

устойчивой. Полученные результаты могут быть использованы для исследования устойчивости разностных схем для задачи, учитывающей капиллярные и гравитационные силы.

Список литературы

1. Абдраманова М. Б. Численное моделирование процесса вытеснения нефти паром / М. Б. Абдраманова // Вестник КазГУ. Серия математика, механика, информатика. – Алматы, 1998. - № 10. – С. 3-10.
2. Абиров А. К. Моделирование задач фазовых переходов при неизотермической фильтрации и качественные свойства решения / А.К. Абиров, С. Т. Мухамбетжанов // Вестник КазГУ. Серия математика, механика, информатика. – 1996. - № 5. – С. 3-11.
3. Антонцев С. Н. Краевые задачи для некоторых вырождающихся уравнений механики сплошной среды / С. Н. Антонцев, В. Н. Монахов– Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 1977. – 48 с.
4. Ахмед-заки Д. Ж. Об одной задаче двухфазной фильтрации смеси в пористой среде с учетом теплового воздействия / Д. Ж. Ахмед-заки // Научные труды НИПИ Нефтегаз. – 2010. - № 3. – С. 29-33.
5. Боксерман А. А. Численное исследование процесса вытеснения нефти паром / А. А. Боксерман, С. Якуба И. // Известия АН СССР. – 1987. - № 4. – С. 78-84.
6. Бочаров О. Б. О некоторых особенностях неизотермической фильтрации несмешивающихся жидкостей / О. Б. Бочаров, И. Г. Телегин // Теплофизика и аэромеханика. – Новосибирск, 2002. - № 3. – С. 459-466.
7. Лапин А. В. Исследование разностных схем для одного класса квазилинейных параболических уравнений / А. В. Лапин, А. Д. Ляшко // Известия высших учебных заведений. – 1973. - №1 (128). – С. 71-77.
8. Chavent G., Jaffre J. Mathematical models and finite elements for reservoir simulation. – Elsevier, 1986. – 375 p.
9. Mozzaffari S. Numerical modeling of steam injection in heavy oil reservoirs // Fuel. – Amsterdam, 2013. - № 112. – P. 185-192.
10. Temirbekov N. M., Baigereyev D. R. Modeling of three-phase non-isothermal flow in porous media using the approach of reduced pressure // Mathematical modeling of technological processes: 8th International Conference, CITech-2015, Almaty, Kazakhstan, September 24-28, 2015, Proceedings / edited by N. Danaev, Yu. Shokin, D. Akhmed-Zaki. – Almaty, 2015. – P. 166-176.

УДК 553/521 (629.1.05) (575.2) (04)

ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В РАЗРЯДНОМ ПРОМЕЖУТКЕ И ИХ РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ ИМПУЛЬСНОГО КОРОННОГО РАЗРЯДА

Токарев Андреан Валентинович, к.ф.-м.н., доцент, КРСУ им. Б.Н. Ельцина, Кыргызстан, 720000, г. Бишкек, Киевская 44, e-mail: tokarev_andrean@mail.ru

Угодников Михаил Евгеньевич, магистрант, КРСУ им. Б.Н. Ельцина, Кыргызстан, 720000, г. Бишкек, Киевская 44, e-mail: smeh@mail.ru

Объектом исследования является импульсно-периодический коронный разряд положительной реализуемый в условиях рентгеновской ионизации разрядного промежутка. В работе проводились экспериментальные исследования влияния состава плазмообразующего газа на электрические характеристики импульсного коронного разряда в коаксиальной системе электродов.

Установлено, что в смесях содержащих 6% CO₂, 4% Ar и 90% N₂ наблюдается наибольшее значение силы тока, достигающего 510 Вт/м коронирующего провода. Такой

удельный энергозатрат позволяет надеяться на создание достаточно мощных CO₂ лазеров имеющих относительно небольшие габариты. Формирование импульсного коронного разряда по предложенной схеме происходит за счет дополнительной ионизации разрядного промежутка характеристическими линиями рентгеновского излучения материала коронирующего электрода.

Ключевые слова: Низкотемпературная плазма, коронный разряд, зона ионизации, коронирующий электрод, рентгеновское излучение.

PHYSICAL PHENOMENA IN THE DISCHARGE GAP AND THEIR ROLE IN FORMATION PULSED CORONA DISCHARGE.

Tokarev Andrean Valentinovich, Ph.D.(Physic), Associate Professor, KRSU them.

