

УДК 537.523.3

И.В.Божко, канд.техн.наук, Ю.В.Аристов, В.В.Белінський (Ин-т электродинамики НАН Украины, Киев)

Влияние влажности и движения воздуха на свойства положительной короны

Исследуется влияние влажности и скорости движения воздуха атмосферного давления на коронный разряд с многоигльчатого анода на плоскость. Установлено, что с уменьшением содержания паров воды от 11 до 0,1 мг/л в полтора раза увеличивается ток короны и энергетическая эффективность генерации озона. Дополнительно повышению ($\approx 20\%$) этих параметров способствует продувка турбулизованного потока воздуха вдоль оси разряда.

Досліджується вплив вологості та швидкості руху повітря атмосферного тиску на коронний розряд з багатогольчатого аноду на площину. Виявлено, що зі зменшенням вмісту парів води в повітрі від 11 до 0,1 мг/л в півтора рази збільшується струм корони та енергетична ефективність генерації озону. Додатковому підвищенню ($\approx 20\%$) цих параметрів сприяє продування турбулизованого потоку повітря вздовж осі розряду.

Коронный разряд в воздухе при атмосферном давлении имеет практическое применение для очистки газов [8, 13, 14, 16] и получения озона [7]. Он также используется для обработки поверхностей твердых материалов [15, 20] и в других целях [6]. Свойства и технологические возможности такого разряда во многом определяются типом электродной системы и параметрами газовой среды. Среди прочих к параметрам газовой среды относятся влажность, скорость и направление движения газа через разрядный промежуток. Увеличение содержания паров воды в воздухе приводит к значительному росту удельных энергозатрат на получение озона в положительном коронном разряде [7]. Движение воздуха и направление его продувки через разрядный промежуток способны заметно влиять на параметры коронного разряда [12, 21] и характеристики электрофильтров даже при сравнительно малых скоростях ($\approx 0,1$ м/с) [8]. При увеличении скорости поперечной продувки воздуха до 50...100 м/с через промежуток "игла—плоскость" режим отрицательной короны сменяется устойчивым объемным разрядом типа тлеющего. Такой разряд может быть эффективным средством очистки отходящих промышленных газов [3], а также обработки поверхности твердых материалов [15]. Однако влияние осевого движения газа на разряд, особенно при больших скоростях (> 10 м/с) изучено мало. Можно ожидать, что по аналогии с поперечной продувкой газа продольная будет способствовать улучшению параметров коронного разряда.

Данная работа посвящена изучению влияния

влажности, скорости и направления движения воздуха на характеристики положительной короны. Исследования проводились на электродной системе нового типа, представляющей собой плоский катод и анод в виде плоского диска, на котором распределены коронирующие иглы [4, 5].

Экспериментальная установка. Эксперименты проводились в разрядной камере, рис. 1.

Катод 1 и анод 2 изготовлены из нержавеющей стали и имеют, соответственно, диаметры 82 и 50 мм. Катод закреплен на подставке 3 из алюминиевого сплава. Подставка снаружи обдувалась вентилятором. К аноду приварены коронирующие иглы 5, которые установлены по центрам отверстий 4. Иглами служили платинородиевые полоски с поперечным сечением $0,06 \times 0,3$ мм². Электроды размещены в цилиндрическом корпусе 6 из нержавеющей стали. Сверху камера закрыта крышкой 7 из плоского плексигласа. Для наблюдений и спектральных исследований излучения разряда камера снабжена двумя окнами из кварцевого стекла 8. Подача газа в камеру осуществляется через патрубок 9. Вывод газа происходит через патрубок 10, в который он поступает из камеры по каналу 11. Для изучения влияния движения газа на разряд использовались два режима продувки воздуха через межэлектродный промежуток. При первом режиме воздух в камеру поступал через отверстия 12 в патрубке, внизу которого устанавливалась фторопластовая пробка 14. При втором режиме эта пробка удалялась, и отверстия 12 перекрывались перемещением отрезка трубки 13 из силиконовой резины,

