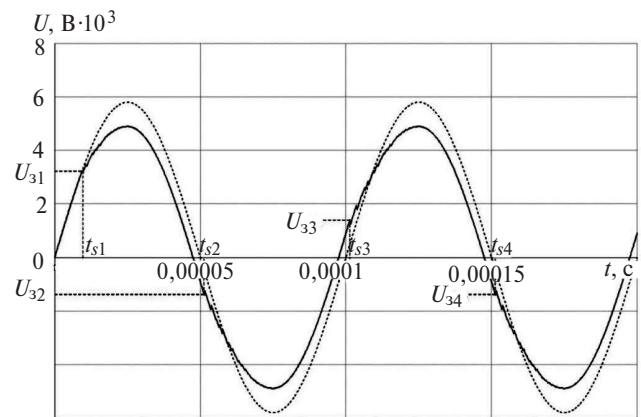


Рис. 5. Напряжение на электродах генератора озона: — $U_{ист}$; — — — — $U_{эл}$

Разница в напряжении зажигания разряда на первом (U_{31}) и последующих ($U_{32}-U_{34}$) полупериодах обусловлена осевшим на барьере зарядом и напряженностью, создаваемой им в газовом зазоре. При смене полярности напряжения вектор напряженности, создаваемой осевшим в предыдущем полупериоде зарядом, и напряженности от приложенного к электродам напряжения совпадают по направлению, что приводит к более раннему выполнению условия самостоятельности.

Значение напряжения на электродах, при котором возникает разряд в промежутке, за исключением первого полупериода, отличается от вычисляемого по (3). Вычислить напряжение с учетом осевшего заряда можно с помощью вольт-кулонной характеристики барьерного разряда [11, 12], стилизованное изображение которой приведено на рис. 6.

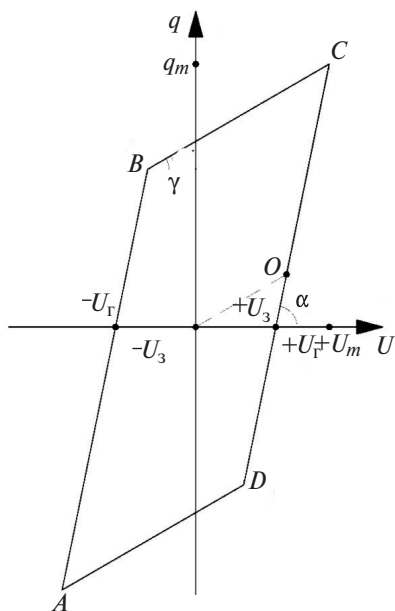


Рис. 6. Стилизованная вольт-кулонная характеристика ГО

Напряжение, вычисляемое по (3) (без учета осевшего заряда), соответствует точке O и равно

значению напряжения зажигания в первом полупериоде питающего напряжения, напряжение с учетом осевшего заряда ($\pm U_3$) — точкам B и D . Общая емкость ГО определяется наклоном сторон BC и AD (разряд отсутствует), а «рабочая» емкость барьера — наклоном сторон AB и CD , т.е. $\operatorname{tg}\alpha=C_6$ и $\operatorname{tg}\gamma=C_{\text{общ}}$. Напряжение U_3 может быть определено решением системы уравнений (4) и (5), описывающих прямые AB и BC соответственно:

$$q_1 = \operatorname{tg}\alpha(u + U_{\Gamma}); \quad (4)$$

$$q_2 = \operatorname{tg}\gamma(u - U_m) + \operatorname{tg}\alpha(U_m - U_{\Gamma}); \quad (5)$$

$$U_3 = -U_m + 2U_{\Gamma} \frac{C_6}{C_6 + C_{\text{общ}}}; \quad C_{\text{общ}} = \frac{C_6 C_{\Gamma}}{C_6 + C_{\Gamma}}. \quad (6)$$

Из (6) видно, что зажигание разряда может происходить даже до смены полярности питающего напряжения при существенном превышении его амплитуды над начальным.

При подстановке теоретических значений емкостей и напряжений возможны большие отклонения от экспериментальных данных, особенно при невысоких значениях плотности мощности:

$$P = 4U_{\Gamma} C_6 f \left(U_m - U_{\Gamma} \frac{C_{\text{общ}}}{C_6 - C_{\text{общ}}} \right). \quad (7)$$

Также ВКХ позволяет получать достоверные расчетные значения мощности, выделяемой в разряде, при подстановке в выражение (7) значений емкостей и напряжений, полученных из ВКХ.

Для проверки корректности моделирования разрядных явлений был создан экспериментальный стенд, схема которого приведена на рис. 7.

