

Исследование влияния холодной плазмы на смачиваемость и адгезионные свойства целлюлозной бумаги

И. Ю. Абдулхаков, А. В. Булович, В. Д. Ковалёв✉

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉vovimash@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются способы обработки целлюлозной бумаги и проблемы, связанные с неравномерной обработкой и вероятностью возникновения брака в связи с пробоем изоляции электрода при использовании коронного разряда, также представлены принципиальная схема источника питания и макет оснастки для генерации коронного разряда с линейным электродом. В качестве решения проблемы предлагается альтернативный способ обработки бумаги с помощью холодной плазмы, работающей при более низких температурах и требующей меньше энергии, что снижает риск термического повреждения материала, но при этом имеет идентичное коронному разряду физико-химическое воздействие на бумагу. Описание эксперимента по обработке бумаги холодной плазмой с целью определения оптимальных параметров обработки целлюлозной бумаги для повышения ее смачиваемости, мощности, времени обработки, расстояния от оснастки до обрабатываемой поверхности. Модификация поверхности проведена в атмосфере воздуха, оценка смачиваемости выполнена методом сидячей капли с последующей компьютерной обработкой изображений. Представлены методы и результаты обработки данных, полученных в ходе эксперимента, в виде графиков. Исходя из результатов экспериментов, установлено, что обработка холодной плазмой приводит к значительному снижению краевого угла смачивания водой – с исходных значений более 100 до 8–10° в оптимальном режиме, показано, что наибольшее влияние на результат оказывает мощность разряда. На основе эмпирического анализа получена математическая зависимость краевого угла от технологических параметров. Определен рациональный режим обработки, при котором достигается практически полное растекание капли (краевой угол менее 10°).

Ключевые слова: холодная плазма, коронный разряд, целлюлозная бумага, смачиваемость, краевой угол, адгезия, модификация поверхности, метод сидячей капли, активация поверхности

Для цитирования: Абдулхаков И. Ю., Булович А. В., Ковалёв В. Д. Исследование влияния холодной плазмы на смачиваемость и адгезионные свойства целлюлозной бумаги // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 7. С. 104–112. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-7-104-112.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Investigation of the Effect of Cold Plasma on the Wettability and Adhesive Properties of Cellulose Paper

I. Yu. Abdulkhakov, A. V. Bulovich, V. D. Kovalyov✉

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉vovimash@mail.ru

Abstract. The article discusses methods of processing cellulose paper and problems associated with uneven processing and the likelihood of defects due to breakdown of the electrode insulation when using a corona discharge, also presents a schematic diagram of a power source and a layout of equipment for generating a corona discharge with a linear with an electrode. As a solution to the problem, an alternative method of paper

processing is proposed using cold plasma, operating at lower temperatures and requiring less energy, which reduces the risk of thermal damage to the material, while having the same physico-chemical effect on paper as a corona discharge. This is followed by a description of an experiment on paper processing with cold plasma in order to determine the optimal parameters for processing cellulose paper to increase its wettability, power, processing time, and the distance from the tooling to the surface to be treated. Surface modification was carried out in an atmospheric environment, wettability assessment was performed by the sessile drop method followed by computer image processing. The methods and results of processing the data obtained during the experiment are presented in the form of graphs. Based on the experimental results, it was found that cold plasma treatment leads to a significant decrease in the marginal angle of wetting with water – from initial values of more than 100 to 8–10° in the optimal mode, it is shown that the discharge power has the greatest effect on the result. Based on empirical analysis, the mathematical dependence of the edge angle on the technological parameters is obtained. A rational treatment mode has been determined, in which almost complete spreading of the droplet is achieved (an edge angle of less than 10°).

Keywords: cold plasma, corona discharge, cellulose paper, wettability, contact angle, adhesion, surface modification, sessile drop method, surface activation

For citation: Abdulkhakov I. Yu., Bulovich A. V., Kovalyov V. D. Investigation of the Effect of Cold Plasma on the Wettability and Adhesive Properties of Cellulose Paper // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 7. P. 104–112. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-7-104-112.

Conflict of interests. The authors declare no conflicts of interests.

Введение. Целлюлозная бумага – это пористый, гидрофильный материал, состоящий в основном из сети целлюлозных волокон, связанных водородными связями [1]. Ее естественная поверхность, особенно если она не имеет покрытия, обладает умеренной адгезией из-за шероховатости и способности впитывать клеи. Однако для многих высокотехнологичных применений – таких, как ламинация, печать, нанесение функциональных покрытий, склеивание, естественной адгезии недостаточно.

