



Ким К. К., Спичкин Г. Л., Иванов С. Н.

K. K. Kim, G. L. Spichkin, S. N. Ivanov

ПЛАЗМЕННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ГИДРОФИЛЬНОСТИ БУМАЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ

PLASMA INSTALLATION FOR INCREASING PAPER PRODUCT HYDROPHILY

Ким Константин Константинович – член-корреспондент АЭН РФ, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, г. Санкт-Петербург); 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Mr. Konstantin K. Kim – correspondent member of Russian Academy of electrical engineering, Dr. Sc. (Engineering), professor, Head of Theoretical Foundations of electrical engineering Department, Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I (Russia, Saint-Petersburg); 190031, Saint-Petersburg, Moscovsky av., 9. E-mail: kimkk@inbox.ru.

Спичкин Георгий Леонидович – к.т.н., ведущий научный сотрудник кафедры «Теоретические основы электротехники» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, г. Санкт-Петербург); 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 9. E-mail: speechkin@inbox.ru.

Mr. Georgii L. Spichkin – Dr. Sc. (Engineering), leading researcher, Theoretical fundamentals of electrical engineering Department, Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I (Russia, Saint-Petersburg); 190031, Saint-Petersburg, Moscovsky av., 9. E-mail: speechkin@inbox.ru.

Иванов Сергей Николаевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Электромеханика» ФГБОУ ВО «КнАГТУ» (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681021, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27. E-mail: kem@knastu.ru.

Mr. Sergey N. Ivanov – Doctor of Engineering, Professor, Department of Electromechanics, Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681021, Komsomolsk-on-Amur, Lenin av., 27. E-mail: kem@knastu.ru.

Аннотация. Обработка тонкой бумажной ленты с целью повышения ее гидрофильности низкотемпературной газоразрядной плазмой весьма перспективна из-за генерации частиц, вступающих в реакцию с молекулами примесей или основного материала. Кроме того, на молекулы поверхностного слоя материала воздействуют ультрафиолетовое и мягкое рентгеновское излучения, генерируемые в катодном слое разряда. Объемный разряд обеспечивает высокую степень однородности воздействия на поверхность материала. Для повышения интенсивности плазмохимических реакций необходимо повышать частоту питающего напряжения источника газоразрядного реактора или переходить к импульсно-периодическому режиму электропитания. Частота повторения импульсов согласуется с характерной частотой протекания плазмохимических реакций.

Summary. The treatment of a thin paper tape with the help of low-temperature gas-discharge plasma to increase its hydrophilic property is rather perspective, because of the generation of particles, which react with molecules of impurities or basic material. Besides, the molecules of a material surface are influenced by of ultraviolet and soft x-ray radiations, generated in a cathode layer of the discharge. The volumetric gas discharge guarantees a high degree of influence uniformity on the material surface. To increase plasma chemical reaction intensity it is important to increase the frequency of discharge reactor supplied voltage or to pass to a pulse-periodic regime of the power supply. The frequency of pulse recurrence is coordinated with characteristic frequency of plasma chemical reactions passing.

Ключевые слова: объемный газовый разряд, низкотемпературная газоразрядная плазма, бумага, обработка, газоразрядный реактор.

Key words: space gas charge, low temperature low temperature plasma, paper, treatment, gas-discharge generator.

УДК 533.9; 537.572

Введение

Повышение гидрофильности изделий из бумаги с помощью обработки в среде низкотемпературной плазмы, созданной газоразрядным реактором, посредством изменения ее структуры является весьма перспективным, поскольку в данной плазме происходит генерация электронов, ионов, активных атомных частиц и радикалов, которые могут вступать в реакцию с молекулами примесей или основного материала на его поверхности. Кроме того, молекулы поверхностного слоя бумаги подвергаются воздействию ультрафиолетового (УФ) и мягкого рентгеновского излучений, генерируемых в катодном слое разряда.