Для экспериментальной проверки был выбран источник синусоидального высокого напряжения $U_{\text{вн}}$ номинальной мощностью, на порядок превышающей мощность, выделяемую в разряде. Данный источник позволял создавать на ГО напряже-

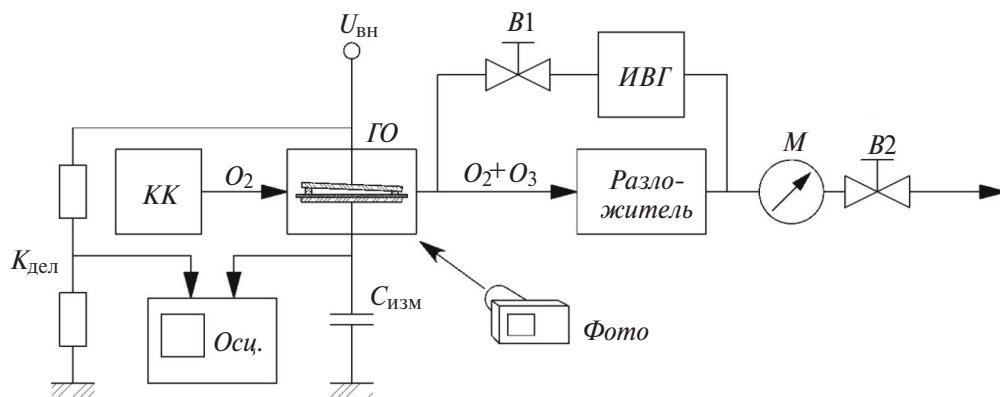


Рис. 7. Схема экспериментальной установки: ГО — генератор озона в герметичной камере; $U_{\text{вн}}$ — высокое напряжение; B1 — вентиль протока газа через измеритель влажности ИВГ; B2 — вентиль подпора давления; M — манометр; Фото — цифровой фотоаппарат Canon; Осц. — Tektronix 3054; КК — концентратор кислорода Airsep 5L

ние амплитудой до 20 кВ с регулируемой частотой в диапазоне 3÷50 кГц. Электрические параметры регистрировались с помощью цифрового осциллографа Tektronix 3054, сигналы на который подавались с малоиндуктивного высоковольтного емкостного делителя с $K_{дел} = 1070$ и с измерительной емкости 118 нФ. Проверка проходила на реальных и модельных генераторах озона (см. табл. 1)

Таблица 1

Номер п/п	Зазор разрядной зоны (шириной 5–30 мм, длиной 110–137 мм)	Барьер		
		Материал	Значение ϵ	Толщина, мм
1	0,1–1,0	Стеклоэмаль	7,0	0,90
2	0,1–1,4	Керамика Al_2O_3	10,2	1,20
3	0,1–1,0	Керамика Al_2O_3	10,2	0,63
4	0,1–0,8	Слюда	6,2	0,015
5	0,1–1,6	Стекло	8,2	5,10

Значение диэлектрической проницаемости барьера на рабочих частотах озонатора измерялось согласно требованиям [13]. Значение диэлектрической проницаемости также оперативно контролировалось с помощью ВКХ. Для этого высоковольтный электрод располагался непосредственно на поверхности диэлектрического барьера без воздушного зазора (при этом ВКХ имела вид рис. 8). Наклон данной характеристики определяет емкость системы, зная площадь и толщину которой, можно легко определить и диэлектрическую проницаемость.