Целлюлозно-бумажные материалы находят широкое применение в таких важных отраслях, как полиграфия, производство упаковки, композитных материалов и самоклеящихся изделий [2]–[4]. Ключевым требованием для большинства из них служит обеспечение высокой адгезии к поверхности бумаги различных субстанций: полиграфических красок, лаков, клеев. Качество нанесения и прочность сцепления этих материалов с подложкой напрямую определяют долговечность, экономию сырья, функциональность и цену конечного продукта.

Традиционные химические методы модификации поверхности бумаги часто сопряжены с использованием органических растворителей [5], сложными технологическими циклами и негативным воздействием на окружающую среду. В связи с этим все большую актуальность приобретают электрические методы активации поверхности [6], которые позволяют модифицировать поверхностный слой, глубиной в несколько нанометров, без изменения объемных свойств материала.

Один из таких методов – обработка коронным разрядом. Метод выделяется высокой скоростью обработки, возможностью прямой интеграции в существующие ролевые производственные линии, а также экологической безопасностью, так как в качестве основной активной среды используется атмосферный воздух. Воздействие коронного разряда на целлюлозные поверхности приводит к сложному комплексу процессов: ионной бомбардировке и воздействию активными частицами (озон, атомарный кислород, гидроксильные и гидропероксидные радикалы) [7]. В результате высокоэнергетического воздействия происходит частичное разрушение слабосвязанных органических компонентов и низкомолекулярных гидрофобных слоев, а также окисление поверхностных структур. Для целлюлозных материалов все это сопровождается образованием дополнительных полярных функциональных групп – таких, как гидроксильные (–OH), карбонильные (–C=O) и карбоксильные (–COOH) [8]. Совокупность указанных процессов приводит к росту поверхностной энергии, что выражается в снижении контактного угла смачивания, повышении гидрофильности и повышении адгезии покрытий, клеев и печатных красок к поверхности бумаги.

Для генерации коронного разряда был разработан и изготовлен макет генератора холодной плазмы, инициализированной коронным разрядом. В его структурная схема входят: источник питания, повышающий трансформатор и оснастка для генерации коронного разряда.

Источник питания (рис. 1) состоит:

– из амплитудного модулятора A_1 , построенного на основе понижающего buck конвертора, имеющего собственную замкнутую систему управления и позволяющего устанавливать выходное напряжение согласно уставке по напряжению;

– резонансного мостового инвертора напряжения с индуктивно-емкостным преобразователем. Индуктивно-емкостный преобразователь построен на основе элементов L_1 и C_3 и на частотах, близких к резонансным, позволяет реализовать режим мягкой коммутации инвертора, а также ограничить выходной ток инвертора при коротком замыкании нагрузки. Инвертор обладает собственной системой управления A_1 , генерирующей импульсы управления на частоте, близкой к резонансной, а также увеличивающей частоту инвертора при превышении выходного тока инвертора тока уставки. Перегрузка по току может возникнуть при холостом ходе инвертора в момент времени, когда коронный разряд на электродах (а соответственно, и потребление) еще не возник;

– повышающего трансформатора T_1 , позволяющего развивать необходимое для генерации коронного разряда напряжение. Коэффициент трансформации трансформатора равен 75.2.

Амперметр PA_1 и вольтметр PV_1 в составе модулятора позволяют визуально контролировать энергетический режим инвертора, а ввиду высокого значения его КПД – и режим разряда соответственно.

Условные обозначения на рис. 1: U_1 – выпрямитель; C_1 – C_3 – конденсаторы; L_1 – дроссель; VD_1 – диод; VT_1 – VT_4 – транзисторы; TA_1 –

трансформатор тока; A_1 – A_2 – система управления амплитудным модулятором.

При классическом методе обработки бумаги коронным разрядом к выходным выводам высоковольтного разряда подключены два электрода – коронирующий и диэлектрический. Коронирующий электрод, как правило, изготавливается из металлов, устойчивых к коррозии: алюминия, нержавеющей стали и т. д. Важнейшим условием для формирования коронного разряда служит наличие неоднородности электрического поля, ввиду чего коронирующие электроды имеют сложную геометрию: зубчатые, игольчатые, трапециевидные и т. д. Диэлектрический электрод, как правило, – это металлический вал (ролик), изолированный от коронирующего электрода диэлектрическим слоем (рукавом), изготовленным из силикона: толщина 3 мм, диапазон рабочих температур от -80 до $+250$ °С. Таким образом, при высокой неоднородности электрического поля и напряжении на выходных выводах высоковольтного трансформатора свыше 10 кВ в воздушном промежутке между электродами на коронирующем электроде под воздействием ударной ионизации начинает формироваться коронный разряд. Обработываемая бумага помещается в межэлектродное пространство – так происходит обработка бумаги коронным разрядом (рис. 2, а).