B.N. Yeltsin, Kyrgyzstan, 720000 Bishkek, Kiev 44, e-mail: tokarev_andrean@mail.ru

Ugodnikov Mihail Evgenyevich, undergraduate, KRSU them. B.N. Yeltsin, Kyrgyzstan, 720000 Bishkek, Kiev 44, e-mail: cmeh@mail.ru

The object of this study is to repetitively pulsed positive corona discharge implemented in a X-ray ionization of the discharge gap. The work carried out experimental studies of the influence of the composition of the plasma gas on the electrical characteristics of pulsed corona discharge in a coaxial electrode system.

It is found that in mixtures containing 6% CO₂, 4% Ar and 90% N₂ observed most amperage reaching 510 W / m corona wire. This specific energy deposition gives hope for the creation of powerful CO₂ lasers have relatively small dimensions. Formation of pulse corona discharge on the proposed scheme is due to additional ionization of the discharge gap characteristic X-ray lines of the corona electrode material.

Keywords: Low-temperature plasma, corona, ionization zone, corona electrode, X-ray radiation.

Введение. Коронный разряд, не смотря на длительный период исследований, привлекает интерес ученых и практиков в настоящее время. На основе коронного разряда работают самые различные технологические устройства: электрофильтры, плазмохимические реакторы для синтеза озона, технологические устройства для очистки газов от токсических веществ [5-14].

В настоящее время усилия исследователей направлены на поиск методов управления коронным разрядом с целью повышения удельной мощности единичных плазменных устройств на основе коронного разряда.

До недавнего времени повышение удельной мощности коронного разряда полностью определялось применением в качестве источника питания коронного разряда наносекундных импульсных генераторов с амплитудой напряжения 70 – 150 кВ. Подобный подход к решению проблемы имеет ряд недостатков – это сложность оборудования для генерации подобных импульсов, стоимость изделий и чрезмерно высокие напряжения.

Увеличение мощности коронного разряда сопровождается его переходом в объемную форму. Факельный разряд. В первые подобный разряд описаны В.И. Попковым. Факельный разряд, распространившийся до противоположного электрода, представляется особым типом разряда в воздухе при атмосферном давлении. Он сравнительно мало изучен. Необходимо отметить что ток факельного разряда в 50 раз больше тока, обычного коронного разряда при одинаковых условиях эксперимента [3,4].

Аномальный коронный разряд положительной полярности также удается реализовать при импульсно периодическом питании. При этом увеличивается энергозатрат в разрядный

промежуток, разряд приобретает объемную форму, напряжения питания по сравнению с факельным разрядом уменьшаются на порядок [10].

Ряд исследований показывает, что характер коронного разряда положительной полярности можно существенно изменить путем включения в механизм формирования разряда не свойственных для положительной короны физических явлений. К числу которых относятся: 1). эмиссия электронов с катода (авто); 2) ускорение электронов в катодной области до энергии убегания; 3). генерация рентгеновского излучения в объеме и на аноде; 4). фотоионизация газа во внешней области коронного разряда; 5). Многоэлектронный пробой разрядного промежутка. Подобные коронные разряды изучены недостаточно, и их исследование может представлять научный и прикладной интерес [1,2].

Сложность и пространственная неоднородность физико-химических процессов в импульсном периодическом коронном разряде не позволяют до настоящего времени дать достаточно полное его описание. Неясны характеры и последовательность процессов в разрядном промежутке, и их зависимость от параметров разрядного контура. Мало изучена динамика развития разряда и кинетика химических реакций, не ясны причины и степени влияния внешних условий на срыв устойчивости разряда. Поэтому исследование электрофизических характеристик импульсного периодического коронного разряда в условиях рентгеновской ионизации разрядного промежутка является актуальной задачей.

Целью работы является изучение внешних характеристик импульсного периодического коронного разряда в широком диапазоне частот реализации и напряжений питания. В задачи входит: разработка и создание экспериментального стенда; определение напряжений зажигания разряда; изучение вольтамперных характеристик короны в зависимости от условий реализации.