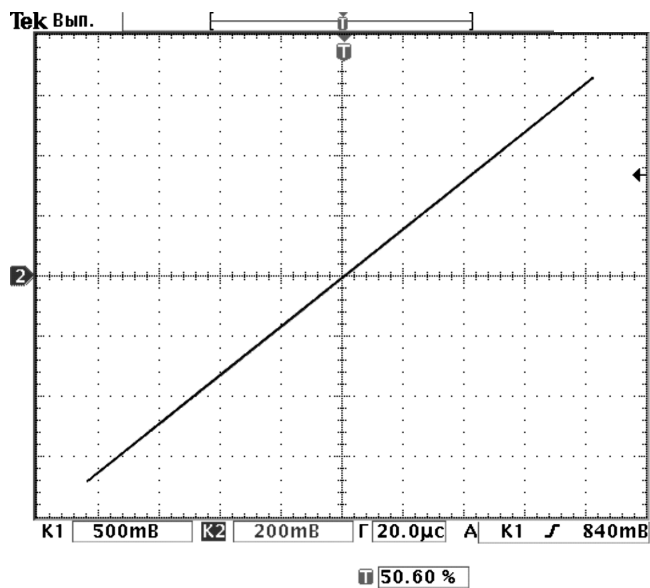


Рис. 8. Вольт-кулонная характеристика диэлектрического барьера

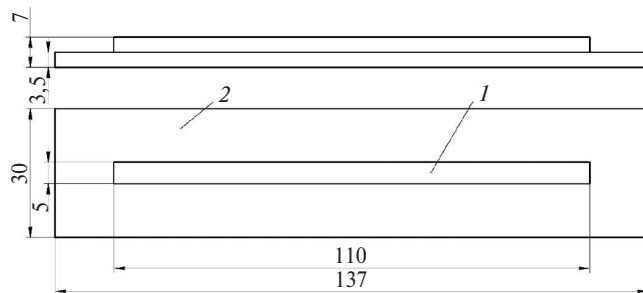


Рис. 9. Эскиз высоковольтного электрода

Высоковольтный электрод генератора озона был изготовлен по эскизу на рис. 9. Электрод подобной формы позволял оценивать работу генераторов озона различных площадей при использовании в качестве активной части той или иной его стороны. Места возможного возникновения коронного разряда были максимально скруглены во избежание внесения погрешности в измерения.

При испытаниях на малой площади при большой относительной протяженности разрядной зоны плоскость 2 выполняла функцию экранирования разрядной области во избежание распространения разрядных явлений в стороны от высоковольтного электрода, которые при столь небольших размерах электрода могут вносить существенные искажения в измеряемые значения. В этом случае значение $C_{пар}$ (рис. 4) соизмеримо со значением емкости ГО, и при определении ΔU эта емкость должна обязательно учитываться. Также для устранения возможности протекания поверхностных разрядов от высоковольтного электрода граница между его краем и диэлектрическим барьером покрывалась слоем кремнеорганического вазелина.

Зазор между электродами создавался с помощью диэлектрических проставок и контролировался измерительными щупами. Электроды принудительно не охлаждались, температура контролировалась дистанционным пирометром AMF 009. Все эксперименты были проведены при температуре окружающей среды, отличающейся не более чем на 2° от нормальной. Длительность каждого из исследованных режимов работы не превышала 10 с, что не приводило к существенному разогреву генератора озона из-за небольших исследуемых мощностей.

Генератор озона был помещен в прозрачную герметичную камеру, кислород в которую подавался или от баллона, или от медицинского концентратора кислорода. Поток кислорода был направлен непосредственно в разрядную область для исключения возможности накопления в ней синтезируемого озона, что могло бы привести к изменению условий развития и возникновению разряда. Влажность газа в камере на протяжении всех экспериментов была постоянной и контролировалась

с помощью проточного измерителя влажности газов ИВГ-1 К-П, включенного через вентиль для защиты от озона.

Оптические измерения с помощью фотоаппарата проводились в воздушной среде с абсолютной влажностью $11,2 \text{ г/м}^3$ из-за невозможности четкого различия границы горения в среде чистого кислорода из-за слабой светимости разряда. Влияние влажности учитывалось согласно [14]. Доля межэлектродной области зазора оценивалась с помощью мишени, установленной позади электродов.

Экспериментальная проверка модели осуществлялась по:

- 1) напряжению на электродах при работе на высоковольтный конденсатор и реальный ГО;
- 2) мощности разряда;
- 3) напряжению зажигания разряда;
- 4) доле разрядного промежутка, занятого разрядом.

При проверке корректности созданной модели по первому критерию было проведено две серии опытов. В первой к источнику питания в качестве нагрузки присоединялся реальный ГО площадью 39 см^2 , с однородным газовым зазором размером $0,25 \text{ мм}$ и стеклянным диэлектрическим барьером толщиной $5,1 \text{ мм}$. Общая измеренная емкость ГО вместе с присоединениями составляла 99 пФ . Во второй серии нагрузкой служил высоковольтный конденсатор КВИ-2 номинальным напряжением 20 кВ и емкостью 96 пФ . Емкости конденсаторов и ГО определялись с помощью измерителей RLC марок E7-22 и АРРА-703. В ходе обеих серий определялась амплитуда высокого напряжения U_m и соответствующее ей напряжение на входе в преобразователь $U_{вх}$. Результаты экспериментов приведены на рис. 10. Видно, что при одном и том же режиме работы преобразователя (одинаковом входном напряжении) напряжение на ГО из-за горения разряда в нем меньше напряжения на конденсаторе,