Физико-химические процессы и принцип действия установки. В газоразрядном реакторе, входящем в состав установки для повышения гидрофильности поверхности бумаги, могут использоваться различные типы разрядов: объемный [1; 2; 3], коронный [1] и разряд по поверхности диэлектрика [4] (скользящий разряд). Из всех известных форм газового разряда только объемный разряд может обеспечить высокую степень однородности воздействия на обрабатываемую поверхность материала в газоразрядном реакторе. Формированию однородного самостоятельного разряда в воздухе атмосферного давления препятствует развитие ионизационно-абсорбционной и других видов неустойчивостей [2], для подавления которых можно использовать емкостную стабилизацию. В этом случае электроды покрывают диэлектрическими барьерами, при этом ток носителей в разрядном промежутке замыкается током смещения (емкостным током) через барьеры. Если в некоторой зоне разрядного промежутка увеличивается плотность тока, то увеличивается падение напряжения на емкости барьеров, что приводит к снижению напряженности электрического поля в канале разряда и, следовательно, к снижению плотности тока. Наиболее эффективна стабилизация разряда диэлектрическими барьерами с низким значением удельной поверхностной емкости $C_{\text{вд}}$. В том случае, когда $C_{\text{вд}}$ – величина порядка единиц пФ/см² и менее, а отношение амплитуды прикладываемого к разрядному промежутку импульсного напряжения к значению напряжения статического пробоя (коэффициент импульса) не менее 2, структура разряда весьма однородна. Низкотемпературная плазма такого разряда неравновесна, температура газа, как правило, не превышает 50 – 100 °С, а отношение температуры электронов к температуре газа – 60 – 100 [2].

Ток разряда протекает и через материал, помещенный в газоразрядный реактор. Если обрабатываемый материал – диэлектрик (бумага), то ток через него протекает в виде тока смещения, а если проводник – то в виде тока проводимости.

Специфической особенностью высоковольтного импульсного объемного разряда емкостного типа является высокая напряженность электрического поля вблизи поверхности обрабатываемого материала, поэтому поверхность подвергается бомбардировке ионами и электронами со средней энергией 2 – 5 эВ. Кроме того, указанные процессы идут на фоне облучения поверхности обрабатываемого материала квантами УФ и мягкого рентгеновского излучений, возникающими при соударении ускоренных электронов с самой поверхностью или атомами остаточного газа. В условиях электрон-ионной бомбардировки и облучения активизируются все реакции взаимодействия плазмы с поверхностью материала.

Эффективность процессов взаимодействия продуктов плазмохимических реакций в воздухе с молекулами модифицируемого материала связана с увеличением доли энергии, запасенной в накопительных элементах высоковольтного источника электропитания, вкладываемой в каналы ионизации, диссоциации, отлипания и другие, т.е. в каналы образования химически активных частиц. Для повышения интенсивности плазмохимических реакций целесообразно повышать частоту питающего напряжения источника газоразрядного реактора или переходить к импульсно-периодическому режиму электропитания. При этом частота повторения импульсов должна быть согласована с характерной частотой протекания плазмохимических реакций.

Проиллюстрируем работу установки по функциональной схеме на примере установки для обработки движущейся бумажной ленты.

Оценка возможного использования газоразрядной плазмы для модификации объемной структуры тонкой бумажной ленты с целью повышения ее гидрофильности проводилась на основе следующей исходной информации:

- влажность так называемой высушенной ленты составляет около 50 %, температура около 100 °С,
- влажность невысушенной ленты доходит до 95 %, температура комнатная. Такая лента находится на основе – гибком пористом армированном пластике толщиной около 1 мм.

Желательно оказывать плазменное воздействие на невысушенную ленту, одновременно высушивая ее (снижая процентное содержание влаги).

Блок-схема установки для обработки движущейся бумажной ленты в низкотемпературной газоразрядной плазме показана на рис. 1.