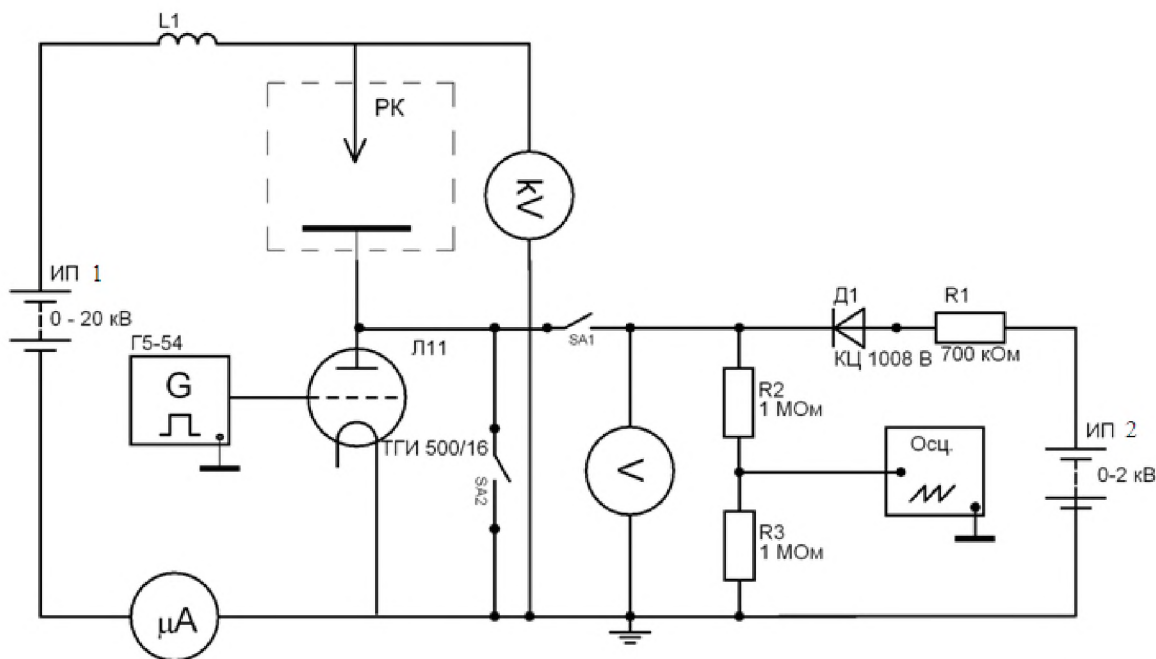


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. РК – разрядный промежуток коаксиальной геометрии, Г5–54 - генератор импульсов, Осц. – осциллограф, ТГИ – тиратрон импульсный.

Экспериментальная установка и методы исследования. Схема экспериментального стенда для исследования импульсно коронного разряда (ИКР) изображена на Рис. 1. В качестве коронирующего электрода использовалась нихромовая проволока диаметром 0,1 мм, длиной 8,2 см. Катодом являлась дюралевый цилиндр диаметром 57 мм, который для поддержания стабильной температуры, охлаждалась проточной водой

Зона разряда представляла собой герметичный сосуд, через который можно было прокачивать с регулируемым расходом воздух или другие газы. При исследовании влияния

материала коронирующего провода на вольтамперные характеристики данного разряда в качестве коронирующих электродов использовались провода диаметром 0,3 мм из алюминия, железа, меди, молибдена, серебра, вольфрама, платины, золота и свинца. Также были изготовлены медные электроды покрытые углеродом и амальгамой ртути.

С помощью дополнительного источника питания ИП2 через ограничивающий резистор R1 напряжение на катоде можно плавно регулировать от 0 до 2 кВ. Диод D1 служит для предохранения источника питания ИП2 от импульсов высокого напряжения, поступающих от источника питания ИП1. Сила тока от ИП 2 гораздо больше, чем от высоковольтного ИП1. Поэтому период заряжения катода до желаемого напряжения, оказывается, меньше, а стало быть, и частота зажигания разряда и средняя мощность горения разряда получается, больше, чем без использования ИП 2.

Генератор импульсов позволяет плавно менять частоту импульсов тока через тиратрон в интервале от 0 до 20 кГц. Через делитель напряжения R2R3 сигнал подается на осциллограф, что позволяет регистрировать кривую заряда тиратрона и промежутки между импульсами тока. Сила тока и напряжение в разрядном контуре регистрируются, соответственно микроамперметром и киловольтметром.

