

А.В.Блага¹, И.В.Божко², канд.техн.наук, В.А.Бржезицкий¹, докт.техн.наук

¹ – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина,

² – Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

Проведены исследования влияния озона, а также влажности и давления воздуха на ток и напряжение коронного разряда в межэлектродном промежутке «нить-цилиндр». Показано, что отрицательная корона по сравнению с положительной более чувствительна к изменению параметров газовой среды. Увеличение в воздухе парциальных давлений паров воды и озона приводит к увеличению напряжения горения разряда и снижению разрядного тока. Чувствительность тока и напряжения отрицательной короны к изменению парциального давления примеси озона на порядок выше, чем при аналогичном изменении примеси паров воды. Библ. 9, рис. 5.

Ключевые слова: коронный разряд, ток, напряжение, воздух, озон, влажность, давление

Коронный разряд (КР) в воздухе атмосферного давления имеет широкое практическое применение. Он используется для очистки газов, получения озона, обработки поверхности твердых материалов и в других целях. Свойства и технологические возможности КР в значительной степени изучены [7,8]. Вместе с тем при функционировании устройств с КР в их рабочем объеме может накапливаться озон, который способен существенно влиять как на характеристики разряда, так и на работу устройства в целом. В [5,9] показано, что присутствие озона в воздухе с концентрациями $C > 0,1$ мг/л приводит к заметному снижению разрядного тока и повышению напряжения горения КР, а также вынуждает снижать предельно допустимый рабочий ток устройства из-за опасности пробоя разрядного промежутка. Однако целенаправленного изучения влияния на параметры КР озона, подаваемого извне в межэлектродный промежуток, не проводилось [7,8]. Такие исследования могли бы быть полезны для расширения области знаний по физике газового разряда, а также для практического применения, например, при разработке электроразрядных устройств для измерения концентрации озона в газах [4] и других параметров газовой среды (влажность, давление, состав) [3]. Следует учитывать, что поскольку свойства КР существенным образом зависят от давления и влажности воздуха, изучение влияния озона необходимо вести с учетом этих параметров. В связи с изложенным целью данной работы является исследование влияния озона на характеристики КР в атмосферном воздухе в зависимости от его давления и влажности.

Экспериментальная установка. Общая схема экспериментальных исследований показана на рис. 1. Для прокачки воздуха использовался мембранный компрессор К. Расход воздуха измерялся ротаметром Р. Для уменьшения влажности атмосферного воздуха применялся силикагелевый осушитель О. Для увеличения влажности воздух проходил через увлажнитель У (сосуд Дрекселя, наполненный водой). Относительная влажность воздуха определялась гигрометром Г (по психометрической таблице, исходя из разности температур сухого и влажного термометров). Примесь озона в воздухе обеспечивалась за счет прохождения воздуха через генератор озона ГО. Озоно-воздушная смесь поступала в разрядную камеру РК, на выходе которой стоял вентиль В, с помощью которого регулировалось давление газа в РК. Атмосферное давление измерялось барометром, избыточное давление в РК – манометром М. Концентрация озона в воздухе, покидающего РК, определялась измерителем концентрации ИК по абсорбции ультрафиолетового излучения на длине волны 254,7 нм.

Исследования КР проводились в разрядной камере с геометрией электродов «нить-цилиндр» (рис. 1). В качестве оболочки разрядной камеры служила труба 1 из нержавеющей стали с внутренним диаметром 22,7 мм. На оси трубы располагалась нихромовая проволока 7 диаметром 0,25 или 0,8 мм. Проволоку в натянутом состоянии поддерживала пружина. Эбонитовые цилиндры 4 и алундовые трубки 5 способствовали центровке проволоки в трубе и выполняли роль диэлектрических барьеров, препятствующих развитию пробоя с проволоки на трубу по внутренним поверхностям плексигласовых фланцев 2. Изменяя длину трубок 5, можно было изменять активную длину проволоки, с которой осуществлялся коронный разряд на

внутреннюю стенку трубы 1. Один из штуцеров 3 служил для ввода, другой – для вывода газа из камеры.