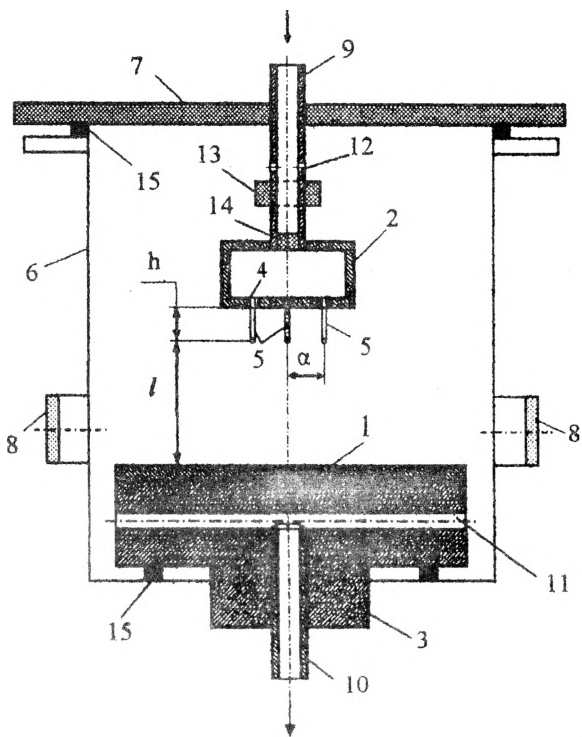


Рис. 1

плотно охватывающей нагубок. В результате этого воздух в разрядный промежуток понадал через отверстия 4, играющие роль цилиндрических сопел, а каждая коронирующая игла обдувалась индивидуальной струей газа. Герметизация камеры осуществлялась с помощью прокладок 15 из силиконовой резины.

Для прокачки газа использовался мембранный компрессор. Расходы газа измерялись ротаметрами. Давление газа в камере составляло 750...770 мм рт.ст. Влага из воздуха удалялась за счет его прохождения через силикагелевый осушитель. Абсолютная влажность воздуха определялась по точке росы специально разработанным устройством. Концентрация озона в воздухе, покидающем разрядную камеру, измерялась по абсорбции ультрафиолетового излучения на длинах волн 254,7 и 275,1 нм. Более подробно экспериментальная установка описана в [5].

Результаты исследования. Влияние влажности воздуха на свойства разряда отображаются (рис. 2) вольтамперными характеристиками разряда (кривые 2, 4) и изменением концентрации озона в газе C (кривые 1, 3) во влажном (кривые 1, 2) и осушенном (кривые 3, 4) воздухе. Этим зависимостям соответствуют следующие условия: межэлектродное расстояние $l = 14$ мм, высота игловок $h = 7$ мм, расстояние между ними $a = 7$ мм (рис. 1), число игловок $N = 15$, расход воздуха $Q = 10$ л/мин, продувка через сопла диаметром $d_c = 1$ мм, содержание паров воды во влажном воздухе $H = 11$ мг/л, в осушенном $H = 0,1$ мг/л. Из рисунка видно, что характеристики разряда в сухом и влажном воздухе существенно отличаются. Присутствие паров воды в воз-