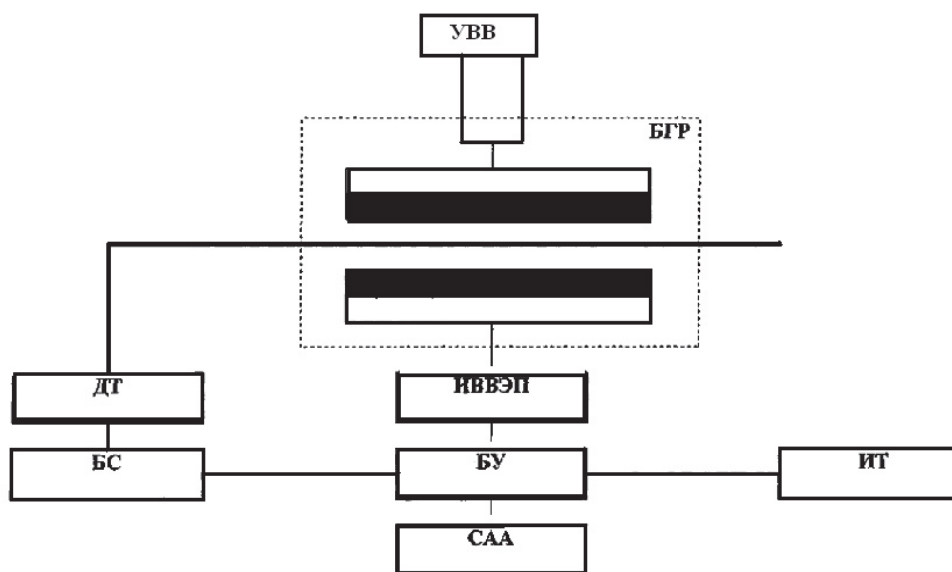


Рис. 1. Блок-схема установки

Основным элементом установки является блок газоразрядных реакторов (БГР), в котором формируется квазиоднородный по своей структуре объемный разряд емкостного типа при подаче на электроды БГР импульсов напряжения знакопеременной формы от источника высоковольтного электропитания (ИВВЭП). Последний, как правило, состоит из низковольтного высокочастотного тиристорного или транзисторного генератора, повышающего трансформатора и, при необходимости, устройства для сжатия (укорочения) высоковольтных импульсов. Блок управления (БУ) управляет работой установки и через блок согласования (БС) регулирует работу двигателя транспортера ленты (ДТ). Режимы работы установки отображаются на табло индикации (ИТ). Установка должна быть снабжена системой аварийной автоматики (САА), обрабатывающей аварийные режимы (электрический пробой в БГР, наведение статического заряда выше принятых норм, выброс в производственное помещение озона или других вредных веществ, сопутствующих технологическому процессу, в концентрациях выше ПДК и др.). Работой установки может управлять ЭВМ, в памяти которой хранится протокол режимов работы. Кроме того, установка должна комплектоваться нейтрализаторами статического электричества (НСЭ) (на рис. 1 не показан), полярность и величина которого могут быть заранее неизвестны, а также узлом вытяжной вентиляции (УВВ).

При выборе наиболее важного параметра БГР – газового зазора – расстояния между диэлектрическими покрытиями (барьерами) электродов (D) следует исходить из того, что движущая лента не должна касаться диэлектрического покрытия. В противном случае возрастает вероятность

деформации (разрыва) ленты и наведения значительного статического заряда на ленте и барьерах БГР. При естественном провисе ленты, обусловленном ее значительной шириной и длиной с учетом ее толщины (0,1 мм) и толщины подложки (1,0 – 1,5 мм), а также возможности перекосов во время движения, следует принять значения газоразрядного промежутка в пределах $D = (4 - 6)$ мм. Увеличение длины газового промежутка до величин свыше (6 – 8) мм нежелательно из-за значительно возрастающих при этом трудностей, связанных с внешней изоляцией высоковольтного оборудования. При выбранной длине газоразрядного промежутка величина амплитуды напряжения на выходе ИВВЭП должна составлять $U_a = 2(E_i/p)pD \sim (30 \pm 6)$ кВ, где p – давление воздуха ($p = 1$ атм), E_i/p – приведенное значение напряженности электрического поля, при котором начинаются интенсивные ионизационные процессы (формируется газовый разряд), для воздуха – $E_i/p = 30$ кВ/(см×атм). Длина газоразрядного реактора вдоль направления движения ленты определяется, главным образом, двумя факторами: необходимым характерным временем воздействия газоразрядной плазмы на бумажную ленту для ее модификации и интенсивностью воздействующих газоразрядных факторов, определяющейся механизмом развития газового разряда, средней мощностью, выделяемой в газоразрядном промежутке, и пиковой мощностью в единичном импульсе тока.