Однако при износе коронирующего электрода или при деградации диэлектрического рукава, а также при некорректной установке коронирующего электрода могут возникнуть локальные пробои изоляции, выраженные возникновением дугового разряда (рис. 2, б). Дополнительно ввиду несовершенств собственноручно сделанной

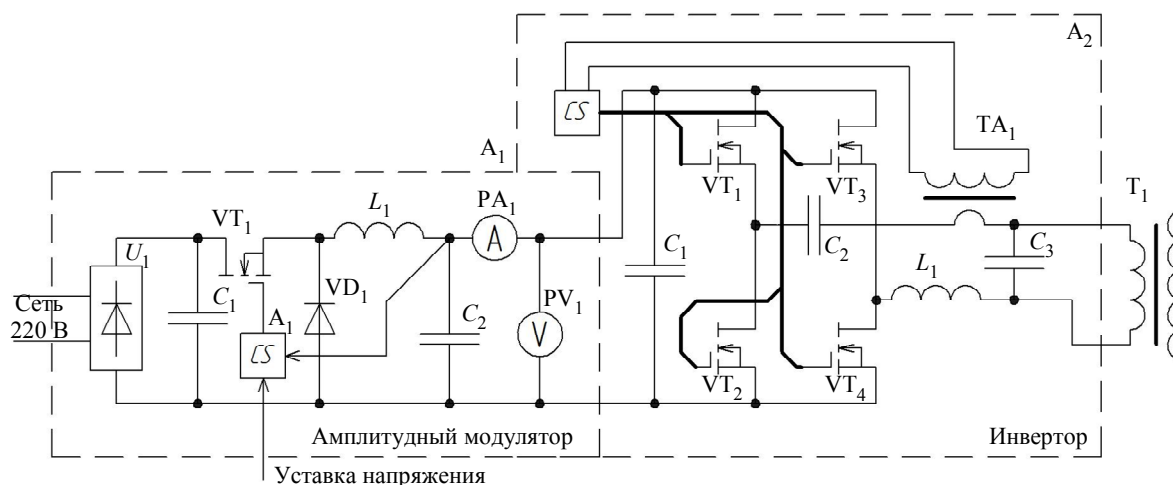


Рис. 1. Принципиальная схема источника питания
Fig. 1. Schematic diagram of the power supply

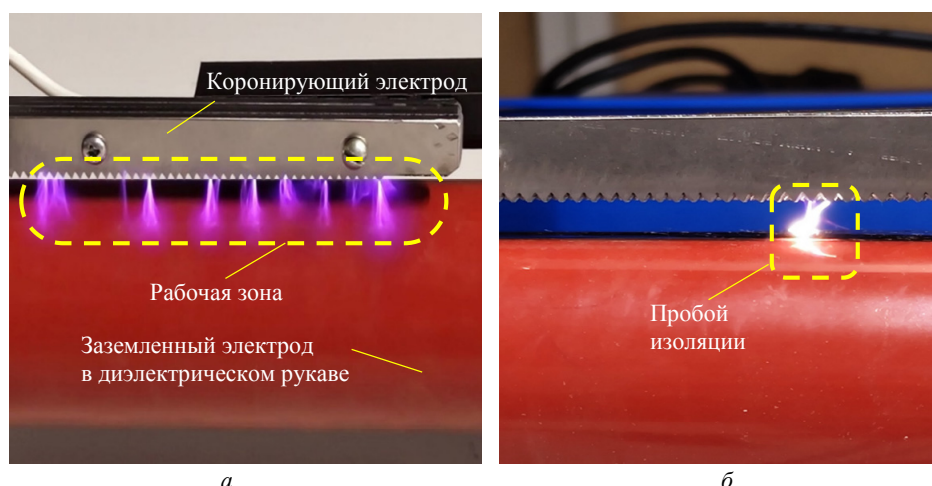


Рис. 2. Макет оснастки для генерации коронного разряда с линейным электродом:
 а – устройство макета оснастки для генерации коронного разряда; б – пробой изоляции
 Fig. 2. A mock-up of a corona discharge generating rig with a linear electrode:
 а – a mock-up of a corona discharge generating rig; б – an isolation breakdown

оснастки часто наблюдался пробой изоляции, что приводило к возникновению дугового разряда. При формировании дугового разряда выделяется значительное количество тепловой энергии, вследствие чего происходит прогорание обрабатываемой бумаги под действием дугового разряда.

Таким образом, обработка бумаги на установках классической коронной требует учета и соблюдения ряда технологических требований, а именно поддержания элементов установки в должном состоянии (своевременная замена электродов и диэлектрических рукавов), а также соблюдения равномерности мощности коронного разряда. Поддержание элементов установки в рабочем состоянии обеспечивается своевременной заменой коронирующего электрода, а также диэлектрического рукава, что ведет к остановке технологической линии, тем самым сокращая объемы производства. Поддержание равномерности мощности коронного разряда требует достаточно сложных схемотехнических и технологических решений. В данном случае не самая удачная конструкция, сделанная авторами этой статьи, особенно усугубляла все негативные эффекты.