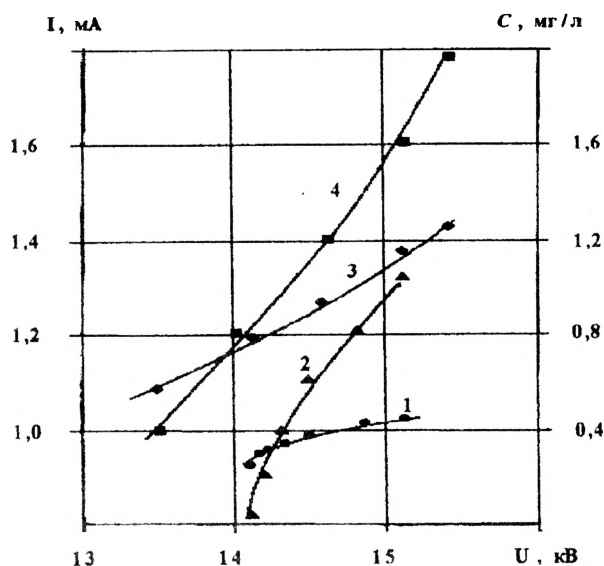


Рис. 2

духе уменьшает почти в полтора раза максимальный ток короны и втрое — максимальную концентрацию вырабатываемого разрядом озона.

Увеличение влажности воздуха также приводит к нарастанию напряжения горения коронного разряда U_p и удельных энергозатрат W на генерацию озона, рис. 3. (Кривые U_p и W в функции H получены при токе разряда $I_p = 0,2$ мА, $N = 3$, $Q = 5$ л/мин, $l = 15$ мм, $h = 7$ мм, $a = 7$ мм, $d_c = 1$ мм). Увеличение значений U_p особенно заметно при изменении влажности в диапазоне 1...10 мг/л, в котором крутизна нарастания $\Delta U_p / \Delta H \approx 80$ В·л/мг. Для сравнения следует отметить, что, как показали описываемые исследования, влияние озона на напряжение горения коронного разряда в осушенном воздухе ($H = 0,1$ мг/л) намного сильнее, чем влаги, так как $\Delta U_p / \Delta C \approx 1400$ В·л/мг. Кривая W на рис. 3 свидетельствует о том, что с увеличением H от 0,1 до 11 мг/л значения W монотонно возрастают с 27 до 48 кВт·ч/кг, т.е. почти в 1,8 раза.

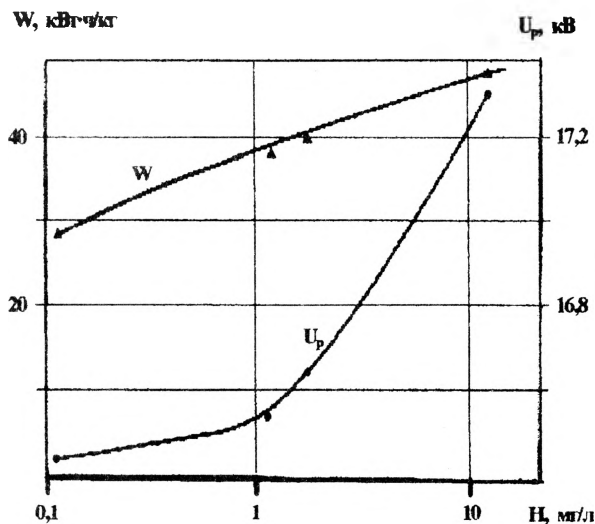
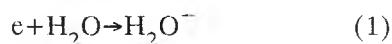
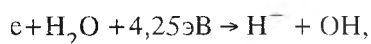
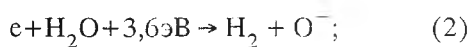
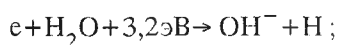


Рис. 3

Как видно из изложенного, присутствие в атмосферном воздухе паров воды и озона даже в весьма малых количествах ($< < 1\%$) приводит к изменению параметров коронного разряда. Существующие объяснения [3, 11, 17, 18] причин, вызывающих эти изменения, неоднозначны и исследования таких примесей на разряд продолжаются [18]. Общим выводом таких исследований является то, что определяющее влияние на свойства разряда в электроотрицательных газах оказывает кинетика образования и разрушения отрицательных ионов, в особенности H_2O^- , OH^- , O^- , H^- . Их появление в основном обусловлено реакцией



и реакциями диссоциативного прилипания электронов



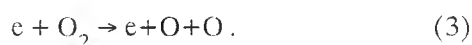
которые сопряжены с немалыми затратами энергии [10]. Эти реакции включают дополнительный канал потерь свободных электронов и энергии на диссоциацию H_2O и объясняют, в частности, увеличение напряжения U_p при росте содержания паров воды в воздухе.