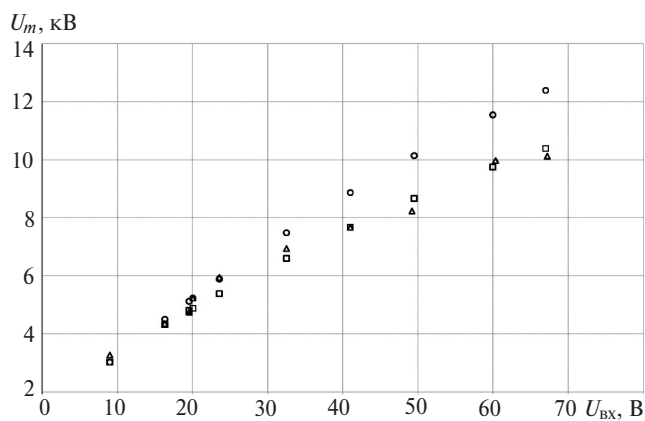


Рис. 10. Зависимость амплитуды высокого напряжения от входного напряжения: \circ – конденсатор; \square – генератор озона; Δ – результаты моделирования

причем разница увеличивается с ростом напряжения.

Также на рис. 10 приведены результаты проведенного моделирования работы описанного генератора озона. Расчетные данные хорошо коррелируются с данными эксперимента, что позволяет утверждать справедливость работы выбранной модели согласно первому выбранному критерию.

Для проверки по второму критерию была проведена серия экспериментов на ГО площадью 39 см^2 , с переменным газовым зазором размером от $0,2$ до $0,9 \text{ мм}$ и стеклянным диэлектрическим барьером толщиной $5,1 \text{ мм}$. На рис. 11 представлено сравнение зависимостей мощности, выделяемой в разряде, от приложенного напряжения, полученных различными способами: при моделировании, по результатам экспериментов и вычисленных по (7).

Расчеты по (7) выполнены с учетом значений емкости и напряжения, определенных по ВКХ. Расхождение начинается при значениях напряжения, соответствующих моменту, когда вся разрядная область эффективно занята разрядом, о чем можно судить по значению барьерной емкости, вычисленной по углу наклона соответствующей стороны ВКХ [12]. У результатов моделирования такое расхождение с экспериментом отсутствует, что также подтверждает корректность созданной модели.

Для оценки корректности работы модели по третьему критерию эксперименты были вновь проведены на ГО с равномерным газовым зазором из-за сложности визуального определения момента зажигания разряда на ВКХ при переменном зазоре из-за сглаженных углов параллелограмма, так как в зазоре происходит не единовременное, а постепенное загорание разряда с ростом напряжения. На рис. 12 представлены реальные ВКХ генераторов озона с переменным и равномерным зазором.

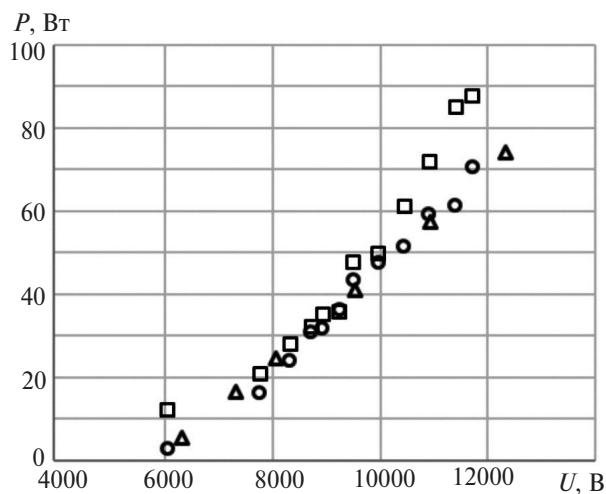


Рис. 11. Зависимость мощности, выделяемой в разряде от напряжения на электродах: \circ – результаты эксперимента; Δ – результаты моделирования; \square – результаты расчета по (7)

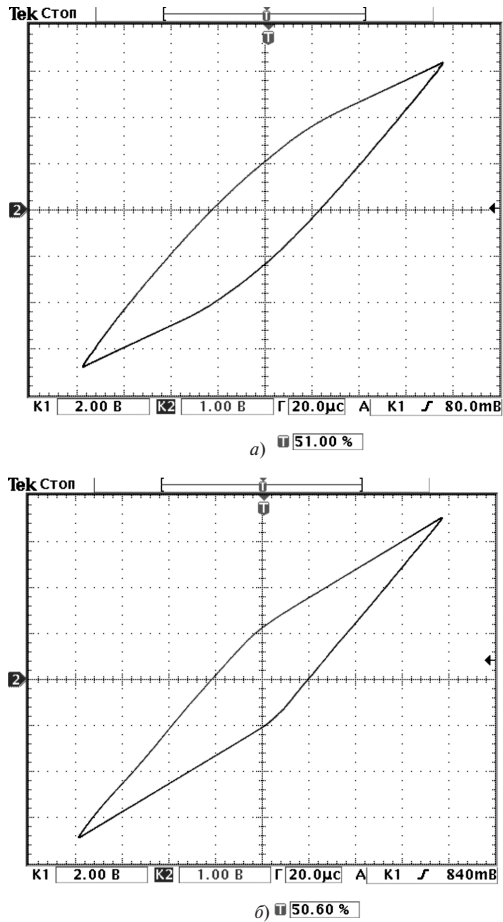


Рис. 12. Вольт-кулонные характеристики генератора озона с переменным (а) и равномерным (б) зазором