В качестве альтернативы классической обработке коронным разрядом была выбрана обработка бумаги холодной плазмой, инициализированной коронным разрядом. В отличие от традиционной обработки, холодная плазма работает при более низких температурах и требует меньше энергии, что снижает риск термического повреждения материала, при этом имеет идентичное коронному разряду физико-химическое воздействие на бумагу [9]. Устройство генерации холодной плазмы состоит из корпуса, двух корониру-

ющих электродов, держателей электродов и вентилятора с возможностью регулировки (рис. 3).

Проведение эксперимента и обработка результатов. Представлены результаты исследования по модификации поверхности бумаги холодной плазмой при атмосферном давлении с целью повышения ее смачиваемости и адгезионных свойств в среде атмосферного воздуха. Воздух выступает в качестве рабочего газа, в котором под действием коронного разряда генерируется холодная плазма, содержащая активные частицы: атомарный кислород озон, возбужденные молекулы азота, ионы, электроны.

Целью данного исследования было установление оптимальных параметров обработки бумаги (марка SvetoCopy класс С, $72-80 \pm 2-3$ г/м²) холодной плазмой воздуха для достижения максимального повышения ее смачиваемости, оцениваемого через минимизацию краевого угла в контакте с водой.

Для проведения экспериментов использовались образцы бумаги, порезанной на одинаковые части. Первоначально на источнике питания плазматрона задавалась мощность: 180, 270, 340, 440, 540 Вт, после чего плазматрон выключался. Образцы исследуемой бумаги устанавливались перед соплом плазматрона на заданном расстоянии: 10, 20, 30, 40 мм. Далее на плазматрон подавалось питание и образцы обрабатывались на протяжении 1, 2, 3, 4, 5 с. По окончании обработки исследовалась смачиваемость образцов методом сидячей капли [10]. На рис. 3 представлен процесс обработки образца бумаги (SvetoCopy класс С) плазматроном, выходные параметры холодной плазмы: частота – 20 кГц, напряжение – 15 кВ, мощность – 340 Вт.

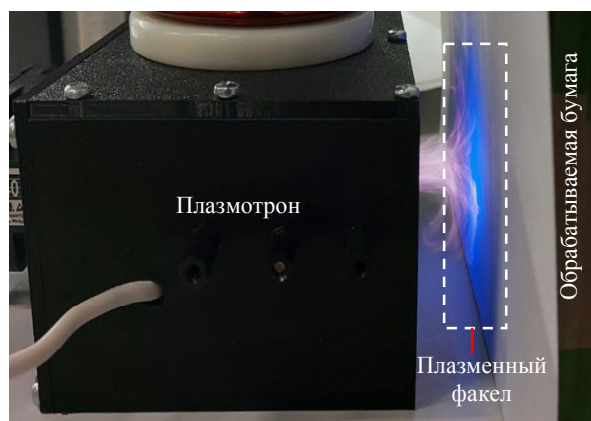


Рис. 3. Макет оснастки
Fig. 3. Experimental equipment

Для определения смачиваемости поверхности бумаги на образцы наносились капли воды методом сидячей капли. Фотофиксация капель выполнялась для последующего анализа с целью определения площади зоны, обработанной холодной плазмой. В результате эксперимента зона обработки (рис. 4) составила: 900 мм² при мощности 180 Вт; 1600 мм² при мощности 340 Вт; 2500 мм² при мощности 540 Вт, что равняется площади плазменного факела 180 Вт, выдуваемого плазмотроном.

Для количественной оценки изменений поверхностных свойств бумаги на поверхность обработанного образца наносилась капля воды объемом 0.05 мл, для фиксации результата проводилась фотосъемка образца, после чего в программном обеспечении ImageJ измерялся угол смачиваемости θ (рис. 5).