При генерировании разрядом озона в газе дополнительно появляются ионы O_3^- , у которых энергия сродства к электрону $E_c = 2,1\text{эВ}$ значительно выше, чем для отрицательных ионов H_2O^- (0,9 эВ), O^- (1,47 эВ) и OH^- (1,83 эВ) [10], 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 (2) 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 $\Delta U_p / \Delta H$.

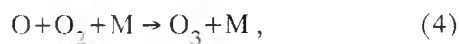
В предпробойном режиме коронный разряд, протекающий в газовой среде, содержащей отрицательные ионы, характерен еще и тем, что основная часть электронов (до 90%) рождается в процессах отлипания, а не ионизации [3]. Наиболее интенсивно разрушение отрицательных ионов происходит в областях сильного электрического поля, вблизи кончиков игл и головок стримеров. Освободившиеся электроны дают начало новым элек-

тронным лавинам. С возрастанием концентрации паров воды и озона интенсивность этого процесса увеличивается, что облегчает появление мощных стримеров, вызывающих искровой пробой промежутка. Это, в конечном счете, приводит к экспериментально наблюдаемому снижению максимального тока короны.

При объяснении влияния паров воды в воздухе на генерирование озона необходимо учитывать следующее. Согласно современным представлениям [9], генерирование озона при разряде в кислородсодержащем газе идет в два этапа. Вначале вследствие столкновения молекул O_2 с электронами, ускоренными электрическим полем, происходит диссоциация кислорода



В дальнейшем атом кислорода в результате тройного столкновения образует озон



где M — любая третья частица, например, молекула кислорода, озона, примеси. Снижение концентрации озона C и рост удельных энергозатрат W с увеличением содержания паров воды в воздухе связывается с двумя основными причинами:

— присутствием молекул H_2O , что за счет прилипания к ним электронов снижает скорость образования атомарного кислорода (3) и, соответственно, уменьшает выход озона по реакции (4);

— разложением получаемого озона при его взаимодействии с частицами H , OH , HO_2 , генерируемыми разрядом при наличии в газе паров воды.

Какой из этих механизмов является приоритетным, до конца не ясно. Например, авторы работы [18], исследовавшие положительную корону во влажном воздухе, делают вывод, что главной является первая причина.

Движение воздуха имеет существенное влияние на свойства разряда. Это следует из сравнения результатов экспериментов при двух способах продувки газа через разрядную камеру. На рис. 4 показаны зависимости величин максимального тока коронного разряда I_1 , а также концентрации озона C_1 и удельных затрат энергии на получение озона W_1 при токе I_1 от расхода Q осушенного воздуха ($H=0,1\text{ мг/л}$), продуваемого по первому способу (не через сопла). Эти зависимости получены при условиях $N=7$, $h=5\text{ мм}$, $a=7\text{ мм}$, $l=16,7\text{ мм}$. Из рисунка видно, что увеличение Q от 0,5 до 23 л/мин приводит к двукратному росту I_1 и почти трехкратному снижению W_1 . Хотя при этом концентрация озона падает с 2,3 до 0,5 мг/л, выход озона $M_1 = C_1 \cdot Q$ увеличивается в 5 раз.