Электрофизические характеристики импульсного коронного разряда. При нулевом ускоряющем напряжении на катоде, т. е. когда ИП2 отключен, вольтамперные характеристики разряда показаны на Рис. 2. Из этого рисунка видно, что при некотором критическом напряжении, зависящем от частоты импульсов тока, классический коронный разряд скачком переходит в ИКР и при этом ток скачком возрастает. При этом при прочих равных условиях ток ИКР при горении на воздухе до 10 раз больше тока обычной короны. Из рис. 2 также видно, что при частотах следования импульсов 3 – 4 кГц в ИКР достигается максимум тока, а при возрастании частоты импульсов тока до 20 кГц ток вновь снижается до уровня классического коронного разряда. Это означает, что ИКР имеет область существования, зависящую от частоты следования импульсов тока

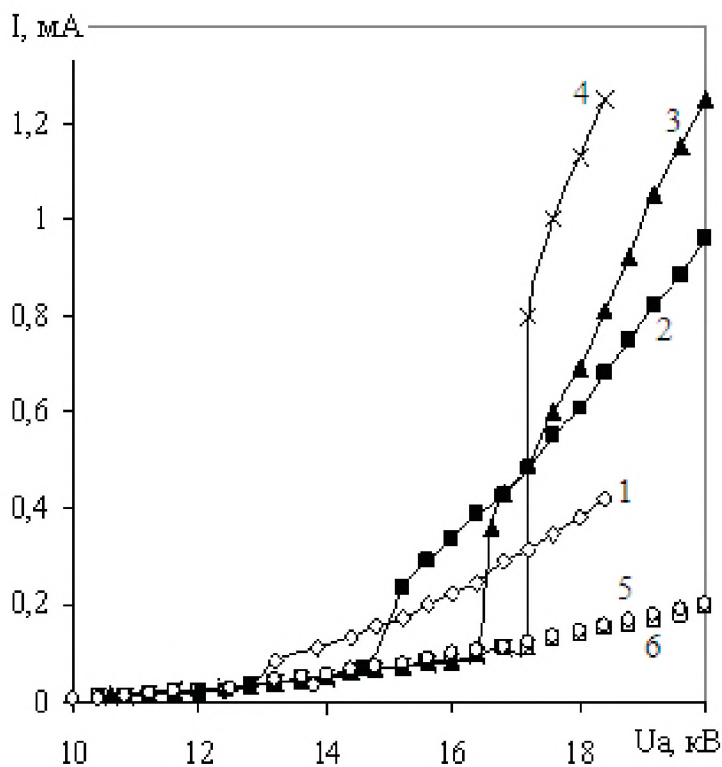


Рис. 2. Вольтамперные характеристики положительной короны при различных частотах включения тиратрона: 1 – 1 кГц; 2 - 2 кГц; 3 - 3 кГц; 4 - 4 кГц; 5 - 10 кГц; 6 - 20 кГц

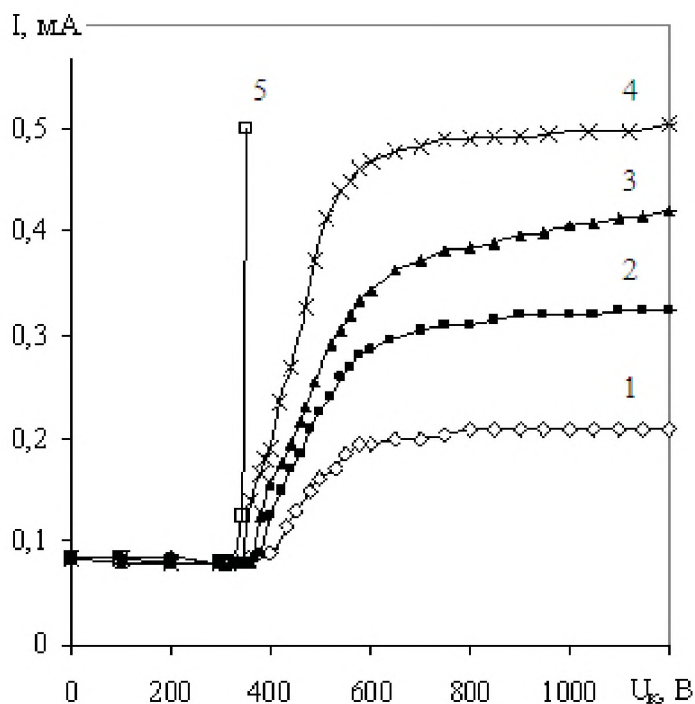


Рис. 3. Зависимость тока разряда от напряжения на катоде при напряжении на разрядном контуре 16 кВ для различных частот включения тиратрона: 1 – 1 кГц; 2 - 2 кГц; 3 - 3 кГц; 4 - 4 кГц; 5 - 10 кГц.