Оценки и проблемы. Оценка характерного времени воздействия, необходимого для модификации бумаги, может быть выполнена лишь после необходимых экспериментов. Интенсивность плазмохимического воздействия на бумажную ленту ограничена величиной вводимой в газоразрядную плазму средней мощности – $(10 - 30)$ Вт/см², превышение которой недопустимо с точки зрения изоляционных свойств барьеров и может привести к их термоэлектрическому пробою. Приведем пример оценки предельного энергопотребления установки. Пусть требуемое время воздействия $(0,5 - 1,0)$ с. В этом случае длина газоразрядного реактора – моноблока или выполненного в виде последовательно расположенных газоразрядных секций при скорости протяжки ленты 0,1 м/с составляет 10 м. Таким образом, при ширине протягиваемой ленты 1 м сечение газоразрядного реактора составляет 10 м², а общее энерговыделение в реакторе характеризуется средней мощностью $P = (10 - 30)$ кВт, что с учетом КПД – 0,5 – 0,6, характерного для установок такого типа, определяет энергопотребление установки на уровне $(20 - 50)$ кВт.

Для препятствия распространения воздуха, содержащего продукты плазмохимических реакций – озон, окислы азота и другое, в производственное помещение необходимо вытяжную вентиляцию от блока газоразрядных реакторов рациональнее выполнять с использованием завес. В систему вентиляции необходимо дополнительно ввести систему подогрева воздуха, поступающего с бумажной лентой в газоразрядный реактор с целью повышения в нем температуры выше критической $(60 - 80)$ °С, для уменьшения концентрации образующегося в реакторе озона. Разложение образовавшегося в реакторе озона может быть осуществлено и за счет специального ухудшения теплоотвода через диэлектрические покрытия и автоматического поддержания температуры в газоразрядном реакторе на требуемом уровне $(60 - 80)$ °С. Уровень оптимальной температуры (и распределения температуры по зазору) следует выбирать также с учетом необходимости одновременной плазмохимической обработки и сушки бумажной ленты с учетом возможной деформации органической подложки – несущей основы движущейся невысушенной ленты.

При разработке установки для обработки движущейся бумажной ленты низкотемпературной плазмой возникает ряд проблем.

Большая ширина ленты и, следовательно, газоразрядного реактора может вызвать значительную деформацию диэлектрических барьеров, поэтому конструкция верхнего электрода должна основываться на прочных несущих металлических конструкциях, покрытых тонким (1 – 2) мм равномерным по толщине слоем диэлектрика, например стекломалью. Требования к диэлектрическому покрытию, ограничивающему газоразрядный промежуток снизу, несколько проще, и в качестве такого покрытия могут быть рекомендованы различные виды специальных, но недефицитных стекол. Не следует использовать керамические материалы, т.к. обладая значительной пористостью (6 – 15) % они адсорбируют влагу атмосферного воздуха и становятся центрами концентрирования объемного разряда и накопления продуктов плазмохимических реакций.

Диэлектрические покрытия испытывают воздействие значительных температурных градиентов и напряженности электрического поля, причем в момент включения установки имеет место эффект термоудара по диэлектрику. Электрическое поле в диэлектрике, возникающее при замыкании через него тока объемного разряда, строго говоря, нельзя считать однородным. Более того, в зоне газового разряда, где в силу наличия дефектов или других причин, локальная плотность тока, а следовательно, и плотность энерговыделения, и температура вблизи поверхности диэлектрического покрытия выше, выше и напряженность электрического поля. Наличие совокупности выше-названных факторов – неоднородность электрических полей большой напряженности и значительных градиентов температуры – снижает долговременную прочность диэлектриков. Эксплуатационный режим, определяемый средним значением вводимой в разряд мощности, должен быть значительно менее интенсивным, чем режим ввода энергии, при котором происходит пробой, определяемый термоэлектрическим разрушением диэлектриков.

Некоторые рекомендации. При анализе возможности использования газоразрядных технологий для модификации объемной структуры и одновременно сушки бумажных лент необходимо учитывать электрофизические и плазмохимические аспекты взаимодействия. Регулирование теплового режима реактора, а следовательно, скорости химического взаимодействия возможно за счет изменения теплоотвода через диэлектрические покрытия и электроды и принудительного изменения объемного теплообмена в реакторе.

Также температурный режим, особенно при наличии влаги атмосферного воздуха, существенно влияет на однородность объемного газового разряда, а следовательно, на длительную электрическую стойкость покрытий.