Данные при втором способе продувки воздуха (через сопла) представлены в виде сопоставления с данными, полученными при первом способе. На

$I_1, 10 \text{ мкА};$
 $C_1, 0,1 \text{ мг/л};$
 $W_1, \text{ кВт·ч/кг};$
 $M_1, 10 \text{ мг/ч}$

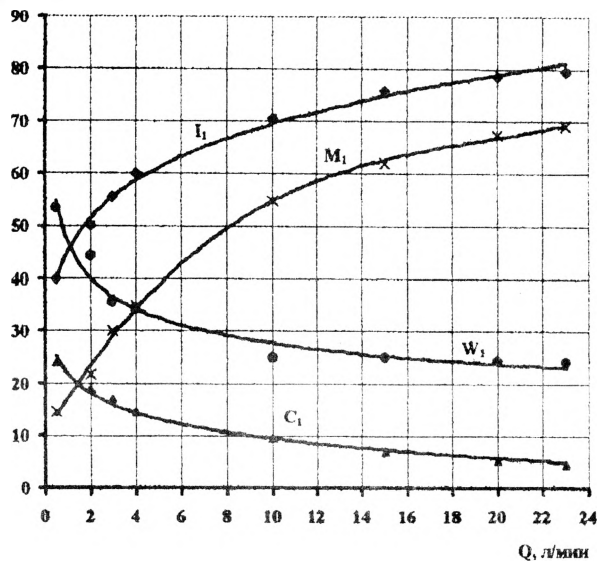


Рис. 4

рис. 5 показаны зависимости величин $I^* = I_2/I_1$, $C^* = C_2/C_1$, $W^* = W_2/W_1$ от расхода газа Q . Здесь I_2 , C_2 , W_2 — соответственно максимальный ток короны, концентрация озона и удельные затраты энергии на его генерацию при токе I_2 , полученные при втором способе продувки (и тех же значениях H, N, h, a , что и на рис. 4). Как следует из рис. 5, при увеличении расхода воздуха до ≈ 10 л/мин, параметры I, C, W не зависят от способа продувки. Однако с дальнейшим ростом расхода Q способ продувки начинает оказывать существенное влияние на разряд. При этом уже при $Q = 20$ л/мин максимальный ток разряда и концентрация озона возрастают соответственно на 20% и 40% и на 20% снижаются удельные затраты энергии, т.е. второй способ продувки воздуха оказывается предпочтительнее первого.

Существенное влияние движения газа на разряд при больших расходах Q можно объяснить следующим образом. Стримерный коронный разряд имеет пространственно-временную дискретность. Образование озона протекает в три стадии, каждая из которых имеет свое характерное время [9]. Вначале в локальной области промежутка игла-плоскость возникает и существует в течение ≈ 100 пс стримерный канал диаметром 0,1...1 мм. В канале происходит размножение и исчезновение электронов, диссоциация молекул кислорода (3) и другие быстрые реакции. На второй стадии по реакции (4) образуется озон. Этот процесс протекает в течение ≈ 10 мкс на месте бывшего стримерного канала. Концентрация озона в "стримерном следе" достигает 6...8 мг/л [19]. На завершающей стадии за счет диффузии озон "расширяется" в окружающее пространство и происходит выравнивание концентрации озона по объему. Характерное время этой