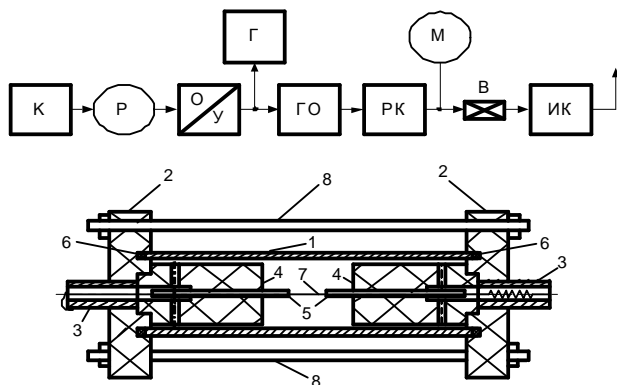


Рис. 1

Прокладки 6 из силиконовой резины способствовали герметизации камеры, шпильки 8 – прижатию фланцев 2 к трубе 1. Исследования КР осуществлялись на постоянном напряжении. Ток и напряжение КР измерялись, соответственно, с помощью токового шунта и высоковольтного делителя напряжения. Вольтамперные характеристики (ВАХ) разряда записывались двуканальным цифровым осциллографом TDS 1012.

Результаты исследований. При подаче на разрядную камеру высокого напряжения в ней начинал накапливаться «собственный» озон и повышалась температура. Чтобы уменьшить влияние этих факторов на результаты исследований, все эксперименты проводились при достаточно большом расходе воздуха через разрядную камеру $Q=5$ л/мин и достаточно малой активной длине коронирующей проволоки $l_a=20$ мм. При этих условиях концентрация генерируемого в разрядной камере озона не превышала 0,1 мг/л, а максимальное повышение температуры газа в камере составляло 2...3 К.

Влияние озона на параметры коронного разряда зависит от полярности коронирующей нити.

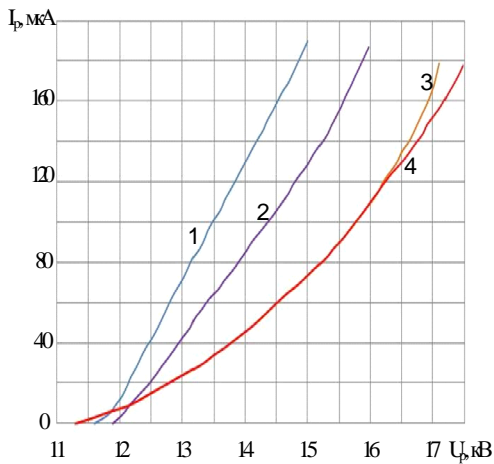


Рис. 2

Это видно из рис. 2, на котором показаны ВАХ отрицательной (кривые 1, 2) и положительной (кривые 3, 4) короны с диаметром нити $d_n=0,8$ мм при концентрации озона в поступающем в камеру воздухе $C=0$ (кривые 1, 3) и $C=2,4$ мг/л (кривые 2, 4), давлении $p=775$ торр, температуры 291 К, относительной влажности воздуха $H=70\%$. Присутствие озона в воздухе существенно изменяет параметры отрицательной короны: повышает напряжение горения разряда U_p и снижает ток разряда I_p . Из сравнения кривых 1 и 2 видно, что этот эффект усиливается с ростом напряжения на разрядной камере. При максимальном начальном (без озона) напряжении $U_p=15$ кВ введение озона в газ приводит к увеличению U_p до 16 кВ (при одном и том же токе $I_p=185$ мкА). Если же поддерживать одно и то же напряжение $U_p=15$ кВ, то присутствие озона в воздухе вызывает снижение I_p с 185 до 125 мкА. Для положительной короны (кривые 3, 4) влия-

ние озона начинает проявляться лишь при больших токах I_p и оно заметно слабее, чем для отрицательной (кривые 1, 2).

Степень влияния озона на параметры КР зависит также от величины диаметра проволоки d_n . Уменьшение d_n в пределах 0,8...0,25 мм приводит к усилению (примерно на 30%) эффекта влияния озона на параметры отрицательного КР и делает его еще менее (чем при $d_n = 0,8$ мм) заметным для положительного КР.

