

## Разработка системы автоматической обработки поверхностей материалов коронным разрядом для создания микрофлюидных систем

М. А. Лысюк, М. А. Шубина, В. В. Гульванский, Д. И. Каплун,  
М. Ю. Шестопалов, Н. О. Ситков✉

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

✉ [sitkov93@yandex.ru](mailto:sitkov93@yandex.ru)

**Аннотация.** Предложена автоматизированная система обработки материалов микрофлюидных систем (МФС) коронным разрядом на основе аппарата Дарсонваль в сочетании с числовым программным управлением для точного позиционирования рабочего электрода. Автоматизация процесса позволила обеспечить равномерную модификацию поверхности, что улучшает адгезию и снижает риск возникновения дефектов в многослойных МФС, функциональные слои которых соединяются методом термокомпрессионного связывания. Программное обеспечение предусматривает задание формы и размеров заготовки для обрабатываемого материала, а также регулировку скорости обработки. Предложены технические решения, позволившие обеспечить защиту устройства от помех, вызываемых генератором коронного разряда. Экспериментальные результаты показали, что обработка коронным разрядом эффективно уменьшает углы смачиваемости поверхности широко используемых в технологии микрофлюидики полимерных материалов, что является важным для микрофлюидных приложений. Разработанная автоматизированная система также снижает временные затраты на производство и обеспечивает более высокую воспроизводимость, значительно уменьшая влияние человеческого фактора при микрофабрикации, что особенно важно для мелкосерийного прототипирования МФС.

**Ключевые слова:** микрофлюидика, обработка материалов, автоматизированные системы, угол смачивания, электромагнитные помехи, микроконтроллеры, числовое управление

**Для цитирования:** Разработка системы автоматической обработки поверхностей материалов коронным разрядом для создания микрофлюидных систем / М. А. Лысюк, М. А. Шубина, В. В. Гульванский, Д. И. Каплун, М. Ю. Шестопалов, Н. О. Ситков // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 10. С. 59–67. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-10-59-67.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00003-24-01 от 08.02.2024 (проект FSEE-2024-0003).

**Благодарность.** Н. О. Ситков выражает благодарность Российскому научному фонду за грантовую поддержку работы, проект № 23-79-01136, <https://rscf.ru/project/23-79-01136/>.

Original article

## Development of Automated Corona Discharge Treatment System for Material Surfaces Used in Microfluidic Systems

М. А. Lysyuk, М. А. Shubina, V. V. Gulvansky, D. I. Kaplun,  
M. Yu. Shestopalov, N. O. Sitkov✉

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ [sitkov93@yandex.ru](mailto:sitkov93@yandex.ru)

**Abstract.** In this paper, we propose an automated system for processing microfluidic system (MFS) materials by corona discharge based on the Darsonval device in combination with numerical control for precise positioning of

the working electrode. Automation of the process ensures uniform surface modification, which improves adhesion and reduces the risk of defects in multilayer MFS, the functional layers of which are connected by thermo-compression bonding. The software allows setting the shape and size of the workpiece for the material being processed, as well as regulating the processing speed. Technical solutions are proposed that ensure protection of the device from interference caused by the corona discharge generator. Experimental results have shown that corona discharge treatment effectively reduces the surface wetting angles of polymeric materials widely used in microfluidics technology, which is important for microfluidic applications. The developed automated system also reduces production time costs and ensures higher reproducibility, significantly reducing the influence of the human factor during microfabrication, which is especially important for small-scale prototyping of MFS.

**Keywords:** microfluidics, material processing, automated systems, contact angle, electromagnetic interference, microcontrollers, numerical control

**For citation:** Development of Automated Corona Discharge Treatment System for Material Surfaces Used in Microfluidic Systems / M. A. Lysyuk, M. A. Shubina, V. V. Gulvansky, D. I. Kaplun, M. Yu. Shestopalov, N. O. Sitkov // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 10. P. 59–67. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-10-59-67.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Financing:** The work was completed within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 075-00003-24-01 dated 08/02/2024 (FSEE-2024-0003 project).

**Gratitude:** N. O. Sitkov expresses gratitude to the Russian Scientific Foundation for grant support of the work, project No. 23-79-01136, <https://rscf.ru/project/23-79-01136/>.

**Введение.** Микрофлюидные системы (МФС) в настоящее время относятся к наиболее востребованным исследовательским инструментам в нанотехнологии, биомедицине, аналитической химии, материаловедении и т. д. [1]–[4]. Для создания МФС применяется широкий спектр материалов, включая полимеры, стекло и кремний [5], [6], что позволяет адаптировать их свойства под конкретные задачи и условия эксплуатации. Технологии изготовления МФС должны обеспечивать возможность создания микроструктур с высокой точностью и функциональностью, а также обеспечивать возможность интеграции различных материалов, клеток, тканей и сенсорно-актюаторных элементов. В ряде случаев МФС может представлять собой гетерогенно-интегрированную структуру из материалов и компонентов различной физико-химической природы. Для соединения функциональных слоев микрофлюидных систем используют такие технологии, как термокомпрессионное связывание, клеевое соединение, фотополимеризацию и др. [7], [8]. При этом необходимо добиться высокой герметичности соединения, для чего применяют различные способы активации поверхности [9], [10], которая улучшает их адгезию и функциональные свойства. Коронный разряд, обладающий способностью эффективно модифицировать поверхности как неорганических, так и полимерных материалов относится к перспективным решениям данной задачи.