I^*, C^*, W^*

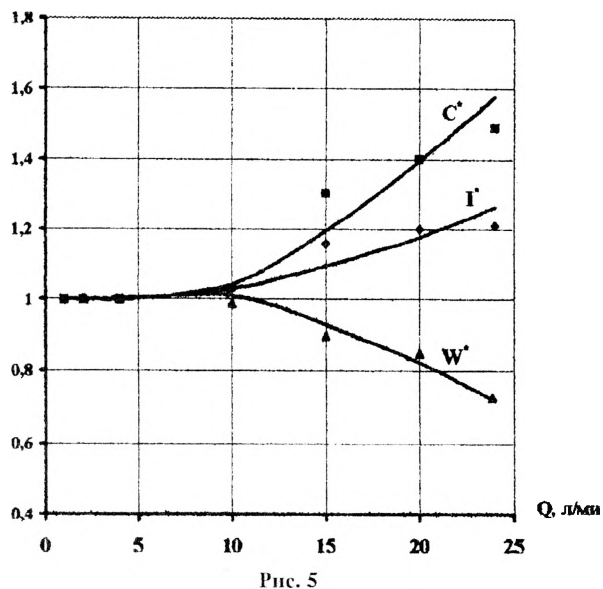


Рис. 5

стадии составляет $\tau_d \approx 10$ мс. При условиях описываемых здесь экспериментов средняя частота следования стримеров с каждой иглы многоигольчатого анода составляет ≈ 5 кГц, что соответствует промежутку времени между отдельными стримерами $\tau_c \approx 0,2$ мс. Поскольку $\tau_c \ll \tau_d$, то новый стример возникает в атмосфере с повышенной концентрацией озона. Такие условия разряда, как уже отмечалось ранее, из-за поглощения e молекулами O_3 способствуют снижению максимальных значений тока I и концентрации C и росту удельных энергозатрат W . Однако, если создать условия, при которых за время τ_c в "стримерном следе" удастся заметно понизить концентрацию озона, то можно ожидать, что при этом общие параметры разряда I, C, W улучшатся. Ускоренному "растеканию" озона в окружающее пространство может способствовать принудительное движение газа за счет прокачки. Оценки показывают, что для смещения "озонового следа" диаметром ≈ 1 мм [19] за время τ_c на заметное (т.е. соизмеримое с диаметром стримерного канала) расстояние $\Delta l \approx 1$ мм, скорость движения газа поперек разряда должна составлять $V_{\pi} = \Delta l / \tau_c \approx 5$ м/с.

Для экспериментальной проверки такой величины V_{π} был поставлен специальный опыт, в котором определялось влияние поперечной разряду скорости истечения воздуха $V_{\pi} = 4Q / (\pi d_c^2)$ из цилиндрического сопла диаметром $d_c = 8$ мм на максимальный ток I_M одной иглы 5, рис. 1, ($h = 7$ мм, $l = 15$ мм) в зависимости от расхода газа. Для исключения влияния озона, накапливаемого в закрытом объеме разрядной камеры, опыты проводились в открытом пространстве. Исследования показали, что увеличение скорости V_{π} в пределах 0...5 м/с лишь незначительно увеличивает ток I_M (от 80 до 100 мкА). Однако при дальнейшем нарастании

$V_{\text{п}}$ до 10 м/с величина $I_{\text{м}}$ увеличивается до 200 мкА, т.е. более чем в два раза. Из этого следует, что величина $V_{\text{п}} \approx 5$ м/с представляет собой ту скорость, при которой движение газа поперек разряда начинает существенно менять его свойства. Это подтверждает выполненные оценки скорости, при которой должно начинаться влияние движения газа на параметры разряда. Таким образом, продувка газа поперек разряда (даже при умеренных скоростях ≈ 10 м/с) может служить способом увеличения эффективности генерации озона стримерной короной. Однако такая продувка требует больших расходов воздуха (более 10 л/с), что является нежелательным для установок со сравнительно небольшой производительностью озона (до 10 г/час) из-за снижения его концентрации на выходе, не позволяющей экономично использовать озон в технологических целях.

Следует ожидать, что осевая по отношению к разряду продувка воздуха через сопла малого диаметра позволит обеспечить достаточно большую скорость истечения газа при умеренных его расходах Q . "Озоновый след" в осевом направлении имеет характерную длину $l_0 \approx 10$ мм [19] и, чтобы его вытеснить газом за время τ_c , необходимы либо осевая скорость $V_0 = l_0 / \tau_c \approx 50$ м/с, либо создание условий, при которых в газовом потоке при $V < V_0$ возникает радиальная составляющая скорости. Такую составляющую можно создать за счет турбулизации истекающего из сопла газового потока. Вычисления критического расхода газа $Q_{\text{кр}}$, при котором наступает турбулизация, определялись по выражению [1]

$$Q_{\text{кр}} = V_{\text{кр}} \cdot S, \quad (5)$$

где $S = \pi d_c^2 / 4$ — сечение сопла; $V_{\text{кр}}$ — критическая скорость, получаемая из соотношения