Ускоряющее напряжение на катоде существенным образом влияет на характер протекания тока через разрядный контур. Например, из рис. 3. видно, что на медном проводе покрытым углеродом при напряжении на РК 16 кВ наблюдается переход положительной короны в ИКР в узком интервале значений ускоряющего напряжения, лежащего в интервале 380 - 400 В. Для других материалов коронирующего электрода этот переход наблюдается при другом напряжении. При этом, чем выше частота следования импульсов тока, тем при меньшем напряжении зажигается ИКР и тем большее значение принимает сила тока при выходе кривой на «плато». Наличие «плато» говорит о том, что причина, вызывающая повышение силы тока исчерпала себя и далее сила тока перестает зависеть от напряжения на катоде. Однако повышение частоты следования импульсов тока до 10 кГц способствует на столько резко повышает силу тока, что ИКР теряет устойчивость и срывается в дуговой разряд.

Влияние материала коронирующего электрода на характеристики разряда.

Материал коронирующего электрода определяет величину напряжения зажигания (U_3) ИКР. На рисунках (4-9) показаны зависимости электрического тока разряда от напряжения на катоде. В результате повышения напряжения на катоде наблюдается резкое повышение тока разряда в 10 раз.

Для каждого материала электрода зажигание коронного разряда происходит при различных напряжениях. Данный эксперимент показал что для электрода из серебра напряжение зажигания равен 500 В, для платины 610 В, для вольфрама 700 В, для ртути 500 В, для молибдена 820 В, для углерода 390 В, для меди 580 В, для алюминия 460 В и для свинца 430 В.

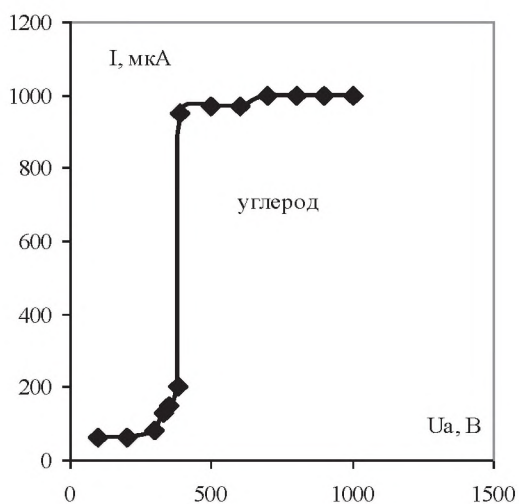


Рис. 4. Зависимость тока разряда от напряжения на катоде. Коронирующий электрод из углерода

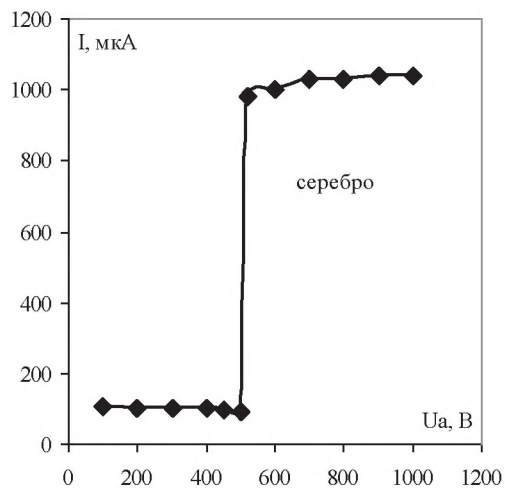


Рис. 5. Зависимость тока разряда от напряжения на катоде. Коронирующий электрод из серебра.

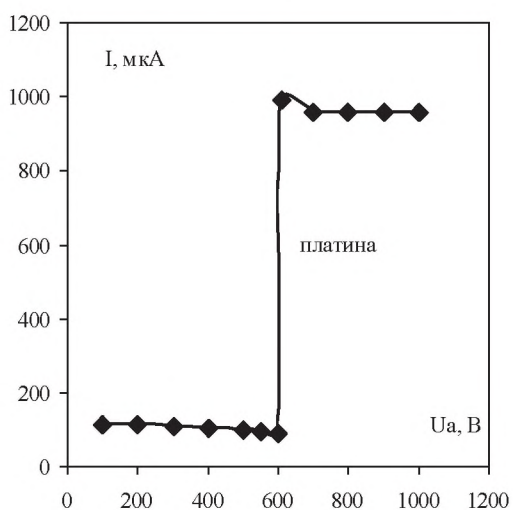


Рис. 6. Зависимость тока разряда от напряжения на катоде. Коронирующий электрод из платины.