Учитывая специфичность технологии, на рынке имеется крайне ограниченное количество технических решений, полностью удовлетворяющих потребности в мелкосерийном прототипировании гибридно-интегрированных многослойных МФС. В частности, для решения активации поверхности материалов МФС используются промышленные коронаторы или применяемые в технологии микроэлектроники системы плазменной обработки [11]. Технология обработки коронным разрядом требует тщательного контроля параметров таких процессов, как расстояние до образца, скорость перемещения рабочего электрода и время обработки, чтобы обеспечить равномерную модификацию поверхности, что сложно обеспечить в ручном режиме, поэтому особенно важны ее автоматизация и интеграция в процессы микрофлюидных технологий.

В настоящей статье представлен вариант технической реализации автоматизированной системы обработки коронным разрядом материалов, используемых при изготовлении функциональных слоев микрофлюидных систем. Создание таких систем позволит не только повысить эффективность и качество производства прототипов МФС, но и ускорить внедрение микрофлюидных технологий в различные области, включая медицину и биотехнологии.

**Конструкция экспериментального образца автокоронатора.** Обработка поверхности коронным разрядом происходит в резко неоднородных

электрических полях, где высокая напряженность поля вызывает локальную ионизацию среды, а быстрое снижение напряженности предотвращает пробой межэлектродного пространства [12]. В результате образуется трехфазная среда из ионов, заряженных частиц и нейтрального газа, что создает ток коронного разряда.

Ключевое преимущество технологии обработки коронным разрядом заключается в его способности изменять поверхностные свойства материалов, улучшая их адгезионные характеристики. В отличие от традиционной плазменной обработки, коронный разряд работает при более низких температурах и требует меньше энергии, что снижает риск термического повреждения материалов. Это делает процесс обработки более экономичным и доступным для широкого применения.

Коронный разряд также генерирует на поверхности обрабатываемого материала активные компоненты – свободные электроны и радикалы, которые способствуют ее более эффективной химической модификации. Это позволяет улучшить связывание полимеров, превращая гидрофобные поверхности в гидрофильные, что особенно важно при создании МФС, где требуется точное управление потоками жидкости.

Обработка коронным разрядом не требует сложного оборудования или специальных условий – таких, как вакуумные системы, поэтому в качестве устройства генерации коронного разряда использовали аппарат Дарсонваль Карат ДЕ-212 (Российская Федерация). Устройство позволяет подавать на вакуумный электрод переменное напряжение в преде-

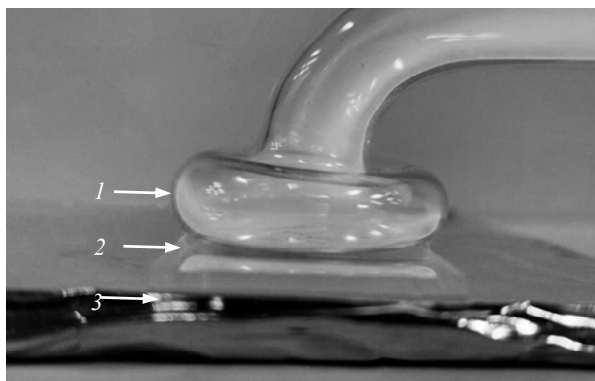


Рис. 1. Обработка слоя полимерной микрофлюидной системы коронным разрядом: 1 – рабочий электрод аппарата Карат ДЕ-212; 2 – полимерная подложка; 3 – заземленный электрод из алюминия

лах от 2 до 15 кВ. Обрабатываемая поверхность расположена между заземленным и рабочим электродами аппарата (рис. 1).

Для автоматизации обработки функциональных слоев МФС аппарат Дарсонваль был сопряжен с системой на основе миниатюрного фрезерного станка с числовым программным управлением CNC 3018 pro (Китай), которая позволяет с высокой точностью управлять перемещением рабочего электрода аппарата в трех плоскостях [13], [14].

На рабочую поверхность станка был установлен плоский электрод из алюминия (рис. 2) толщиной 1 мм, соединенный с заземляющим контуром для создания нулевого потенциала и защиты оператора от поражения электрическим током. Конструкция соединяется с направ-