$$V_{\text{кр}} = \mu \operatorname{Re}_{\text{кр}} / \rho d_c, \quad (6)$$

где μ , ρ — кинематическая вязкость и плотность воздуха соответственно; $\operatorname{Re}_{\text{кр}} = 2300$ — критическое число Рейнольдса, характеризующее переход от ламинарного течения газа к турбулентному для цилиндрической трубы с острыми кромками. В соответствии с (5) и (6) при расходе газа $Q_{\text{кр}} = 1,8$ л/мин через сопло диаметром $d_c = 1$ мм скорость его истечения составляет $V_{\text{г}} = 35,5$ м/с. Это значение $V_{\text{кр}}$ меньше оценочного значения $V_0 = 50$ м/с. Чтобы достичь турбулизации потока при количестве сопел $N = 7$, для начала турбулизации потока расход воздуха должен составлять $Q = N Q_{\text{кр}} = 12,6$ л/мин. Как видно из рис. 5, именно при таких расходах воздуха начинает проявляться существенное влияние способа продувки на разряд.

Для дополнительной проверки роли влияния

турбулизации потока вдоль иглы на разряд был поставлен эксперимент с соплом диаметром $d_c = 0,45$ мм. При этом было установлено, что влияние движения газа на разряд наступает при расходе $Q = 0,7$ л/мин. Расчеты по формулам (5) и (6) показали, что именно при таких расходах поток становится турбулентным. Из изложенного следует, что определяющая роль начала влияния осевой продувки газа на разряд связана с турбулизацией потока.

Выводы. Снижение влажности атмосферного воздуха с 11 до 0,1 мг/л приводит к повышению почти в 1,5 раза максимального тока стримерной короны в промежутке с плоскими катодом и анодом, на котором установлены иголки, а также к значительному (до 3 раз) увеличению концентрации озона и уменьшению в 1,3...2 раза удельных энергозатрат на его получение.

Энергетическую эффективность генерации озона при разряде в такой электродной системе можно дополнительно повысить (более чем на 20 %) за счет направления потока воздуха вдоль осей коронирующих игл и обеспечения его турбулизации.

1. *Абрамович Г.Н.* Прикладная газодинамика. — М.: Наука, 1969. — 824 с.

2. *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.

3. *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.

4. *Божиско И.В., Петухов И.С.* Исследование разрядного промежутка для плазмохимического реактора на положительной стримерной короне // Техн.электродинамика. — 2005. — № 3. — С. 17—21.

5. *Божиско И.В., Петухов И.С., Фальковский Н.И.* Электродная система для разрядных устройств с положительной стримерной короной // Техн.электродинамика. — 2006. — № 3. — С. 9—12.

6. *Верещанин И.П.* Высоковольтные технологии. — М.: Изд. МЭИ, 2000. — 204 с.

7. *Голова В.И., Завада Л.М., Кадолин Б.Б.* и др. Генерация озона в тлеющем разряде положительной полярности // Вопросы атомной науки и техники. — № 1. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения (2). — 2000. — С. 58—62.

8. *Левитов В.И., Решидов И.К., Верещанин И.П.* и др. Дымовые электрофильтры. — М.: Энергия, 1980. — 326 с.

9. *Лукин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Г.* Физическая химия озона. — М.: Изд. МГУ, 1998. — 480 с.

10. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. — М.: Наука, 1987. — 592 с.

11. *Филипов Ю.В., Вобликова В.А., Пантелеев В.И.* Электросинтез озона. — М.: Изд. МГУ, 1987. — 236 с.

12. *Abdel-Salam M., Mizuno A., Shimizu K.* Ozone generation as influence by gas flow in corona reactors // J. Phys. D: Appl. Phys. — 1997. — № 30. — P. 864—870.

13. *Jen-Shin Chang*. Next generation integrated electrostatic gas cleaning systems // *Journal of Electrostatics*. — 2003. — № 57. — P. 273—271.