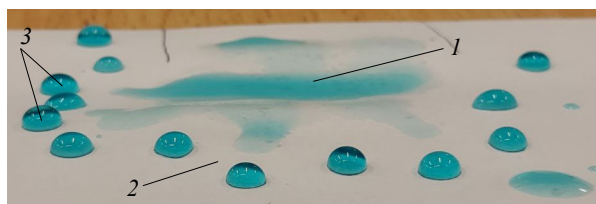


Рис. 4. Обработанная бумага: 1 – обработанный участок;
2 – необработанный участок;
3 – капли воды с красителем

Fig. 4. Processed paper: 1 – processed area;
2 – untreated area; 3 – drops of water with dye

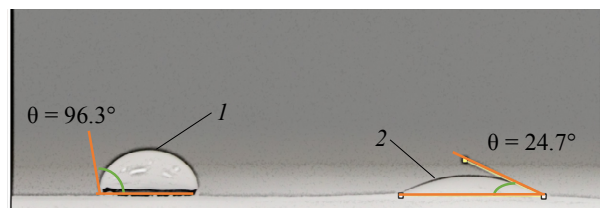


Рис. 5. Измерение угла смачивания в программном обеспечении ImageJ: 1 – капля на необработанном участке; 2 – капля на обработанном участке
Fig. 5. Measurement of the wetting angle in ImageJ software: 1 – drop in the untreated area; 2 – drop in the treated area

Результаты исследования. Таким образом, было получено достаточное количество данных для построения графиков зависимости краевого угла смачиваемости от времени обработки, мощности плазмотрона и расстояния между соплом плазмотрона и поверхностью обрабатываемого образца. На рис. 6 представлены графики зависимости краевого угла смачиваемости от времени обработки t и мощности плазмотрона P при различных расстояниях L .

Из графиков, представленных на рис. 6, следует, что с увеличением мощности плазмотрона время, необходимое для существенного снижения краевого угла смачиваемости, сокращается. Однако при увеличении расстояния между плазмотроном и поверхностью бумаги требуется затратить гораздо больше времени на обработку поверхности при равной мощности для достижения аналогичных показателей угла смачиваемости.

Следует отметить, что при проведении экспериментов и измерений присутствует ряд погрешностей: при измерении угла смачиваемости, нанесении капель на образцы, замере времени, распределении плотности мощности плазмы. Несмотря на погрешности экспериментальных данных, отчетливо прослеживается тенденция распределения угла смачиваемости в зависимости от времени, мощности и расстояния. Для получения качественных и количественных результатов исследования необходимо провести аппроксимацию данных, а также эмпирическим путем определить зависимости данных друг от друга.

По результатам эмпирического анализа была выведена формула зависимости краевого угла θ от расстояния L , мощности P и времени t :

$$\theta = 90 - 110(1 - e^{-P/90}) \cdot e^{-L/45}(1 - e^{-t/0.6}).$$

Таким образом, рассчитав данные по эмпирической формуле для каждого типа данных: угла смачиваемости от времени, мощности и расстояния от оснастки до обрабатываемой поверхности, получили графики, для лучшей наглядности и восприятия в 3D (рис. 7).

Обсуждение результатов. Опираясь на данные исследований, можно наблюдать оптимум с точки зрения времени мощности обработки. Из графиков следует, что обработка бумаги на расстоянии 30 и 40 мм нецелесообразна ввиду рассеивания мощности плазменной струи в воздушном пространстве, из-за чего угол смачиваемости снижается лишь до 30–40°, что представляет