При обработке увлажненной бумаги необходимо учитывать, что увеличение влажности в газоразрядном промежутке способствует ухудшению однородности разряда. В литературе отсутствуют данные по формированию барьерного разряда в воздухе с влажностью более (30 – 40) %. Возможно, что при повышении влажности воздуха необходимо будет принимать специальные меры, направленные на дополнительное повышение однородности объемного разряда.

При работе с газоразрядными реакторами, работающими в среде атмосферного воздуха, часто возникает проблема нейтрализации активных относительно долгоживущих продуктов плазмохимических реакций (озона, окислов азота и др.) с тем, чтобы не допустить попадание их в помещении в концентрациях выше ПДК. Учитывая значительные размеры реактора, его принципиальную негерметичность и сравнительно низкие уровни ПДК на озон ($0,1 \text{ мг/м}^3$) и окислы азота в смеси с озоном ($0,05 \text{ мг/м}^3$), решение вопросов производственной гигиены становится весьма непростым. Кроме того, даже в случае использования мощной вытяжной вентиляции в зоне работающего газоразрядного реактора задача нейтрализации агрессивных продуктов плазмохимических реакций при расходах вентиляционных потоков ($10^3 - 10^4$) $\text{м}^3/\text{ч}$ весьма не простая.

Из-за значительных размеров реактора и наличия на электродах знакопеременного высоко-частотного высоковольтного напряжения последний является источником интенсивных электромагнитных колебаний в открытое пространство, что недопустимо с точки зрения электромагнитной экологии. Избежать или, по крайней мере, значительно уменьшить излучение можно экранировкой высоковольтных электродов заземленным проводящим электродом или благодаря специальной конструкции газоразрядного реактора. При обработке увлажненной бумаги вследствие ее высокой проводимости часть движущейся ленты вне газоразрядного реактора может оказаться под напряжением, что крайне нежелательно с точки зрения техники безопасности.

Результаты экспериментов. На созданной авторами установке был проведен экспресс-эксперимент по исследованию влияния обработки низкотемпературной газоразрядной плазмой на гидрофильность образцов тонких микропористых структур (тонкая бумага, пористый листовой ПВХ). Образцы помещались в газоразрядный промежуток длиной 4 мм, образованный двумя плоскопараллельными электродами с диэлектрическими покрытиями (стекло с диэлектрической проницаемостью – 6,5; толщиной 4 мм). Амплитуда импульсов напряжения на электродах – 35 кВ, частота следования импульсов – 50 Гц. Средняя мощность, вводимая в разряд, варьировалась в пределах (2 – 5) Вт/см^3 . Время экспозиции – 30 с. Края необработанного и обработанного в газо-

разрядной плазме образцов опускались в воду на глубину 5 мм, наблюдался капиллярный эффект. Высота подъема воды по обработанным образцам (бумаге и пористым ПВХ) была в (2 – 2,5) раза выше, чем по необработанным образцам.

Выводы. Повышение гидрофильности изделий из бумаги с помощью обработки в среде низкотемпературной плазмы, созданной газоразрядным реактором, посредством изменения ее структуры является весьма перспективным.

Для повышения интенсивности скорости обработки целесообразно повышать частоту питающего напряжения источника газоразрядного реактора или переходить к импульсно-периодическому режиму электропитания. При этом частота повторения импульсов должна быть согласована с характерной частотой протекания плазмохимических реакций.

Рассматриваемые установки характеризуются невысоким энергопотреблением, а их эксплуатация не связана с возникновением неразрешимых экологических проблем, что делает их внедрение в различные технологические процессы вполне обоснованным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Райзер, Ю. П. Физика газового разряда / Ю. П. Райзер. – Долгопрудный: Интеллект, 2009. – 736 с.
2. Велихов, Е. Л. Физические явления в газоразрядной плазме / Е. Л. Велихов, А. С. Ковалев, А. Т. Рахимов. – М.: Наука, 1987. – 160 с.
3. Никандров, Д. С. Низкочастотный барьерный разряд в таунсендском режиме / Д. С. Никандров, Л. Д. Цендин // Журнал технической физики. – 2005. – Т. 75. – Вып. 10. – С. 29-38.
4. Masuda, S. Pulse corona induced plasma chemical process: a horizon of new plasma chemical technologies / S. Masuda // Pure and Applied Chemistry. – 1988. – Vol. 60. – № 5. – P. 727-731.