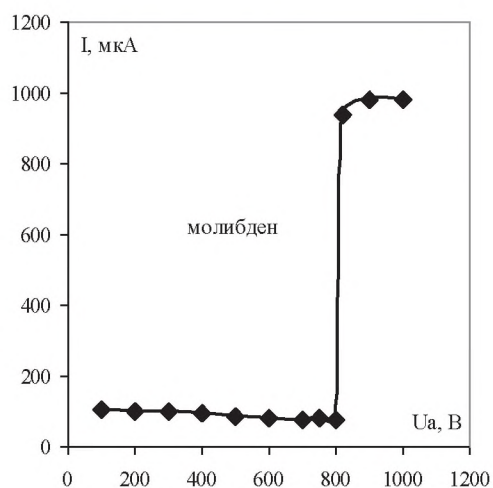


Рис. 7. Зависимость тока разряда от напряжения на катоде. Коронирующий электрод из молибдена.

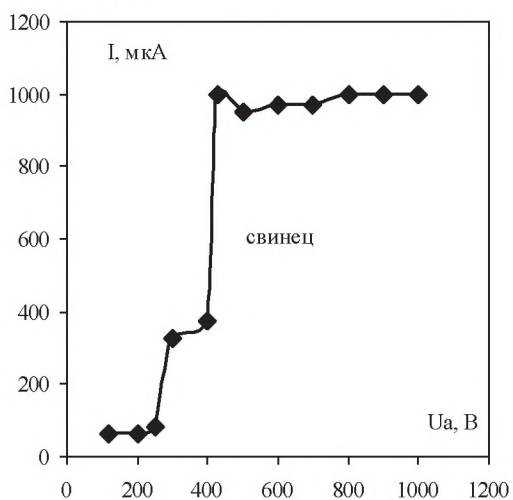


Рис. 8. Зависимость тока разряда от напряжения на катоде. Коронирующий электрод из свинца

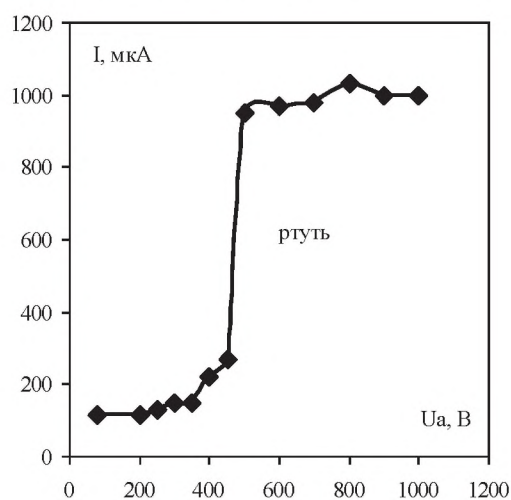


Рис. 9. Зависимость тока разряда от напряжения на катоде. Коронирующий электрод из ртути.

В таб.1 приведены напряжения зажигания ИКР при напряжении на РК 18 кВ и частоте включения тиратрона 14 кГц. для различных материалов коронирующего электрода.

Таблица 1

Напряжения зажигания ИКР											
Материал анода	C	Al	Fe	Cu	Mo	Ag	W	Pt	Au	Hg	Pb
U _з , В	385	455	720	565	810	580	725	610	760	47 5	44 0
Уровень	K	K	L _{III}	L _{III}	M _I	M _{III}	N _I	N _{II}	N _I	N _{III}	N _I v
Энергия эВ	283	1559, 6	707, 5	930, 9	504, 6	571, 4	595	609 ,2	758 ,8	57 1	43 5,2

Влияние материала коронирующего электрода на параметры ИКР может производиться посредством генерации мягкого характеристического рентгеновского излучения анодом РК. В нашем случае события могут развиваться следующим образом: При включении тиратрона на аноде формируются импульсы напряжения с фронтом порядка 10^{-9} с. За счет малой подвижности положительных ионов вблизи коронирующего электрода формируется электрическое поле ускоряющее электроны до энергий соответствующих ускоряющему потенциалу. Электроны ионизуют атомы материала коронирующего электрода. При рекомбинации атомов происходит излучение в рентгеновском диапазоне. Рентген поглощается в объеме РК посредством ионизации атомов кислорода и азота. Дополнительные электроны увеличивают проводимость разрядного промежутка, что и приводит к усилению тока коронного разряда.