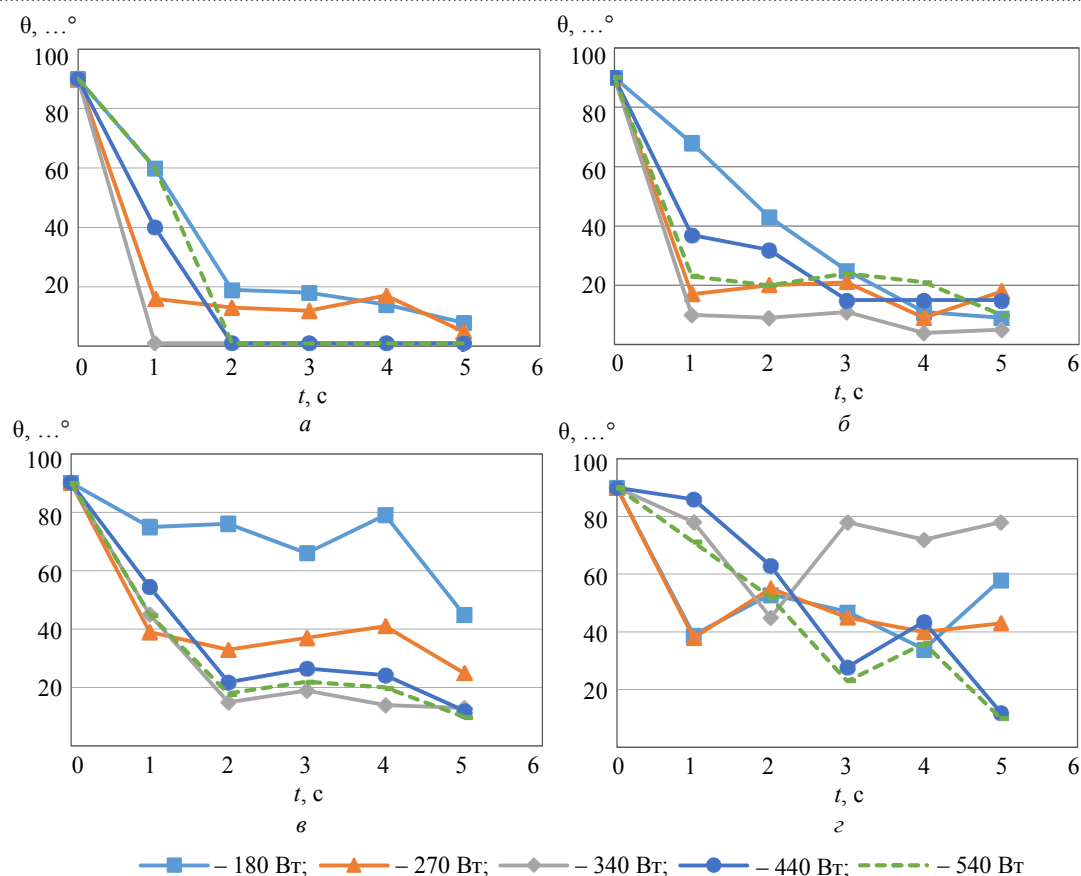


Рис. 6. Зависимость краевого угла смачиваемости от времени обработки и мощности плазматрона при разных расстояниях между соплом плазматрона и поверхностью образца, при L , мм: а – 10; б – 20; в – 30; г – 40

Fig. 6. The dependence of the wettability edge angle on the processing time and the power of the plasma torch at different distances between the nozzle of the plasma torch and the sample surface, at L , mm: а – 10; б – 20; в – 30; г – 40

неудовлетворительный результат для показателей гидрофильности. Наиболее целесообразна обработка поверхности на расстоянии 10 мм, в данном случае достигается снижение угла смачиваемости до 10° при минимальной мощности и времени испытаний. Отталкиваясь от определения оптимального расстояния обработки, определяется оптимальная мощность и время. При мощности от 300 Вт и выше угол смачивания достигает значений в 0° уже при 1-секундной обработке, что свидетельствует о высокой гидрофильности поверхности. Мощность выше 330 Вт использовать нецелесообразно с учетом соблюдения энергетических и экономических параметров.

Выводы и заключение. В ходе написания работы был проведен ряд экспериментов по обработке бумаги холодной плазмой, инициализированной коронным разрядом. На основе результатов экспериментов и аппроксимации данных было выявлено оптимальное время, мощность, а также расстояние от оснастки до обрабатываемой поверхности. Данное технологическое решение

имеет ряд преимуществ над классической обработкой бумаги коронным разрядом ввиду отсутствия непосредственного контакта высоковольтных электродов с обрабатываемой поверхностью, что исключает риск пробоя диэлектрического слоя, возникновения дуговых разрядов и термического повреждения бумаги.

В результате проведенных исследований установлено, что обработка холодной плазмой позволяет снизить краевой угол смачивания с исходных значений более 90° до $1\text{--}8^\circ$ и менее, что свидетельствует о значительном повышении гидрофильности и, как следствие, адгезионной способности поверхности. Экспериментально подтверждено, что ключевые параметры процесса – это мощность разряда, расстояние до образца и время обработки поверхности бумаги. Наиболее эффективным признан режим с мощностью 300...340 Вт, расстоянием 10 мм и временем обработки 1 с, при котором достигается практически полное растекание капли. Эмпирически полученная математическая модель зависимости