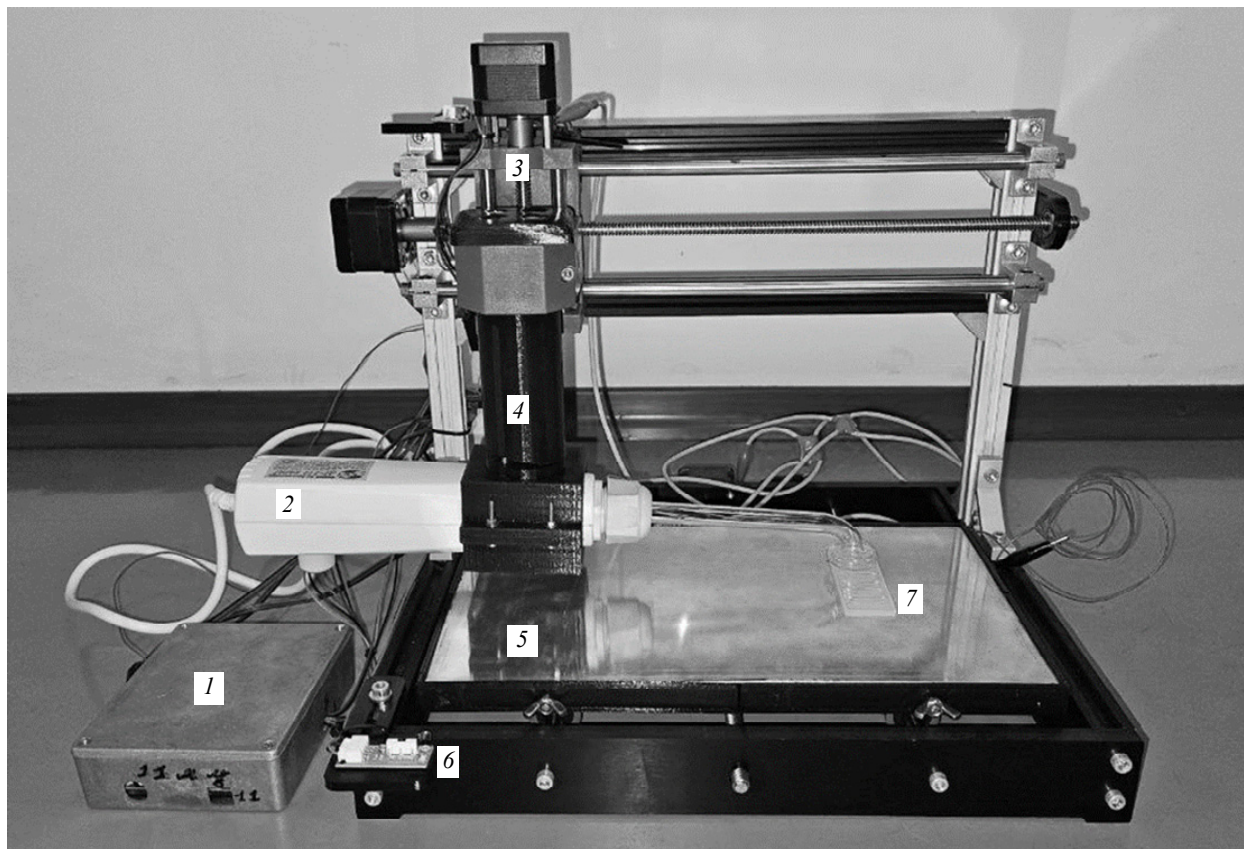
Рис. 2. Рабочая поверхность установки для автоматической обработки коронным разрядом на основе заземленного электрода из алюминия

Fig. 2. Working surface of the installation an automatic corona discharge treatment based on a grounded electrode made of aluminum

ляющими винтами шагового двигателя с помощью линейных подшипников. Для обеспечения точности управления рабочим электродом по всей поверхности заземленного электрода станок модифицирован концевыми выключателями для каждой из осей передвижения.

Одна из ключевых задач при интеграции данного оборудования состоит в корректной настройке параметров микроконтроллера ATmega328, управляющего шаговыми двигателями через драйверы A4988, что обеспечивает высокоточное позиционирование электрода аппарата Дарсонваль относительно обрабатываемой детали ПММА. Использование библиотеки программного обеспечения GRBL 1.1 в данном контексте служит основой для управления станком через стандартные команды, которые легко интерпретируются программным обеспечением XLoader. Для обеспечения корректного функционирования системы необходимо настроить ряд параметров GRBL. Например, активация программных ограничений системы координат и концевых выключателей помогает предотвратить выход за пределы рабо-

чего диапазона, что критично при работе с деталями МФС нестандартной формы. Установка домашней позиции с последующей калибровкой осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  задает точные шаги перемещения, что непосредственно влияет на качество и точность обработки. Основным инструментом программирования установки служит G-код, который задает последовательность перемещений и действий аппарата. Важно обеспечить, чтобы команды – задание системы координат (G90), использование метрической системы (G21), начальное перемещение в безопасное положение (G00 X0 Y0 Z0) и т. п., были корректно сформулированы для каждого типа обрабатываемой детали МФС. Это минимизирует риск сбоев и ошибок в процессе работы. При программировании траектории перемещения рабочего электрода аппарата Дарсонваль по поверхности подложки особое внимание уделяется скорости и точности перемещения, поскольку от этого зависит равномерность и эффективность обработки коронным разрядом. Благодаря гибкости программного управления в созданном устройстве достаточно просто изменять пара-



*Рис. 3. Система автоматической обработки поверхностей материалов коронным разрядом для создания микрофлюидных систем в сборке: 1 – блок управления в защитном кожухе; 2 – аппарат Дарсонваль Карат ДЕ-212; 3 – система перемещения на основе шаговых двигателей; 4 – держатель; 5 – рабочая поверхность с заземлением; 6 – концевой переключатель; 7 – обрабатываемый образец*

*Fig. 3. Automatic corona discharge surface treatment system for creating microfluidic systems in assembly: 1 – control unit in a protective casing; 2 – Darsonval Karat DE-212 apparatus; 3 – movement system based on stepper motors; 4 – holder; 5 – working surface with grounding; 6 – limit switch; 7 – treated sample*

метры обработки для различных типов материалов и геометрий структурных слоев МФС.