Для эффективного поглощения рентгеновского излучения в веществе необходимо чтобы его длина волны соответствовала краю поглощения данного вещества. Известно, что края поглощения азота и кислорода равны 400 и 531 эВ соответственно. Поэтому энергия квантов излученных коронирующим электродом должна быть близкой к краю поглощения кислорода или азота, только в данном случае излучение будет поглощено на длинах соизмеримых с размерами разрядного промежутка. В таб.1. приведены уровни энергии однократной ионизации атомов коронирующих электродов величина которых наиболее близка к краю поглощения кислорода и азота. Чтобы ионизовать данные атомы величина ускоряющего напряжения, при котором загорается ИКР должна быть близкой к данным значениям. Для Fe, Ag, Pt, Au, Pb потенциалы однократной ионизации и напряжения зажигания имеют очень близкие значения. Для других материалов наблюдаются большие или меньшие расхождения.

Таким образом можно утверждать что формирование ИКР по предложенной схеме происходит за счет дополнительной ионизации разрядного промежутка характеристическими линиями рентгеновского излучения материала коронирующего электрода.

Заключение. В результате исследований установлено, что при работе на воздухе при всех прочих равных условиях сила тока в ИКР до 7 раз превосходит силу тока классического коронного разряда. Сила тока при горении ИКР в кислороде и углекислом газе почти не отличается от горения классического коронного разряда, т.к. эти газы электроотрицательные и в них все свободные электроны прилипают к молекулам и потому разряд не развивается. В аргоне ИКР вообще не горит, а сразу же переходит в дугу или искру. В азоте при всех

прочих равных параметрах сила тока ИКР до 80 раз превышает силу тока классического коронного разряда.

При исследовании ВАХ в смесях газов установлено, что в смесях содержащих 6% CO₂, 4% Ar и 90% N₂ наблюдается наибольшее значение силы тока, при этом погонная мощность составляет 510 Вт/м коронирующего провода. Такой удельный энергозатрат позволяет надеяться на создание достаточно мощных CO₂ лазеров.

Обнаружено явление гистерезиса при построении ВАХ при увеличении и снижении напряжения на полевом катоде. Явление гистерезиса говорит о наличии нескольких причин, влияющих на размножение электронов в зоне разряда. Этими вероятными причинами является ступенчатая ионизация и более мощное, чем у классического коронного разряда ионизирующее ультрафиолетовое излучение из зоны разряда ИКР, который заполняет весь межэлектродный промежуток. Усиление тока в коронном разряде происходит в результате дополнительной ионизации разрядного промежутка характеристическим рентгеновским излучением, возникающим на аноде.

Список литературы

1. Ашмарин Г.В. Формирование линейного коронного факельного разряда. / Г.В. Ашмарин, В.М. Лелевкин, А.В. Токарев // Физика плазмы.- 2002.- т. 28.-№ 8.
2. Ашмарин Г.В. О физических механизмах горения линейного коронного факельного разряда/ Г.В. Ашмарин, К.С. Ким, А.В. Токарев //Вестник КРСУ, 2002. – Т. 2.- № 2. – С. 47-52.
3. Попков В.И. Теория биполярной короны на проводах / В.И. Попков //Изв. АН СССР, ОТН- 1948.-№ 4.- с.433-448.
4. Попков В. И., Богданова Н. Б. О параметрах факельного разряда в воздухе при атмосферном давлении /В. И. Попков, Н. Б. Богданова // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1968, N 1, с. 79-87.
5. Экотехника. Под редакцией Л.В. Чекалова. –Ярославль.-Русь, 2004.- 424с.
6. Akishev, Yu .S.; Grushin, M.E.; Monich, A.E.; Napartovich, A.P.; Trushkin, N.I. One-Atmosphere Argon Dielectric-Barrier Corona Discharge as an Effectivr source of Cold Plasma for Treatment of Polymer Films and Fabrics. // High Energy Chemistry, 2003, Vol. 37, Issue 5, p. 286-290.
7. Bohm, J.. Electrostatic Precipitators. 1982, Elsevier Scientific Publishing Company, New York.
8. Cotrell F.G. Art of Separating Suspended Particles from Gaseous Bodies. – U.S. Patent, 895,729 (1908)
9. Groza, A.; Ganciu-Petsu, M; Surmeian, A.; Popescu, I.I. Oils Polymerization Indused by Corona Discharges at Atmospheric Pressure. // Molecular Crystals & Liquid Crystals, 2004, Vol. 416, Issue 1, p. 217-222. 12.
10. Lelevkin V.M., Tokarev A.V., Yudanov V.A. Electrical characteristics of torch discharge. Contributed papers. Hakone 5. International symposium on high pressure, low temperature plasma chemistry. Milovy, Chech republic. 1996 г.
11. Ma, Hongbin; Qiu, Yuchang. A study of Ozone Synthesis in Coaxial Cylinder Pulse Streamer Corona Discharge Reactors. // Ozone: Science & Engineering, 2003, Vol.25, Issue 2, p.127-136.
12. Malik M.A., Ubaid-ur-Rehman, Ghaffar, A. ,and Ahmed, K.. Synergistic effect of pulsed corona discharges and ozonation and decolourization of methylene blue in water. Plasma Sources Science and Technology, Vol. 11, № 3, 2002, p.236-241.
13. Malik, M.A.. Synergistic effect of plasmacatalyst and ozone in a pulsed corona discharge reactor on the decomposition of organic pollutants in water. // Plasma Sources Science and Technology, 2003, Vol. 12, № 4, pp.826-833.