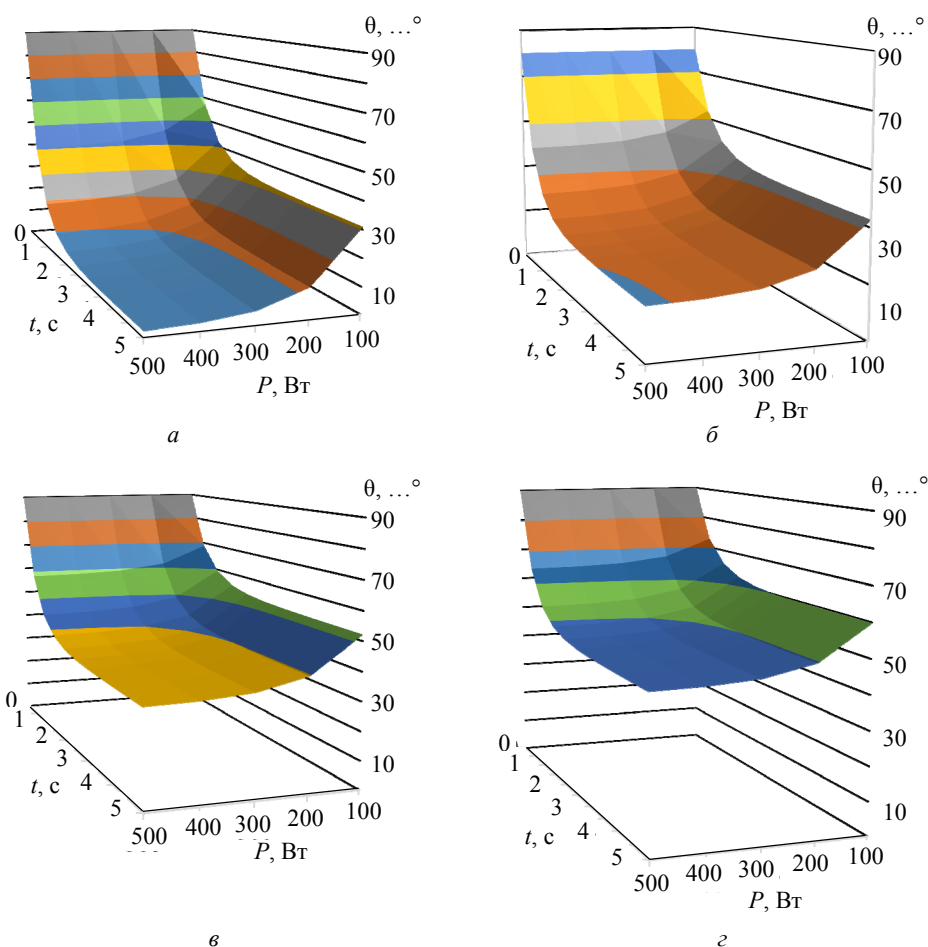


Рис. 7. Зависимость краевого угла смачиваемости от времени обработки и мощности плазматрона при разных расстояниях между соплом плазматрона и поверхностью образца, при L , мм:

$a - 10$; $б - 20$; $в - 30$; $г - 40$. Данные получены эмпирическим путем

Fig. 7. The dependence of the wettability edge angle on the processing time and the power of the plasma torch at different distances between the nozzle of the plasma torch and the sample surface, at L , mm:

$a - 10$; $б - 20$; $в - 30$; $г - 40$. The data were obtained empirically

краевого угла от технологических параметров описывает экспериментальные данные и может быть использована для прогнозирования результатов обработки в заданных диапазонах. Анализ показал, что увеличение расстояния свыше 30 мм приводит к резкому снижению эффективности процесса обработки из-за рассеяния плазменной

струи, что делает обработку на дистанциях 30–40 мм нецелесообразной. Полученные результаты подтверждают перспективность использования холодной плазмы атмосферного давления как высокоэффективного метода активации поверхности целлюлозно-бумажных материалов.

Список литературы

1. Halil T. S., Mustafa B. A. A study on physical and chemical properties of cellulose paper immersed in various solvent mixtures // Intern. J. Mol. Sci. 2008. Vol. 9, no. 1. P. 78–88. doi: 10.3390/ijms9010078.
2. Васерчук Ю. А. Роль бумаги в дизайне печатной продукции // Преподаватель XXI. 2012. № 2–1. С. 176–185.
3. Grant J., Young J., Waston B. G. Paper and board manufacture: A general account of its history, processes, and applications. London: British paper and board industry federation, Technical division, 1978. P. 166–183.

4. Вилсон Л. А. Что полиграфист должен знать о бумаге: [прием и хранение бумаги, листовая офсет. бумага в печат. процессе, рулон. бумага в печат. процессе, эксплуатац. требования, классификация, спецификация, рекламации по бумаге, технология и контроль, изготовление бумаги] / пер. с англ. и науч. ред. Е. Д. Климовой. М.: Принт-Медиа центр, 2005. С. 111–133.

5. Ершова О. В., Чупрова Л. В. Способы химической модификации целлюлозы с целью создания новых композиционных материалов // Междунар. журн.

прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 10(3). С. 359–362.

6. Перепелкина А. А., Галиханов М. Ф., Мусина Л. Р. Модификация бумаги в целях повышения ее эксплуатационных свойств // Изв. вузов. Лесной журн. 2013. № 6. С. 129–134.

7. Балыкин М. В., Козачук Л. В., Тимушкина Н. В. Изменение газового состава среды в зоне коронного разряда и его влияние на респираторную систему // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 3. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=20171> (дата обращения: 09.03.2026).

8. The effect of surface modifications with corona discharge in pinus and eucalyptus nanofibril films /

T. A. Lopes, L. C. Bufalino, P. I. C. Claro, M. A. Martins, G. H. D. Tonoli, L. M. Mendes // Cellulose. 2018. Vol. 25, no. 9. P. 5017–5033. doi: 10.1007/s10570-018-1948-3.