Увеличение содержания озона в РК сказывается на параметрах отрицательного КР по-разному. Это иллюстрирует рис. 3, на котором показана зависимость $U_p(C)$, полученная для отрицательного КР при условиях: $I_p=100$ мкА, $p=775$ торр, $H=70\%$, $T=291$ К, $d_n=0,25$ мм. Из рисунка видно, что эта зависимость с ростом концентрации C имеет уменьшающуюся крутизну dU_p/dC , которая характеризует чувствительность КР (по напряжению U_p) к изменению концентрации озона в воздухе. Средние чувствительности $\Delta U_p/\Delta C$ в диапазонах 0...0,3; 0,3...1,0 и 1...2,4 мг/л, соответственно, равны 3000; 1100 и 200 В·л/мг. Из этого следует, что наибольшая чувствительность КР к озону соответствует малым концентрациям C . Подобным образом происходит изменение чувствительности КР по току $\Delta I_p/\Delta C$: с ростом концентрации озона 0...2,7 мг/л она уменьшается от 150 до 10 мкА·л/мг.

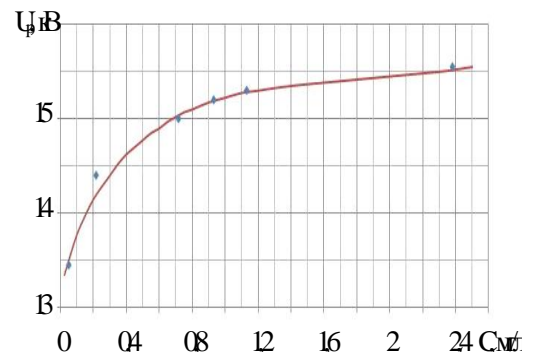


Рис. 3

Влияние давления газа p на характеристики КР в общем известны [7,8]. Повышение давления p приводит к росту напряжения начала коронирования $U_{нк}$, а также напряжения горения разряда U_p , необходимого для получения одинакового тока I_p до и после повышения давления. Для экспериментальных условий данной работы этот эффект от изменения давления воздуха отображает рис. 4. На нем показаны ВАХ, полученные при $p=770$ торр (кривые 1,3) и $p=838$ торр (кривые 2,4) при отсутствии (кривые 1,2) и наличии озона $C=2,05$ мг/л (кривые 3,4) в воздухе, поступающем в РК ($H=65\%$, $T=291$ К).

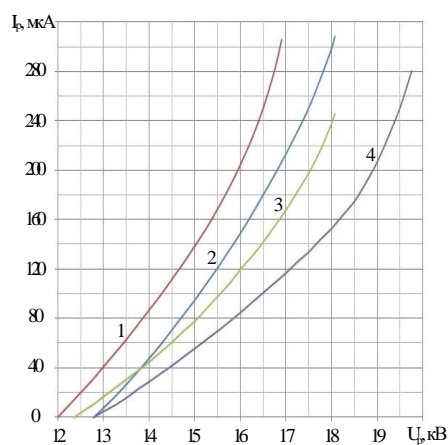


Рис. 4

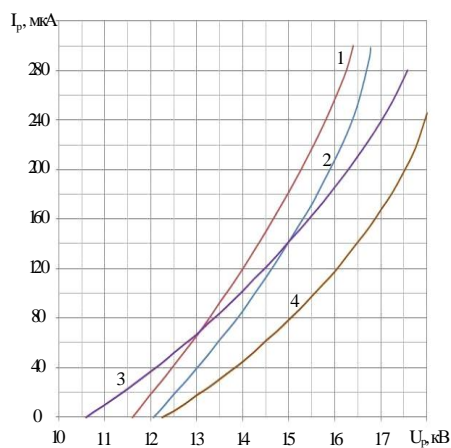


Рис. 5

Из зависимостей видно, что влияние озона на напряжение U_p с ростом давления несколько увеличивается. Так при $I_p=100$ мкА для $p=770$ торр увеличение U_p за счет озона $\Delta U_p \approx 1,3$ кВ, а для $p=838$ торр $\Delta U_p \approx 1,4$ кВ. Влияние озона при большем давлении воздуха становится более заметным при больших токах I_p : при $I_p=200$ мкА значение ΔU_p увеличивается до 1,5 кВ и 2 кВ, соответственно, при $p=770$ и 838 торр.

Значения максимальных разрядных токов $I_{рм}$, при которых КР в воздухе (кривые 1,2) переходит в искровой разряд (пробой) составляет 300...350 мкА (на рис. 4 не показаны) и слабо зависят от давления p . Однако в присутствии в воздухе озона эти величины снижаются до $I_{рм} \approx 240$ мкА (кривая 3) и $I_{рм} \approx 280$ мкА (кривая 4) для $p=770$ и 838 торр соответственно.