Итоговый вид разработанной системы в сборе представлен на рис. 3.

При первом запуске установки с аппаратом Дарсонваль, включенным на полную мощность, наблюдалась потеря соединения платы управления с компьютером и происходило отключение питания. Сильные наводки от прибора блокировали работу станка и делали невозможным программное управление перемещением рабочего электрода. Для успешной работы установки необходимо учитывать характер возникающих помех и применять соответствующие меры их подавления.

В разработанном стенде источником помех служит система, генерирующая коронный разряд с частотой 100 Гц и амплитудой 15 кВ. Electroды аппарата, включая заземленный, создают электромагнитное поле (ЭМП), длина волны которого составляет  $\sim 3 \cdot 10^6$  м. Это указывает на нахождение стенда в ближней зоне источника поля, где основные характеристики ЭМП зависят от параметров самого источника. Поскольку по заземленному электроду протекает небольшой

ток при высоком напряжении, доминируют емкостные и статические помехи [15], [16]. Для их устранения управляющая плата была помещена в металлический корпус, который обеспечивает надежное экранирование. Корпус соединен с системой заземления, сопряженной с корпусами шаговых двигателей и металлическими элементами каркаса устройства. Это позволило снизить влияние емкостных помех за счет шунтирования токов и уравнивания потенциалов всех металлических частей установки. Примененная система заземления не только уменьшила воздействие помех, обеспечив полноценное функционирование системы, но и повысила безопасность эксплуатации стенда, устранив возможные накопления статического заряда на металлических поверхностях.

**Тестирование разработанной системы.** Для тестирования работоспособности созданной автоматизированной системы был исследован ряд материалов, широко применяемых в технологии микрофлюидики: поливинилхлорид (ПВХ), предметное стекло, полипропилен (ПП), полиметилметакрилат (ПММА) и полиэтилентерефталат (ПЭТ). Активация поверхности приводит к уве-

Значения углов смачиваемости поверхностей материалов после автоматизированной обработки коронным разрядом аппарата Дарсонваль Карат ДЕ-212

Wetting angles of material surfaces after automated corona discharge treatment using a Darsonval Karat DE-212 device

$t$ , мин	$\theta_{\text{ПММА}}, \dots^\circ$	$\theta_{\text{ПЭТ}}, \dots^\circ$	$\theta_{\text{ПП}}, \dots^\circ$	$\theta_{\text{ПВХ}}, \dots^\circ$	$\theta_{\text{стекло}}, \dots^\circ$
0	78.1	90.2	82.5	76.2	28.4
1	49.6	44.7	54.3	50.8	7.6
2	33.4	41.1	43.4	37.5	0.1
3	31.2	35.3	42.9	31.3	0.2
4	29.1	30.4	41.8	28.6	0.1