Далее приведены значения напряжения зажигания разряда в генераторе озона по данным эксперимента $U_{3.экс}$ и результатам моделирования $U_{3.мод}$ для различных значений амплитуды питающего напряжения U_m :

U_m , кВ	8,32	8,72	8,92	9,24	9,50	9,97	10,44
$U_{3.экс}$, кВ	0,64	0,05	-0,21	-0,43	-1,28	-1,93	-2,35
$U_{3.мод}$, кВ	0,59	0,11	-0,19	-0,38	-1,19	-1,87	-2,14

Результаты моделирования хорошо соответствуют эксперименту, что вновь подтверждает корректность модели.

Эксперименты по оценке зависимости заполняемости неравномерного зазора разрядом от приложенного напряжения (критерий 4) проходили с помощью генераторов озона с керамическим и эмалевым барьерами площадью $5,5 \text{ см}^2$ при переменном газовом зазоре от 0,2 до 1,0 мм. Результаты оптических измерений и компьютерного моделирования приведены в табл. 2. Доля зазора, занятая разрядом, приведена в зависимости от отношения приложенного напряжения к начальному.

Небольшие расхождения результатов моделирования и эксперимента в области сильного превышения приложенного напряжения над начальным

можно объяснить влиянием интенсивных разрядных явлений в промежутке на выполнение условия самостоятельности разряда. В целом же, можно считать, что модель прошла проверку по всем предложенным критериям и является корректной и пригодной для использования.

Таблица 2

Значение $U_m/U_{нач.}$ отн. ед.	Доля зазора, занятая разрядом, %	
	ГО с керамическим барьером	ГО с эмалевым барьером
	эксперимент/модель	эксперимент/модель
1,05	10/9,38	12/12,50
1,10	16/15,63	18/18,75
1,20	25/21,88	30/28,13
1,40	45/43,75	50/43,75
1,60	67/59,38	70/62,50
1,80	90/78,13	100/90,63
2,00	100/100	100/100

Влияние неравномерности разрядного промежутка на эффективность использования барьерного разряда оценивалась с точки зрения плотности мощности разряда P_0 , под которой понимается отношение мощности, выделяемой в разряде, к площади его горения. Известно, что именно плотность мощности совместно с абсолютным значением газового зазора z определяют рост температуры ΔT в разрядной области, которая критически важна при синтезе озона [1]:

$$\Delta T = \frac{P_0 z}{\beta \alpha}, \tag{8}$$

где α – коэффициент теплопроводности; β – коэффициент, определяемый системой охлаждения.

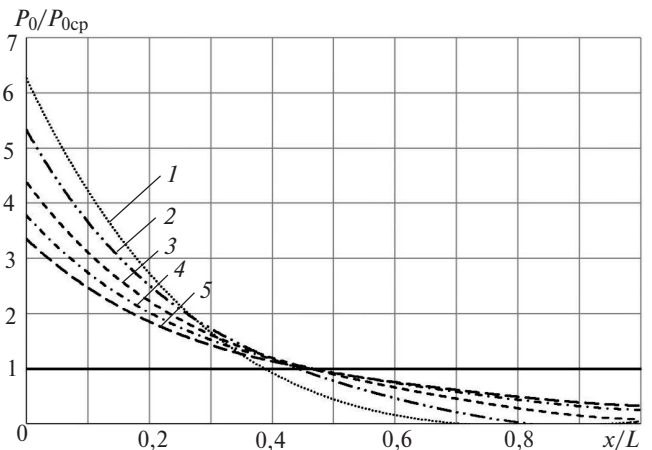


Рис. 13. Распределение относительной плотности мощности по длине генератора озона при различном напряжении на электродах: 1 – 8 кВ; 2 – 10 кВ; 3 – 13 кВ; 4 – 16,5 кВ; 5 – 20 кВ

Ни рис. 13 представлены результаты численного моделирования работы генератора озона длиной 12 см, площадью 39 см², с переменным газовым зазором размером от 0,2 до 0,9 мм и стеклянным диэлектрическим барьером толщиной 5,1 мм. Показано распределение плотности мощности относительно среднего значения (P_0/P_{0cp}) вдоль генератора озона (x/L) при различных значениях питающего напряжения. Значение x/L , равное 0, соответствует минимальному значению газового зазора, 1 – максимальному. На рис. 14 для этого же генератора озона представлены зависимости относительного изменения температуры в промежутке, полученные с учетом (8).