Влияние влажности воздуха на свойства КР менее изучено, чем влияние давления, и оно более сложно из-за многообразия плазмохимических реакций, протекающих при наличии в воздухе паров воды [7,8]. На рис. 5 показаны ВАХ, записанные при относительной влажности $H=35\%$ (кривые 1,3) и $H=65\%$ (кривые 2,4) при отсутствии (кривые 1,2) и наличии озона $C=2,1$ мг/л (кривые 3,4) в поступающем в РК воздухе ($p=776$ торр, $T=291$ К). Из сравнения зависимостей 1 и 2 видно, что увеличение влажности воздуха подобно увеличению давления p приводит к росту величин $U_{нк}$ и U_p на ≈ 700 В (при одном и том же токе I_p) и снижению тока I_p на ≈ 40 мкА (при одном и том же напряжении U_p). Однако присутствие озона в более сухом воздухе ($H=35\%$) изменяет характеристики КР другим образом, отличающимся от обычных при $H \geq 65\%$ увеличения напряжений $U_{нк}$, U_p и снижения тока I_p . За счет озона для сухого воздуха напряжение $U_{нк}$ снижается на $\approx 1,8$ кВ, а напряжение U_p при разрядных токах $I_p \leq 70$ мкА меньше напряжения горения разряда в воздухе без озона (рис. 5, кривые 1,3 соответственно). Лишь при токах $I_p \geq 70$ мкА озон, как обычно, приводит к тому, что напряжение U_p становится большим, чем при его отсутствии.

Увеличение влажности воздуха в исследуемом диапазоне $H=35...70\%$ снижает величину $I_{рм}$ в пределах 320...300 мкА ($\sim 7\%$), (максимальные токи на кривых 1,2, рис. 5, не показаны). Для этих условий снижение $I_{рм}$ за счет озона больше и составляет около 20%.

Обсуждение результатов экспериментальных исследований. Для удобства сравнения влияния различных компонентов газовой смеси на характеристики КР их количественное содержание можно характеризовать парциальными давлениями воздуха p_v , паров воды p_{H_2O} и озона p_{O_3} . Изменения напряжений ΔU_p и токов ΔI_p отрицательного КР с изменениями парциальных давлений воздуха Δp_v , паров воды p_{H_2O} и Δp_{O_3} озона представлены в таблице. При создании таблицы за начальные условия принимались $p_v=770$ торр, $p_{H_2O}=10$ торр ($H=65\%$, $T=291$ К), $p_{O_3}=0$, $I_p=200$ мкА, $U_p=16$ кВ.

Чувствительность параметров КР к присутствию озона определялась в диапазоне изменения концентрации $C=0...1$ мг/л ($\Delta p_{O_3}=0,35$ торр). Из таблицы видно, что чувствительности параметров КР к изменению парциальных давлений воздуха, паров воды и озона являются разными. Наибольшая чувствительность параметров КР к присутствию озона в воздухе. Она на два порядка выше, чем их чувствительность к изменению давления воздуха. Влияние влажности, хоть и меньше чем озона, также боль-

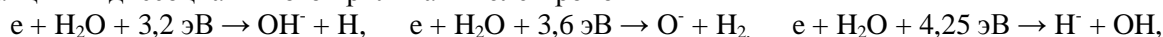
шое, так как чувствительность к влажности на порядок выше чувствительности к изменению давления воздуха.

По парциальному давлению воздуха		По парциальному давлению паров воды		По парциальному давлению озона	
$\Delta U_p / \Delta p_B$ В/торр	$\Delta I_p / \Delta p_B$, мкА/торр	$\Delta U_p / \Delta p_{H_2O}$, В/торр	$\Delta I_p / \Delta p_{H_2O}$, мкА/торр	$\Delta U_p / \Delta p_{O_3}$, В/торр	$\Delta I_p / \Delta p_{O_3}$, мкА/торр
12	0,7	150	8	4600	260

Как видно из изложенного, присутствие в атмосферном воздухе озона и паров воды даже в малых количествах приводит к заметным изменениям параметров коронного разряда. Существующие объяснения [7,8,9] причин, вызывающих эти изменения, неоднозначны и исследования влияния этих примесей на разряд продолжаются. Общим выводом этих исследований является то, что определяющее влияние на свойства разряда в электроотрицательных газах оказывает кинетика образования и разрушения отрицательных ионов, в особенности O_3^- , H_2O^- , OH^- , O^- и H^- . Их появление обусловлено, в основном, реакциями



и реакциями диссоциативного прилипания электронов



которые сопряжены с немалыми затратами энергии [6]. Эти реакции включают дополнительный канал потерь свободных электронов и энергии на диссоциацию H_2O и объясняют, в частности, увеличение напряжения U_p при росте содержания озона и паров воды в воздухе.