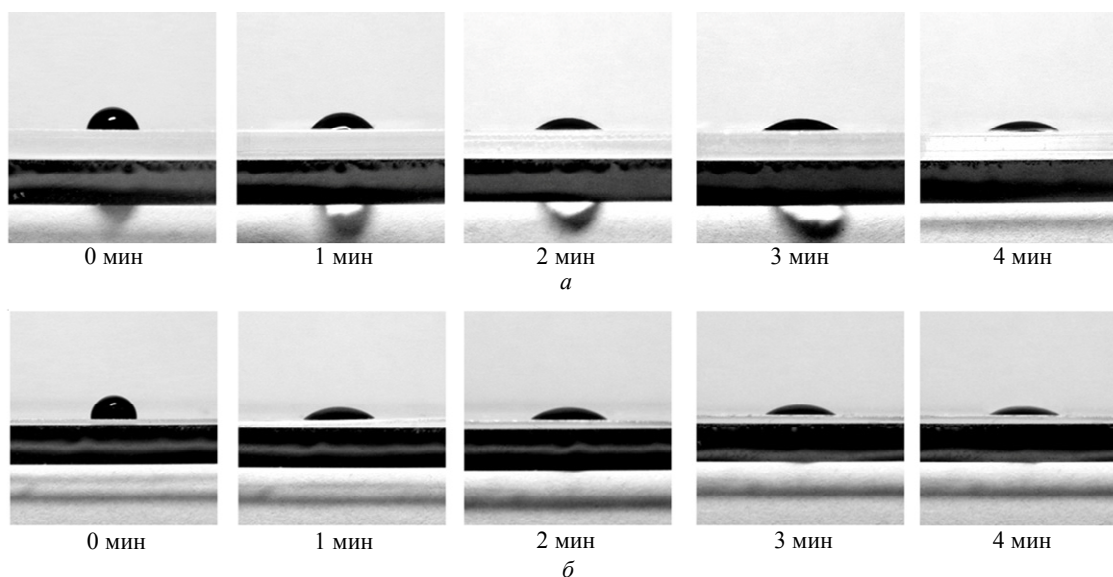


Рис. 4. Измерение углов смачивания поверхностей ПММА (а) и ПЭТ (б) в зависимости от времени автоматизированной обработки образца коронным разрядом с помощью аппарата Дарсонваль Карат ДЕ-212  
Fig. 4. Measurement of wetting angles of the PMMA (a) and PET (b) surfaces depending on the time of automated corona discharge treatment of the sample using the Darsonval Karat DE-212 device

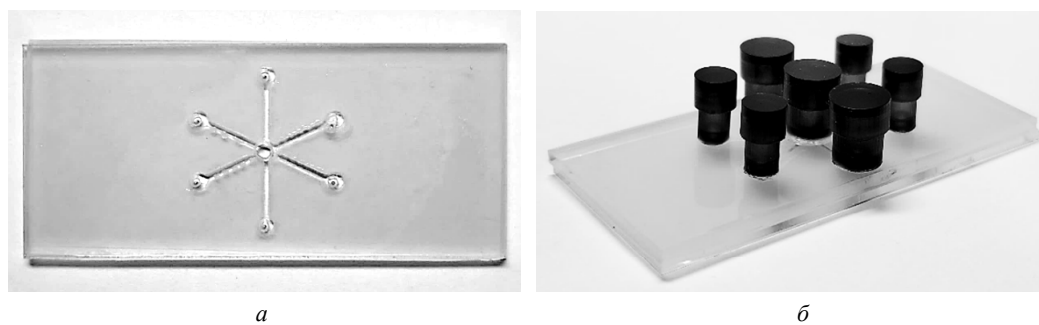


Рис. 5. Трехслойная микрофлюидная система для культивирования клеток на основе ПММА и ПЭТ:  
*a* – топология микрофлюидных каналов, *б* – МФС в сборке

Fig. 5. Three-layer microfluidic system for cell culturing based on PMMA and PET:  
*a* – topology of microfluidic channels, *b* – assembled MFS

личению смачиваемости поверхности [17], [18], поэтому для оценки эффективности обработки коронным разрядом проведены измерения углов смачиваемости ( $\theta$ ) поверхности указанных материалов. Обрабатываемые образцы полимерных материалов имели форму в соответствии с геометрическим параметрами стандартного предметного стекла –  $75 \times 25$  мм<sup>2</sup>. После автоматизированного коронирования с одинаковой скоростью на образцы помещали каплю деионизованной воды и измеряли угол смачиваемости. Значения измеренных углов смачиваемости в зависимости от времени обработки коронным разрядом с помощью аппарата Дарсонваль Карат ДЕ-212 для исследованных материалов приведены в таблице.

Примеры изменения угла смачиваемости во времени для ПММА и ПЭТ после дарсонвализации приведены на рис. 4.

В отличие от стекла, активация поверхности полимерных материалов требует большего времени, поскольку стекло не имеет в своем составе неполярных групп. Проведенная обработка позволяет образовать на поверхности полимеров гидрофильные функциональные группы, уменьшив угол смачивания. Для получения качественного соединения функциональных слоев МФС необходимо подвергать обработке коронным разрядом каждую поверхность, приводимую в контакт с соседними слоями системы. С целью сокращения времени производства без значительной потери активации поверхности была выбрана продолжительность плазменной обработки каждой поверхности в течение одной минуты. Обработка в течение данного времени позволила добиться качественного соединения слоев МФС без дефектов. Пример гибридной полимерной МФС для культивирования клеток на основе ПММА и ПЭТ [19], [20], сформированной с помощью термокомпрессионного связывания функциональных

слоев, обработанных коронным разрядом, представлен на рис. 5.

Полученные экспериментальные результаты продемонстрировали, что даже достаточно краткосрочная обработка поверхности позволяет уменьшить значение угла смачивания без применения дорогостоящих установок плазменной обработки или промышленных коронаторов.

**Заключение.** Автоматизация технологических процессов в микрофлюидике – это один из ключевых факторов повышения эффективности и точности изготовления гибридных аналитических микросистем, широкий набор областей применения которых обуславливает необходимость создания высокоточных и надежных методов их изготовления. Одна из ключевых задач при разработке микрофлюидных систем – это обеспечение качественного соединения слоев, для чего требуется модификация поверхностей с целью улучшения их адгезионных свойств. В статье предложено техническое решение, основанное на использовании аппарата Дарсонваль и системы числового программного управления для автоматической обработки функциональных слоев МФС коронным разрядом. Автоматизация данного процесса позволяет существенно повысить точность и равномерность обработки поверхностей, что критически важно для формирования многослойных гибридных структур. Показано, что обработка коронным разрядом эффективно снижает углы смачивания поверхностей различных материалов, улучшая их совместимость при термокомпрессионном связывании. Экспериментальные результаты подтверждают, что предложенная система обеспечивает высокую эффективность активации поверхности при относительно коротком времени обработки. Внедрение автоматизированной системы позволяет не только снизить временные и энергетические затраты при создании МФС, но и повысить воспроизводимость процесса, что особенно важно для мелкосерийного прототипирования.