14. *Ono, Ryo; Oda, Tetsuji.* Dynamics 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, Issue 10, p.5876-5883.

УДК 532.59+519.63

СХЕМА РАСЩЕПЛЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНО-ДИСПЕРСИОННЫХ УРАВНЕНИЙ НА СФЕРЕ

Шокин Юрий Иванович, академик, Институт вычислительных технологий СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева 6, e-mail: dir@ict.nsc.ru

Гусев Олег Игоревич, Институт вычислительных технологий СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева 6, e-mail: gusev_oleg_igor@mail.ru

Федотова Зинаида Ивановна, к.ф.м.н., Институт вычислительных технологий СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева 6, e-mail: zf@ict.nsc.ru

Хакимянов Гаяз Салимович, д.ф.м.н., профессор, Институт вычислительных технологий СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева 6, e-mail: khak@ict.nsc.ru

В статье описывается новый численный метод для моделирования длинных поверхностных волн с учётом дисперсии на вращающейся притягивающей сфере. Алгоритм представляется в виде конечно-разностной схемы предиктор-корректор, на каждом шаге которой поочередно решаются неоднородная гиперболическая система классических уравнений мелкой воды с модифицированной правой частью и равномерно эллиптическое уравнение. Исследованы дисперсионные свойства и необходимые условия устойчивости метода. Показано, что в нелинейно-дисперсионной модели эти условия менее ограничительны, чем в бездисперсионной модели.

Ключевые слова: поверхностные волны, нелинейно-дисперсионные уравнения на сфере, конечно-разностный метод, численный алгоритм, устойчивость, дисперсия.

ALGORITHM FOR NUMERICAL SIMULATION OF TSINAMI WITHIN THE FRAMEWORK OF THE NONLINEAR DISPERSIVE MODEL

Shokin Yurii I., Academician, Professor, Institute of Computational Technologies SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, Acad. Lavrentjev avenue 6 e-mail: dir@ict.nsc.ru

Gusev Oleg I., Institute of Computational Technologies SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, Acad. Lavrentjev avenue 6 e-mail: gusev_oleg_igor@mail.ru

Fedotova Zinaida I., PhD, Institute of Computational Technologies SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, Acad. Lavrentjev avenue 6 e-mail: zf@ict.nsc.ru

Khakimzyanov Gayaz S., PhD, Professor, Institute of Computational Technologies SB RAS, Russia, 630090, Novosibirsk, Acad. Lavrentjev avenue 6 e-mail: khak@ict.nsc.ru

The paper describes a new numerical method for modeling long waves with dispersion on a rotating attracting sphere. The algorithm is presented in the form of a finite-difference scheme of predictor-corrector, so that at each step the inhomogeneous hyperbolic system similar to classical shallow water equations with a right-hand side and the uniformly elliptic equation are solved alternately. Necessary conditions for the stability of the method are obtained and the dispersion properties are investigated. We show that these conditions are less restrictive than ones are inherent to the classic shallow water model.