При наличии озона в газе дополнительно появляются ионы O_3^- , у которых энергия сродства к электрону $E_c=2,1$ эВ значительно выше, чем для отрицательных ионов H_2O^- (0,9 эВ), O^- (1,47 эВ) и OH^- (1,83 эВ) [6], образование которых обусловлено присутствием в воздухе паров воды. Помимо этого следует учитывать, что из-за того, что прилипание электрона к озону не требует подобно реакциям (3–5) затрат энергии, концентрация ионов O_3^- может превышать концентрации других отрицательных ионов. Надо полагать, что именно по этим причинам (устойчивость к разрушению в электрическом поле ионов O_3^- и их повышенная концентрация) влияние озона на крутизну нарастания напряжения коронного разряда $\Delta U_p / \Delta C$ более чем на порядок выше влияния паров воды на величину $\Delta U_p / \Delta H$.

В предпробивном режиме коронный разряд, протекающий в газовой среде, содержащей отрицательные ионы, характерен еще и тем, что основная часть электронов (до 90%) рождается в процессах отлипания, а не ионизации [1,2]. Наиболее интенсивно разрушение отрицательных ионов происходит в областях сильного электрического поля, вблизи нити и головок стримеров. Освободившиеся после разрушения отрицательных ионов электроны дают начало новым электронным лавинам. С возрастанием концентрации паров воды и озона интенсивность этого процесса в предпробивном режиме увеличивается, что облегчает появление мощных стримеров, вызывающих искровое перекрытие межэлектродного промежутка. Это, в конечном счете, приводит к экспериментально наблюдаемому уменьшению максимального тока короны I_{pm} .

Какой из механизмов является определяющим для кинетики плазмохимических реакций в КР, до конца не ясен [1,2,7–9], это является предметом дальнейших исследований.

Следует также отметить, что оценочные исследования влияния озона на характеристики отрицательного КР, выполненные с разрядным промежутком «игла-плоскость», показали большую чувствительность параметров такого КР к озону (примерно на 30%), чем для описанного здесь случая «нить-цилиндр». Однако не вполне удовлетворительная воспроизводимость результатов для электродной системы «игла-плоскость» не позволила ее использовать при исследованиях в качестве основной.

Таким образом, проведенные исследования показали, что характеристики отрицательного коронного разряда в воздухе атмосферного давления существенным образом зависят от содержания в нем паров воды и озона. В диапазоне парциальных давлений паров воды в воздухе $p_{H_2O}=6...12$ торр ($H=35...70\%$) средние чувствительности параметров разряда к содержанию паров p_{H_2O} составляют по напряжению $\Delta U_p / \Delta p_{H_2O} \approx 150$ В/торр, по току $-\Delta I_p / \Delta p_{H_2O} \approx 8$ мкА/торр. По озону при $p_{O_3} = 0...0,35$ торр эти чувствительности более чем на порядок выше: $\Delta U_p / \Delta p_{O_3} \approx 4600$ В/торр, $\Delta I_p / \Delta p_{O_3} \approx 260$ мкА/торр.

1. Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Кочетов И.В. и др. О переходе многостримерной отрицательной короны в атмосферном воздухе в режим тлеющего разряда // Физика плазмы. – 2000. – Т. 26. – № 2. – С. 172–178.
2. Акишев Ю.С., Дерюгин А.А., Каральник В.Б. Экспериментальное исследование и численное моделирование тлеющего разряда постоянного тока атмосферного давления // Физика плазмы. – 1994. – Т. 20. – № 6. – С. 571–584.
3. Бахтаев Ш.А. Коронный разряд на микропроводах. – Алма-Ата: Наука, 1984. – 208 с.
4. Бикенин И.Х. Методы измерения концентрации озона. – В кн.: Науч. тр. Академии коммунального хозяйства им. Памфилова, вып. 22. Водоснабжение. – 1963. – № 3. – С. 132–145.
5. Божко И.В., Аристов Ю.В., Белинский В.В. Влияние влажности и движения воздуха на свойства положительной короны // Технічна електродинаміка. – 2007. – № 6. – С. 3–8.
6. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 592 с.
7. Becker K.H., Kogelschatz U., Schoenbach K.H., Barker R.I. Non-Equilibrium Air Plasmas at Atmospheric Pressure. – Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, 2005. – 682 p.
8. Fridman A. Plasma Chemistry. – Cambridge university press, 2008. – 1022 p.
9. Ryo Ono, Tetsuji Oda. Dynamis of ozone and OH radicals generated by pulsed corona discharge in humid-air flow reactor measured by laser spectroscopy // Journal of Applied Physics. – 2003. – Vol. 93. – № 10. – Pp. 5876–5882.