9. Гришин И. А. Холодная атмосферная плазма: инновационный инструмент для агропромышленного комплекса, экологии // Вестн. науки. 2025. Т. 5, № 8 (89). С. 311–318. URL: <https://www.vestnik-nauki.rf/article/25497> (дата обращения: 09.03.2026).

10. Измерение краевого угла методом сидячей капли на вертикальной поверхности / А. В. Нуштаева, К. С. Мельникова, К. М. Просвирнина, С. А. Нуштаева // Фундаментальные исследования. 2015. № 2 (ч. 13) С. 2855–2859.

Информация об авторах

Абдулхаков Ильяс Юсыфович – канд. техн. наук, доцент кафедры электротехнологической и преобразовательной техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: abdulhakov.iljas@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0000-3122-8604>

Булович Артемий Витальевич – инженер кафедры электротехнологической и преобразовательной техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: mr14092000@gmail.com

Ковалёв Владимир Дмитриевич – студент гр. 1401 СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: vovimash@mail.ru

References

1. Halil T. S., Mustafa B. A. A study on physical and chemical properties of cellulose paper immersed in various solvent mixtures // Intern. J. Mol. Sci. 2008. Vol. 9, no. 1. P. 78–88. doi: 10.3390/ijms9010078.

2. Vaserchuk Ju. A. Rol' bumagi v dizajne pechatnoj produkcii // Prepodavatel' XXI. 2012. № 2–1. S. 176–185. (In Russ.).

3. Grant J., Young J., Waston B. G. Paper and board manufacture: a general account of its history, processes, and applications. London: British paper and board industry federation, Technical division, 1978. P. 166–183.

4. Vilson L. A. Chto poligrafist dolzhen znat' o bumage: [prijom i hranenie bumagi, listovaja ofset. bumaga v pechat. processe, rulon. bumaga v pechat. processe, jekspluat. trebovanija, klassifikacija, specifikacija, reklamicii po bumage, tehnologija i kontrol', izgotovlenie bumagij] / per. s angl. i nauch. red. E. D. Klimovoj. M.: Print-Media centr, 2005. S. 111–133. (In Russ.).

5. Ershova O. V., Chuprova L. V. Sposoby himicheskoy modifikacii celljulozy s cel'ju sozdaniya novyh kompozicionnyh materialov // Mezhdunar. zhurn. prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij. 2016. № 10(3). S. 359–362. (In Russ.).

6. Perpelkina A. A., Galihanov M. F., Musina L. R. Modifikacija bumagi v celjah povyshenija ee jeksplu-

atcionnyh svojstv // Izv. vuzov. Lesnoj zhurn. 2013. № 6. S. 129–134. (In Russ.).

7. Balykin M. V., Kozachuk L. V., Timushkina N. V. Izmenenie gazovogo sostava sredy v zone koronnogo razrjada i ego vlijanie na respiratornuju sistemu // Sovremennye problemy nauki i obrazovanija. 2015. № 3. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=20171> (data obrashhenija: 09.03.2026). (In Russ.).

8. The effect of surface modifications with corona discharge in pinus and eucalyptus nanofibril films / T. A. Lopes, L. C. Bufalino, P. I. C. Claro, M. A. Martins, G. H. D. Tonoli, L. M. Mendes // Cellulose. 2018. Vol. 25, no. 9. P. 5017–5033. doi: 10.1007/s10570-018-1948-3.

9. Grishin I. A. Holodnaja atmosfernaja plazma: inovationnyj instrument dlja agropromyshlennogo kompleksa, jekologii // Vestn. nauki. 2025. Т. 5, № 8 (89). S. 311–318. URL: <https://www.vestnik-nauki.rf/article/25497> (data obrashhenija: 09.03.2026). (In Russ.).

10. Izmerenie kraevogo ugla metodom sidjachej kapli na vertikal'noj poverhnosti / A. V. Nushtaeva, K. S. Mel'nikova, K. M. Prosvirnina, S. A. Nushtaeva // Fundamental'nye issledovanija. 2015. № 2 (ch. 13) S. 2855–2859. (In Russ.).

Information about the authors

Ilyas Yu. Abdulkhakov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electrotechnological and Transformative Engineering, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: abdulkhakov.iljas@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0000-3122-8604>

Artemiy V. Bulovich – engineer of the Department of Electrotechnological and Transformative Engineering, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: mr14092000@gmail.com

Vladimir D. Kovalyov – student gr. 1401 Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: vovimash@mail.ru

Статья поступила в редакцию 30.03.2026; принята к публикации после рецензирования 02.06.2026; опубликована онлайн 28.09.2026.

Submitted 30.03.2026; accepted 02.06.2026; published online 28.09.2026.