## Список литературы

1. Application of microfluidics in chemical enhanced oil recovery: A review / M. Fani, P. Pourafshary, P. Mostaghimi, N. Mosavat // *Fuel*. 2022. Vol. 315. P. 123225. doi: 10.1016/j.fuel.2022.123225.
2. Shepherd S. J., Issadore D., Mitchell M. J. Microfluidic formulation of nanoparticles for biomedical applications // *Biomaterials*. 2021. Vol. 274. P. 120826. doi: 10.1016/j.biomaterials.2021.120826.
3. Fabrication and applications of microfluidic devices: A review / A. G. Niculescu, C. Chircov, A. C. Bîrcă, A. M. Grumezescu // *Int. J. of Molecular Sciences*. 2021. Vol. 22, no. 4. P. 2011. doi: 10.3390/ijms22042011.
4. Lee P. J., Hung P. J., Lee L. P. An artificial liver sinusoid with a microfluidic endothelial-like barrier for primary hepatocyte culture // *Biotechnol. and Bioengin.* 2007. Vol. 97, no. 5. P. 1340–1346. doi: 10.1002/bit.21360.
5. Aralekallu S., Boddula R., Singh V. Development of glass-based microfluidic devices: A review on its fabrication and biologic applications // *Materials & Design*. 2023. Vol. 225. P. 111517. doi: 10.1016/j.matdes.2022.111517.
6. Borók A., Laboda K., Bonyár A. PDMS bonding technologies for microfluidic applications: A review // *Biosensors*. 2021. Vol. 11, no. 8. P. 292. doi: 10.3390/bios11080292.
7. Microfluidic trends in drug screening and drug delivery / J. Feng, J. Neuzil, A. Manz, C. Iliescu, P. Neuzil // *TrAC Trends in Analyt. Chem.* 2023. Vol. 158. P. 116821. doi: 10.1016/j.trac.2022.116821.
8. Recent advances in microfluidic technology for bioanalysis and diagnostics / S. F. Berlanda, M. Breitfeld, C. L. Dietsche, P. S. Dittrich // *Analyt. chem.* 2021. Vol. 93, no. 1. P. 311–331. doi: 10.1021/acs.analchem.0c04366.
9. Microscale investigation on the wettability and bonding mechanism of oxygen plasma-treated PDMS microfluidic chip / B. Jiang, H. Guo, D. Chen, M. Zhou // *Appl. Surface Sci.* 2022. Vol. 574, no. 10. P. 151704. doi: 10.1016/j.apsusc.2021.151704.
10. Sealing 3D-printed parts to poly (dimethylsiloxane) for simple fabrication of Microfluidic devices / C. S. Carrell, C. P. McCord, R. M. Wydallis, C. S. Henry // *Analytica Chimica Acta*. 2020. Vol. 1124. P.78–84. doi: 10.1016/j.aca.2020.05.014.
11. Sivakumar R., Lee N. Y. Microfluidic device fabrication mediated by surface chemical bonding // *Analyt.* 2020. Vol. 145, no. 12. P. 4096–4110. doi: 10.1039/D0AN00614A.
12. Liu H., Piper J. A., Li M. Rapid, simple, and inexpensive spatial patterning of wettability in microfluidic devices for double emulsion generation // *Analyt. Chem.* 2021. Vol. 93, no. 31. P. 10955–10965. doi: 10.1021/acs.analchem.1c01861.
13. Low-Cost microfabrication tool box / J. Charmet, R. Rodrigues, E. Yildirim, P. K. Challa, B. Roberts, R. DalImann, Y. Whulanza // *Micromachines*. 2020. Vol. 11, no. 2. P. 135. doi: 10.3390/mi11020135.
14. Miniaturization of an enclosed electrospinning process to enhance reproducibility in the fabrication of rapidly dissolving cellbased biosensors / P. Morkus, S. Sibbald, L. Choi, S. Rassenberg, C. D. Filipe, D. R. Latulippe // *Biotechnol. J.* 2024. Vol. 19, no. 1. P. 2300306. doi: 10.1002/biot.202300306.
15. Skvorcov V. Zazemlenie i jekranirovanie kak sposoby obespechenija jelektromagnitnoj sovmestimosti jelektronnyh ustrojstv // *Silovaja jelektronika*. 2020. № 2(83). S. 52–59. (In Russ.).
16. Habiger Je. Jelektromagnitnaja sovmestimost'. Osnovy ee obespechenija v tehnike. M.: Jenergoatomi-zdat, 1995. 304 s. (In Russ.).
17. Han W., Shin J. H. Low-cost, open-source contact angle analyzer using a mobile phone, commercial tripods and 3D printed parts // *HardwareX*. 2022. Vol. 12. P. e00327. doi: 10.1016/j.ohx.2022.e00327.
18. Combining hydrophilic and hydrophobic materials in 3D printing for fabricating microfluidic devices with spatial wettability / M. J. Männel, N. Weigel, N. Hauck, T. Heida, J. Thiele // *Advanced Materials Technol.* 2021. Vol. 6, no. 9. P. 2100094. doi: 10.1002/admt.202100094.
19. A device for studying heterogeneous tumor cell cultures based on a hybrid microfluidic system / T. M. Zimina, K. G. Gareev, N. O. Sitkov, K. E. Brusina, M. A. Shubina, Z. Ganiev, D. E. Bobkov, R. B. Likhomanova, N. M. Yuditseva, N. N. Potrakhov, M. A. Shevtsov // *Biomed. Engin.* 2024. Vol. 58. P. 1–5. doi: 10.1007/s10527-024-10386-z.
20. Development of microfluidic chips for impedance studies of tumor cells / M. A. Shubina, K. E. Brusina, A. A. Ryabko, T. M. Zimina, N. O. Sitkov // *Conf. of Young Researchers in Elect. and El. Eng. (ElCon)*. SPb., Russia: IEEE, 2024. P. 995–998. doi: 10.1109/ElCon61730.2024.10468293.