14. *Jen-Shin Chang*. Recent development of plasma pollution control technology: a critical review // *Science and Technology of Advanced Materials*. — 2001. — № 2. — P. 571—576.

15. *Kropke St., Akishev Yu.S., Hollander A.* Atmospheric pressure DC glow discharge for polymer surface treatment // *Surface and Coating Technology*. — 2001. — 142. — P. 512—516.

16. *Keqing Yan, Hexing Hui, Mi Cui*. Corona induced Non-Thermal Plasmas: Fundamental Study and Industrial Applications // *Journal of Electrostatics*. — 1998. — № 44. — P. 17—39.

17. *Loeb L.B.* Electrical Coronas. Their Basic Physical Mechanism. — University of California Press, Berkeley, 1965. — 457 p.

18. *Ryo Ono, Tetsuji Oda*. Dynamics of ozone and radicals generated by pulsed corona discharge in humid-air flow reactor by laser spectroscopy // *Journ of Applied Physics*. — 2003. — Vol. 93. — № 10. — P. 5876—5882.

19. *Ryo Ono, Tetsuji Oda*. Spatial distribution of ozone density in pulsed corona discharges observed by two-dimensional laser absorption method // *J. Phys D: Appl. Phys.* — 2004. — № 37. — P. 730—735.

20. *Temmerman Eef, Leys Christopher*. Surface modification of cotton yarn with a DC glow discharge in ambient air // *Surface and Coating Technology*. — 2005. — № 200. — P. 686—689.

21. *Yehia A., Mizuno A., Takashima K.* On the characteristics of the corona discharge in a wire-duct reactor // *J. Phys. D: Appl. Phys.* — 2000. — № 33. — P. 2807—2814.

Надійшла 20.04.2007

УДК 621.3.073

Д.А.Ассупров, канд.техн.наук (Научно-техн.центр магнетизма технічних об'єктів НАН України, Харків)

Управление внешним магнитным полем технических объектов с источниками управляющего поля поверхностно-распределенного типа

Обосновано применение контуров с регулируемым током, размещенных на поверхности технического объекта, для решения задачи управления внешним магнитным полем объекта, получены алгоритмы управления токами контуров при осуществлении управления магнитным полем в разомкнутой структуре.

Обґрунтовано застосування контурів з регульованим струмом, розміщених на поверхні технічного об'єкту, для вирішення задачі управління зовнішнім магнітним полем об'єкту, одержані алгоритми керування струмами контурів при здійсненні управління магнітним полем в розімкненій структурі.

Введение. Существует ряд технических объектов (ТО), внешнее магнитное поле (МП) которых является физической величиной, подлежащей управлению с целью формирования заданной пространственно-временной структуры МП или же минимизации его уровня (компенсации). К таким объектам относятся, например, космические аппараты, ориентация которых на орбите осуществляется за счет взаимодействия их внешнего МП с МП Земли [6], и морские суда для географических исследований, уровень внешнего МП которых должен быть по возможности минимальным, чтобы не исказить естественное МП Земли в зоне исследований [8].

Под внешним МП ТО здесь подразумевается поле вне наружной поверхности объекта, создаваемое собственными источниками ТО, расположенными в его объеме и на поверхности, а под его

управлением — целенаправленное воздействие на ТО для поддержания величин, характеризующих поле, в заданных границах или же изменения их по заданному закону.

Источниками внешнего МП ТО являются электрические токи и намагниченность элементов ТО и в общем случае их можно разделить на управляемые источники, с помощью которых производится воздействие на управляемые величины, и неуправляемые источники, поле которых имеет произвольный характер и является возмущающим воздействием, способным отклонить управляемые величины от требуемых значений.

Пусть $u = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ — совокупность управляемых величин (выходных координат), характеризующих внешнее МП ТО; $z = \{z_1, z_2, \dots, z_i\}$ — совокупность возмущающих воздействий; $x = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ — совокупность управляющих воз-