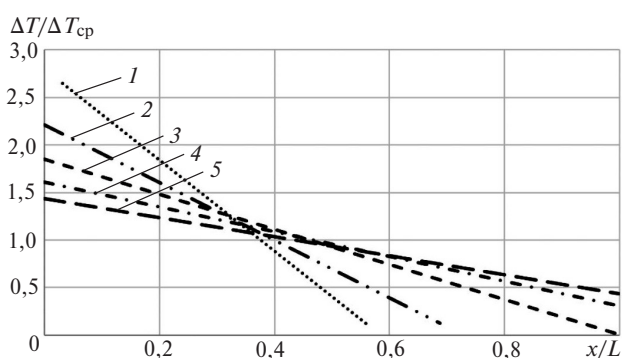


Рис. 14. Относительное изменение температуры по длине генератора озона при различном напряжении на электродах: 1 – 8 кВ; 2 – 10 кВ; 3 – 13 кВ; 4 – 16,5 кВ; 5 – 20 кВ

Видно, что увеличение питающего напряжения приводит к выравниванию распределений относительно средних значений. Однако увеличение напряжения приводит и к росту абсолютного значения плотности мощности (7), а следовательно, и к подъему температуры в разрядном промежутке, поэтому завышение напряжения может способствовать нивелированию влияния неравномерности зазора только при весьма эффективно организованном теплоотводе. Также повышенное напряжение влияет на исполнение используемого оборудования

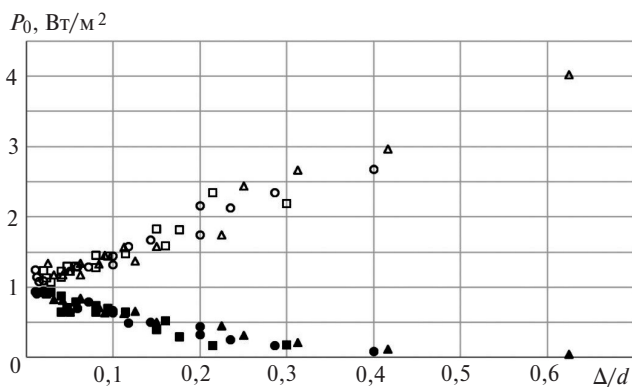


Рис. 15. Предельные значения плотности мощности на краях электродной системы с неоднородным зазором: □■ – керамика 0,63 мм; ○● – стекло 5,1 мм; △▲ – эмаль 0,9 мм; □○△ – максимальные значения; ■●▲ – минимальные

с точки зрения соблюдения требований по электрической прочности.

Большинство используемого на сегодняшний день озонаторного оборудования на основе объемного барьерного разряда работает при плотностях мощности порядка 1 Вт/см² чаще всего при двустороннем охлаждении разрядной области [1]. На рис. 15 представлены результаты моделирования режимов работы генераторов озона при средней плотности мощности 1 Вт/см² со стеклянным, керамическим и эмалевым барьерами при среднем зазоре d от 0,4 до 1 мм и отклонении от среднего значения Δ от 0,01 до 0,2 мм.

Видно, что уже при отклонении на 10–15% от среднего значения зазора наблюдается двукратная разница в плотности мощности.