## Информация об авторах

**Лысюк Михаил Аркадиевич** – студент гр. 0285 кафедры микро- и нанoeлектроники. СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: mixail.lysuk@gmail.com

**Шубина Мария Алексеевна** – студентка гр. 0285 кафедры микро- и нанoeлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: mashkin999@mail.ru

**Гульванский Вячеслав Викторович** – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. лаборатории ФОИС СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: vvgulvanskii@etu.ru

**Каплун Дмитрий Ильич** – канд. техн. наук, доцент, зам. зав. по научной работе кафедрой автоматики и процессов управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: dikaplun@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2765-4509>

**Шестопалов Михаил Юрьевич** – д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой автоматики и процессов управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: shestopalov\_08@mail.ru

**Ситков Никита Олегович** – канд. техн. наук, доцент кафедры микро- и нанoeлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: sitkov93@yandex.ru

<http://orcid.org/0000-0003-4870-8641>

#### **Вклад авторов:**

Лысюк М. А. – подготовка текста статьи, проведение экспериментов.

Шубина М. А. – подготовка текста статьи, проведение экспериментов.

Гульванский В. В. – отладка программного обеспечения, проведение экспериментов.

Каплун Д. И. – постановка задачи, выводы.

Шестопалов М. Ю. – постановка задачи, выводы.

Ситков Н. О. – постановка задачи, проведение экспериментов, подготовка текста статьи, выводы.

#### **References**

1. Application of microfluidics in chemical enhanced oil recovery: A review / M. Fani, P. Pourafshary, P. Mostaghimi, N. Mosavat // *Fuel*. 2022. Vol. 315. P. 123225. doi: 10.1016/j.fuel.2022.123225.
2. Shepherd S. J., Issadore D., Mitchell M. J. Microfluidic formulation of nanoparticles for biomedical applications // *Biomaterials*. 2021. Vol. 274. P. 120826. doi: 10.1016/j.biomaterials.2021.120826.
3. Fabrication and applications of microfluidic devices: A review / A. G. Niculescu, C. Chircov, A. C. Bîrcă, A. M. Grumezescu // *Int. J. of Molecular Sciences*. 2021. Vol. 22, no. 4. P. 2011. doi: 10.3390/ijms22042011.
4. Lee P. J., Hung P. J., Lee L. P. An artificial liver sinusoid with a microfluidic endothelial-like barrier for primary hepatocyte culture // *Biotechnol. and Bioengin.* 2007. Vol. 97, no. 5. P. 1340–1346. doi: 10.1002/bit.21360.
5. Aralekallu S., Boddula R., Singh V. Development of glass-based microfluidic devices: A review on its fabrication and biologic applications // *Materials & Design*. 2023. Vol. 225. P. 111517. doi: 10.1016/j.matdes.2022.111517.
6. Borók A., Laboda K., Bonyár A. PDMS bonding technologies for microfluidic applications: A review // *Biosensors*. 2021. Vol. 11, no. 8. P. 292. doi: 10.3390/bios11080292.
7. Microfluidic trends in drug screening and drug delivery / J. Feng, J. Neuzil, A. Manz, C. Iliescu, P. Neuzil // *TrAC Trends in Analyt. Chem.* 2023. Vol. 158. P. 116821. doi: 10.1016/j.trac.2022.116821.
8. Recent advances in microfluidic technology for bioanalysis and diagnostics / S. F. Berlanda, M. Breifeld, C. L. Dietsche, P. S. Dittrich // *Analyt. chem.* 2021. Vol. 93, no. 1. P. 311–331. doi: 10.1021/acs.analchem.0c04366.
9. Microscale investigation on the wettability and bonding mechanism of oxygen plasma-treated PDMS microfluidic chip / B. Jiang, H. Guo, D. Chen, M. Zhou // *Appl. Surface Sci.* 2022. Vol. 574, no. 10. P. 151704. doi: 10.1016/j.apsusc.2021.151704.
10. Sealing 3D-printed parts to poly (dimethylsiloxane) for simple fabrication of Microfluidic devices / C. S. Carrell, C. P. McCord, R. M. Wydallis, C. S. Henry // *Analytica Chimica Acta*. 2020. Vol. 1124. P.78–84. doi: 10.1016/j.aca.2020.05.014.
11. Sivakumar R., Lee N. Y. Microfluidic device fabrication mediated by surface chemical bonding // *Analyst*. 2020. Vol. 145, no. 12. P. 4096–4110. doi: 10.1039/D0AN00614A.
12. Liu H., Piper J. A., Li M. Rapid, simple, and inexpensive spatial patterning of wettability in microfluidic devices for double emulsion generation // *Analyt. Chem.* 2021. Vol. 93, no. 31. P. 10955–10965. doi: 10.1021/acs.analchem.1c01861.
13. Low-Cost microfabrication tool box / J. Charmet, R. Rodrigues, E. Yildirim, P. K. Challa, B. Roberts, R. DalImann, Y. Whulanza // *Micromachines*. 2020. Vol. 11, no. 2. P. 135. doi: 10.3390/mi11020135.
14. Miniaturization of an enclosed electrospinning process to enhance reproducibility in the fabrication of rapidly dissolving cellbased biosensors / P. Morkus,