УДК 537.523.3

ПРО ВПЛИВ ОЗОНУ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КОРОННОГО РОЗРЯДУ В ПОВІТРІ

О.В.Блага¹, І.В.Божко², канд.техн.наук, В.О.Бржезицкий¹, докт.техн.наук,

¹ – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна,

² – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

Виконао дослідження впливу озону, а також вологості та тиску повітря на струм та напругу коронного розряду в міжелектродному проміжку «нитка-циліндр». Показано, що від'ємна корона в порівнянні з позитивною більш чутлива до змін параметрів середовища. Збільшення в повітрі парціальних тисків водяного пару та озону веде до збільшення напруги горіння розряду і зниженню розрядного струму. Чутливість струму та напруги від'ємної корони до змін парціального тиску домішки озону на порядок більші, ніж по водяному пару. Бібл. 9, рис. 5.

Ключові слова: коронний розряд, струм, напруга, повітря, озон, вологість, тиск.

THE INFLUENCE OF OZONE ON CHARACTERISTICS OF CORONA DISCHARGE IN AIR

A.V.Blaga¹, I.V.Bozhko², V.A.Brzhezitskyi¹,

¹ – National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”,
Peremogy ave., 37, Kyiv 56, 03056, Ukraine,

² – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy ave., 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

The influence of the ozone as well as the humidity and air pressure on the current and voltage corona discharge in gap "wire-cylinder" is studying. It is shown that negative corona discharge compared with positive is more sensitive to changing parameters of the gas environment. Increasing partial pressures of water vapor and ozone in the air makes more voltage and lower current of corona discharge. The sensitivity of current and voltage negative corona with respect to the partial pressure of ozone is above 10 time more than one of water. References 9, figures 5.

Key words: corona discharge, current, voltage, air, pressure, ozone, humidity.

1. Akishev Ju.S., Grushin M.E., Kochetov I.V. About a transition the numerous streamers negative corona in atmospheric air glow discharge mode // Fizika plazmy. – 2000. – Vol. 26. – № 2. – Pp.172–178. (Rus)

2. Akishev Ju.S., Deriugin A.A., Karalnik V.B. Experimental study and numerical simulation of atmospheric DC glow discharge atmospheric pressure // Fizika plazmy. – 1994. – Vol. 20. – № 6. – Pp. 571–584. (Rus)

3. Bakhtaev Sh.A. Corona discharge at mikrowires. Almaty: Nauka, 1984. – 208 p. (Rus)

4. Bikenin I.Kh. Methods of measuring ozone concentrations// Nauchnye trudy Akademii kommunalnogo khoziaistva im. Pamfilova. – 1963. –Vol. 22. Vodostabzhenie. – № 3. – Pp. 132–145. (Rus)

5. Bozhko I.V., Aristov Ju.V., Belinskii V.V. Influence of humidity and movement of air on the properties of positive corona // Tekhnichna elektrodynamika. – 2007. – № 6. –Pp. 3–8. (Rus)

6. Raiser Ju.P. Physics of gas discharge. – Moskva: Nauka, 1987. – 592 p.(Rus)

7. Fridman A. Plasma Chemistry. – Cambridge university press, 2008. – 1022 p.

8. Becker K.H., Kogelschatz U., Schoenbach K.H., Barker R.I. Non-Equilibrium Air Plasmas at Atmospheric Pressure. – Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, 2005. – 682 p.

9. Ryo Ono, Tetsuji Oda. Dynamis of ozone and OH radicals generated by pulsed corona discharge in humid-air flow reactor measured by laser spectroscopy // Journal of Applied Physics. – 2003. – Vol. 93. – № 10. – Pp. 5876–5882.

Надійшла 02.12.2011

Received 02.12.2011