Помимо очевидной рекомендации стараться при создании реальных разрядных аппаратов минимизировать перекося газового зазора можно порекомендовать увеличить рабочее давление в разрядной области. Увеличение давления приведет к росту относительной плотности газа δ , а следовательно, и к росту начального напряжения, при этом зависимости рис. 15 сохранятся. Однако увеличение давления в разрядном промежутке до определенных значений крайне положительно влияет на энергетический выход озона [15], что может также нивелировать влияние перекося зазора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лунин В.В., Самойлович В.Г., Ткаченко С.Н., Ткаченко И.С. Теория и практика получения и применения озона. М.: Изд-во МГУ, 2016, 416 с.
2. Смородин А.И., Сторчай Е.И. Генератор озона нового поколения. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017, 111 с.
3. Чепурнов А.В., Паолини Б. Совершенствование технологии синтеза озона. – Материалы 32-го Всероссийского семинара «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии». М.: МГУ, 2012.
4. Лунин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н. Физическая химия озона. М.: Изд-во МГУ, 1998, 480 с.
5. Темников А.Г. и др. Электрофизические основы техники высоких напряжений: Учебник для вузов. М.: Изд-во МЭИ, 2018.
6. Paschen F. Ueber die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure bei verschiedenen Drucken erforderliche Potentialdifferenz. – Annalen der Physik und Chemie magazine, 1889, Bd. 273, No. 5, pp. 69–96.
7. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. М.: Изд-во МГУ, 1989, 176 с.
8. Гибалов В.И., Питч Г. Численное моделирование формирования и развития канала микрозаряда. – Журнал физической химии, 1994, т. 68, No. 65, с. 931–938.
9. Гибалов В.И., Питч Г. Выделение энергии в канале микрозаряда. – Журнал физической химии, 1994, т. 68, № 6, с. 1130–1135.
10. Гибалов В.И. О физической природе барьерного разряда. – Журнал физической химии, 1994, т. 68, № 5, с. 926–930.

11. Manley T.C. The electric characteristics of the ozonator discharge. *Trans. Electrochem. Soc.* 84, 1943, pp. 83–96.

12. Лысов Н.Ю. О вольт-кулонной характеристике генератора озона. – Материалы 31-го Всероссийского семинара «Озон и другие экологически чистые окислители. Наука и технологии». М.: МГУ, 2010.

13. ГОСТ 22372-77. Методы определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне частот от 100 до 5·10⁶ Гц.

14. ГОСТ 1516.2-97. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции.

15. Kitayama J., Yagi T., Ishida T., Gotoh S., Esaki N., Ozawa T. Effects of discharge gap width and gas pressure on ozone generation characteristics of an air-fed ozonator. – *Proc. of 13th Ozone World Congress*. Kyoto, Japan, 1997, vol. 2, pp. 791–796.

[31.01.2020]

А в т о р ы: Лысов Николай Юрьевич – старший преподаватель кафедры «Техника и электрофизика высоких напряжений» (ТЭВН) Национального исследова-

тельского университета «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»).

Орлов Александр Васильевич – кандидат техн. наук, доцент кафедры ТЭВН НИУ «МЭИ», диссертацию защитил в 1991 г.

Темников Александр Георгиевич – кандидат техн. наук, доцент кафедры ТЭВН НИУ «МЭИ», диссертацию защитил в 1994 г.

Черненко Леонид Леонтьевич – кандидат техн. наук, доцент кафедры ТЭВН «МЭИ», диссертацию защитил в 2011 г.

Кившар Татьяна Константиновна – младший научный сотрудник кафедры ТЭВН НИУ «МЭИ».

Воеводин Вадим Вадимович – научный сотрудник кафедры ТЭВН НИУ «МЭИ».

Соколова Марина Владимировна – кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник кафедры ТЭВН НИУ «МЭИ».

Electrichestvo, 2020, No. 4, pp. 25–34

DOI:10.24160/0013-5380-2020-4-25-34

Estimating the Effect of Gas Gap Nonuniformity on the Volume Barrier Discharge Characteristics

LYSOV Nikolay Yu. (National Research University «Moscow Power Engineering Institute – NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Senior Lecturer of High Voltage Engineering and Electrical Physics Dept.

ORLOV Alexander V. (NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Associate Professor of High Voltage Engineering and Electrical Physics Dept., Cand. Sci. (Eng.)

TEMNIKOV Alexander G. (NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Associate Professor of High Voltage Engineering and Electrical Physics Dept., Cand. Sci. (Eng.)

CHERNETSKIY Leonid L. (NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Associate Professor of High Voltage Engineering and Electrical Physics Dept., Cand. Sci. (Eng.)

KIVSHAR Tat'yana K. (NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Junior Scientist of High Voltage Engineering and Electrical Physics Dept.

VOEVODIN VADIM V. (NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Scientist of High Voltage Engineering and Electrical Physics Dept.

SOKOLOVA Marina V. (NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Leading Scientist of High Voltage Engineering and Electrical Physics Dept., Cand. Sci. (Eng.)

The results from simulating the operation of ozone generators based on the volume barrier discharge principle with taking into account the nonuniformity of their geometrical parameters are presented. The effect the gas gap nonuniformity has on the barrier discharge power performance characteristics is evaluated. The results from calculating the power density distribution along an ozone generator with a monotonically varying gas gap size are presented. The power density distribution curves versus the gap width for different degrees to which the voltage exceeds its initial value are given for four types of ozone generators. New data on modeling the discharge processes in ozone generators with a nonuniform gap and on the influence of this nonuniformity on the discharge utilization efficiency are presented. The obtained results can be used in designing real ozonators, including large-capacity ones. Recommendations on selecting the optimal average gap size depending on the electrode manufacturing quality and on the gas gap setting up and adjustment accuracy are given.