S. Sibbald, L. Choi, S. Rassenberg, C. D. Filipe, D. R. Latulippe // *Biotechnol. J.* 2024. Vol. 19, no. 1. P. 2300306. doi: 10.1002/biot.202300306.

15. Skvorcov V. Zazemlenie i jekranirovanie kak sposoby obespechenija jelektromagnitnoj sovmestimosti jelektronnyh ustrojstv // *Silovaja jelektronika*. 2020. № 2(83). S. 52–59. (In Russ.).

16. Habiger Je. Jelektromagnitnaja sovmestimost'. Osnovy ee obespechenija v tehnikе. M.: Jenergoatomizdat, 1995. 304 s. (In Russ.).

17. Han W., Shin J. H. Low-cost, open-source contact angle analyzer using a mobile phone, commercial tripods and 3D printed parts // *HardwareX*. 2022. Vol. 12. P. e00327. doi: 10.1016/j.ohx.2022.e00327.

18. Combining hydrophilic and hydrophobic materials in 3D printing for fabricating microfluidic devices

with spatial wettability / M. J. Männel, N. Weigel, N. Hauck, T. Heida, J. Thiele // *Advanced Materials Technol.* 2021. Vol. 6, no. 9. P. 2100094. doi: 10.1002/admt.202100094.

19. A device for studying heterogeneous tumor cell cultures based on a hybrid microfluidic system / T. M. Zimina, K. G. Gareev, N. O. Sitkov, K. E. Brusina, M. A. Shubina, Z. Ganiev, D. E. Bobkov, R. B. Likhomanova, N. M. Yuditseva, N. N. Potrakhov, M. A. Shevtsov // *Biomed. Engin.* 2024. Vol. 58. P. 1–5. doi: 10.1007/s10527-024-10386-z.

20. Development of microfluidic chips for impedance studies of tumor cells / M. A. Shubina, K. E. Brusina, A. A. Ryabko, T. M. Zimina, N. O. Sitkov // *Conf. of Young Researchers in Elect. and El. Eng. (ElCon)*. SPb., Russia: IEEE, 2024. P. 995–998. doi: 10.1109/ElCon61730.2024.10468293.

### Information about the authors

**Michail A. Lysyuk** – student group 0285 of the Department of Micro- and Nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: mixail.lysuk@gmail.com

**Maria A. Shubina** – student group 0285 of the Department of Micro- and Nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: mashkin999@mail.ru

**Vyacheslav V. Gulvanskii**, Cand. Sci. (Eng.), senior researcher of the Laboratory of FOIS of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: vvgulvanskii@etu.ru

**Dmitry I. Kaplun** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Deputy Head on scientific work of the Department of Automation and Control Processes of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: dikaplun@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2765-4509>

**Michail Yu. Shestopalov** – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Automation and Control Processes of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: shestopalov\_08@mail.ru

**Nikita O. Sitkov** – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: sitkov93@yandex.ru

<http://orcid.org/0000-0003-4870-8641>

### Author contribution statement:

Lysyuk M. A. – preparation of the article text, conducting experiments.

Shubina M. A. – preparation of the article text, conducting experiments.

Gulvansky V. V. – software debugging, conducting experiments.

Kaplun D. I. – problem statement, conclusions.

Shestopalov M. Yu. – problem statement, conclusions.

Sitkov N. O. – problem statement, conducting experiments, preparation of the article text, conclusions.

Статья поступила в редакцию 29.07.2024; принята к публикации после рецензирования 21.10.2024; опубликована онлайн 25.12.2024.

Submitted 29.07.2024; accepted 21.10.2024; published online 25.12.2024.