Key words: volume barrier discharge, modeling, power density, ozone, coulomb-volt characteristic

REFERENCES

1. **Lunin V.V., Samoylovich V.G., Tkachenko S.N., Tkachenko I.S.** *Teoriya i praktika polucheniya i primeneniya ozona* (Theory and practice of obtaining and using ozone). Moscow, Publ. of Moscow State University, 2016, 416 p.
2. **Smorodin A.I., Storchay Ye.I.** *Generator ozona novogo pokoleniya* (New generation ozone generator). Moscow, Publ. of MSTU N.E. Bauman, 2017, 111 p.
3. **Chepurinov A.V., Paolini B.** *Sovershenstvovaniye tekhnologii sinteza ozona. – Materialy 32-go Vserossiyskogo seminar «Ozon i drugie ekologicheski chistyye okisliteli. Nauka i tekhnologii»* (Improving the technology of ozone synthesis. - Materials of the 32nd All-Russian seminar «Ozone and other environmentally friendly oxidizing agents. Science and technology»). Moscow, Publ. of Moscow State University, 2012.
4. **Lunin V.V., Popovich M.P., Tkachenko S.N.** *Fizicheskaya khimiya ozona* (Physical chemistry of ozone). Moscow, Publ. of Moscow State University, 1998, 480 p.
5. **Temnikov A.G. et al.** *Elektrofizicheskiye osnovy tekhniki vysokikh napryazheniy: Uchebnik dlya vuzov* (Physical chemistry of ozone). Moscow, Publ. of Moscow Power Engineering Institute, 2018.
6. **Paschen F.** Ueber die zum Funkenbergang in Luft, Wasserstoff und Kohlendure bei verschiedenen Drucken erforderliche Potentialdifferenz. – *Annalen der Physik und Chemie* magazine, 1889, Bd. 273, No. 5, pp. 69–96.
7. **Samoylovich V.G., Gibalov V.I., Kozlov K.V.** *Fizicheskaya khimiya bar'yernogo razryada* (Physical chemistry of a barrier discharge). Moscow, Publ. of Moscow State University, 1989, 176 p.
8. **Gibalov V.I., Pitch G.** *Zhurnal fizicheskoy khimii – in Russ. (Journal of Physical Chemistry)*, 1994, vol. 68, No. 65, pp. 931–938.
9. **Gibalov V.I., Pitch G.** *Zhurnal fizicheskoy khimii – in Russ. (Journal of Physical Chemistry)*, 1994, vol. 68, No. 6, pp. 1130–1135.
10. **Gibalov V.I.** *Zhurnal fizicheskoy khimii – in Russ. (Journal of Physical Chemistry)*, 1994, vol. 68, No. 5, pp. 926–930.
11. **Manley T.C.** The electric characteristics of the ozonator discharge. *Trans. Electrochem. Soc.* 84, 1943, pp. 83–96.
12. **Lysov N.Yu.** *O vol't-kulonnoy kharakteristike generatora ozona. – Materialy 31-go Vserossiyskogo seminar «Ozon i drugie ekologicheski chistyye okisliteli. Nauka i tekhnologii»* (About the volt-coulomb characteristic of the ozone generator. – Materials of the 31st All-Russian seminar «Ozone and other environmentally friendly oxidizing agents. Science and technology»). Moscow, Publ. of Moscow State University, 2010.
13. **GOST 22372-77.** *Metody opredeleniya dielektricheskoy pronitsayemosti i tangensa ugla dielektricheskikh poter' v diapazone chastot ot 100 do 5·10⁶ Gts* (GOST 22372-77. Methods for determining the dielectric constant and the dielectric loss tangent in the frequency range from 100 to 5·10⁶ Hz).
14. **GOST 1516.2-97.** *Elektrooborudovaniye i elektroustanovki peremennogo toka na napryazheniye 3 kV i vyshе. Obshchiye metody ispytaniy elektricheskoy prochnosti izolyatsii* (GOST 1516.2-97. Electrical equipment and electrical installations of alternating current for voltage of 3 kV and higher. General test methods for dielectric strength).
15. **Kitayama J., Yagi T., Ishida T., Gotoh S., Esaki N., Ozawa T.** Effects of discharge gap width and gas pressure on ozon generation characteristics of an air-fed ozon generator. – *Proc. of 13th Ozone World Congress*. Kyoto, Japan, 1997, vol. 2, pp. 791–796.

[31.01.2020]