



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-6-66-73>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 533.9.072

## ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ СТЕНД ДЛЯ МИКРОПЛАЗМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

С.В. БОРДУСОВ, С.И. МАДВЕЙКО, А.Л. БАРАХОЕВ, О.И. ТИХОН, А.А. МОЙСЕЕВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 27 мая 2021*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

**Аннотация.** Разработан исследовательский стенд для микроплазменной обработки поверхностей объектов с возможностью перемещения зоны разряда вдоль объекта с использованием программно управляемого линейного шагового двигателя. Конструкция стенда позволяет применять разные типы систем плазмообразования, а также проводить обработку с подачей в зону разряда различных газов, таких как воздух, азот, кислород и т. д. Исследовательский стенд оснащен измерительным оборудованием для контроля электрических и физических характеристик разряда (цифровые осциллографы, оптический эмиссионный спектрометр, аэроиономер и др.). Для последующей оценки качества и характеристик обработанных поверхностей могут использоваться микротвердомер, гониометр, интерференционный микроскоп, трибомер, разрывная машина и т. д. Приведены примеры электрических характеристик разрядных устройств, апробированных в составе исследовательского стенда, оптической эмиссионной спектроскопии плазмы, результатов измерений краевого угла смачивания поверхностей обработанных объектов.

**Ключевые слова:** исследовательский стенд, плазменная обработка поверхности, плазма атмосферного давления.

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

**Для цитирования.** Бордусов С.В., Мадвейко С.И., Барахоев А.Л., Тихон О.И., Моисеев А.А. Исследовательский стенд для микроплазменной поверхностной обработки материалов в условиях атмосферного давления. Доклады БГУИР. 2021; 19(6): 66-73.

## RESEARCH STAND FOR MICROPLASMA SURFACE TREATMENT OF MATERIALS AT ATMOSPHERIC PRESSURE

SIARHEI V. BORDUSAU, SIARHEI I. MADVEIKA, ANDREI L. BARAKHOYEYU,  
OLEG I. TSIKHAN, ANDREI A. MAISEYEU

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 27 May 2021*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

**Abstract.** A research stand for microplasma treatment of object surfaces with the ability to move the discharge zone along the object using a program-controlled linear stepper motor has been developed. The design of the stand allows the use of different types of plasma generation systems, as well as processing with feeding of various gases such as air, nitrogen, oxygen, etc. into the discharge zone. The research bench is equipped with measuring equipment for monitoring the electrical and physical characteristics of the discharge (digital oscilloscopes, optical emission spectrometer, air ion meter, etc.). A microhardness tester, goniometer, interference microscope, tribometer, tensile testing machine, etc. can be used to further evaluate the quality and characteristics of the treated surfaces. Examples of the electrical characteristics of discharge devices tested as part of the research stand, optical emission spectroscopy of plasma, and results of measurements of the contact angle of treated objects surfaces are given.

**Keywords:** research stand, plasma surface treatment, atmospheric pressure plasma.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Bordusau S.V., Madveika S.I., Barakhoyeu A.L., Tsikhan O.I., Maisseyeu A.A. Research stand for microplasma surface treatment of materials at atmospheric pressure. Doklady BGUIR. 2021; 19(6): 66-73.

### Введение

Обработка материалов при атмосферном давлении обладает определенными преимуществами по сравнению с традиционной вакуумной плазменной обработкой: помимо снижения затрат на оборудование и устранения ограничений, налагаемых совместимостью с вакуумом, плазменные процессы при высоком давлении и низкой температуре обеспечивают эффективную генерацию активных химических частиц, высокую химическую селективность, минимальную энергию ионов, что приводит к малому повреждению поверхности, недостижимому другими способами обработки [1–3]. Проблемой является распространение зоны воздействия разряда на всю площадь обрабатываемой поверхности. Для этого могут использоваться системы с перемещением разряда над поверхностью обрабатываемого объекта либо системы с перемещением обрабатываемого объекта [4–6]. Для контроля за протеканием процесса плазмообразования и поддержания разряда могут использоваться различные методы, такие как зондовые, спектроскопические, масс-спектрометрические и т. д. [6–8]. Одновременное измерение нескольких характеристик разряда, например, электрических и оптических, позволяет эффективно контролировать концентрацию и состав продуктов плазмохимических реакций, что делает возможным проведение обработки в нескольких режимах, предпочтительных для того или иного обрабатываемого материала [9, 10].

Большое разнообразие типов разрядов атмосферного давления, которые могут применяться для решения широкого круга задач модификации состояния и свойств поверхностей объектов плазменной обработки, требует экспериментальной апробации и оптимизации режимов работы как разрядных систем, так и отдельных стадий процессов управляемого плазменного воздействия на материалы. При этом особое значение имеет регистрация и документирование как можно большего набора параметров процессов обработки и выявление закономерностей их влияния на целевые характеристики объектов.

Для решения такого рода задач разработан исследовательский стенд, краткое описание которого и примеры практического использования приведены ниже.

### Состав исследовательского стенда

Исследовательский стенд, структурная схема которого показана на рис. 1, состоит из системы плазмообразования и программно управляемого линейного шагового двигателя для перемещения разрядного устройства вдоль поверхности обрабатываемого объекта. В качестве плазмообразующей системы могут использоваться разрядные устройства разных типов. К примеру, это может быть устройство для возбуждения барьерного диэлектрического разряда, устройство для возбуждения искрового импульсного разряда, в котором газовый поток через зону разряда формируется при помощи мембранного компрессора и др. Для интенсификации процесса обработки за счет нагрева обрабатываемого объекта в стенде предусмотрен керамический нагреватель со встроенным термоэлектрическим преобразователем для контроля и управления температурными режимами объекта обработки. Управление шаговым двигателем осуществляется при помощи компьютера. Каретка шагового двигателя может быть запрограммирована к возвратно-поступательному перемещению равномерно со скоростью от 5 до 1000 мм/с, а также циклически ступенчато (когда скорость перемещения на разных участках траектории движения различна). Контроль электрических режимов разрядных систем осуществляется при помощи делителя напряжения 1:1000 и цифрового осциллографа С8-46/3. Контроль и регистрация оптических характеристик газового разряда производится фотоэлектронным умножителем, сигналы с которого подаются на цифровой осциллограф. Регистрация оптического эмиссионного спектра плазмы разряда может осуществляться малогабаритным спектрометром SL 40-2-1024. Для измерения концентрации газообразных заряженных частиц может быть использован аэроионометр АИМ-1. Фрагмент общего вид стенда показан на рис. 2.

Для оценки влияния плазмы атмосферного давления на качество и характеристики обработанных поверхностей в зависимости от целевого назначения могут использоваться гониометр ЛК-1, микротвердометр Leica VMHT MOD, интерференционный микроскоп МИИ-4У4.2, трибомер МТ-4, разрывная машина STC-500kg и т. д.

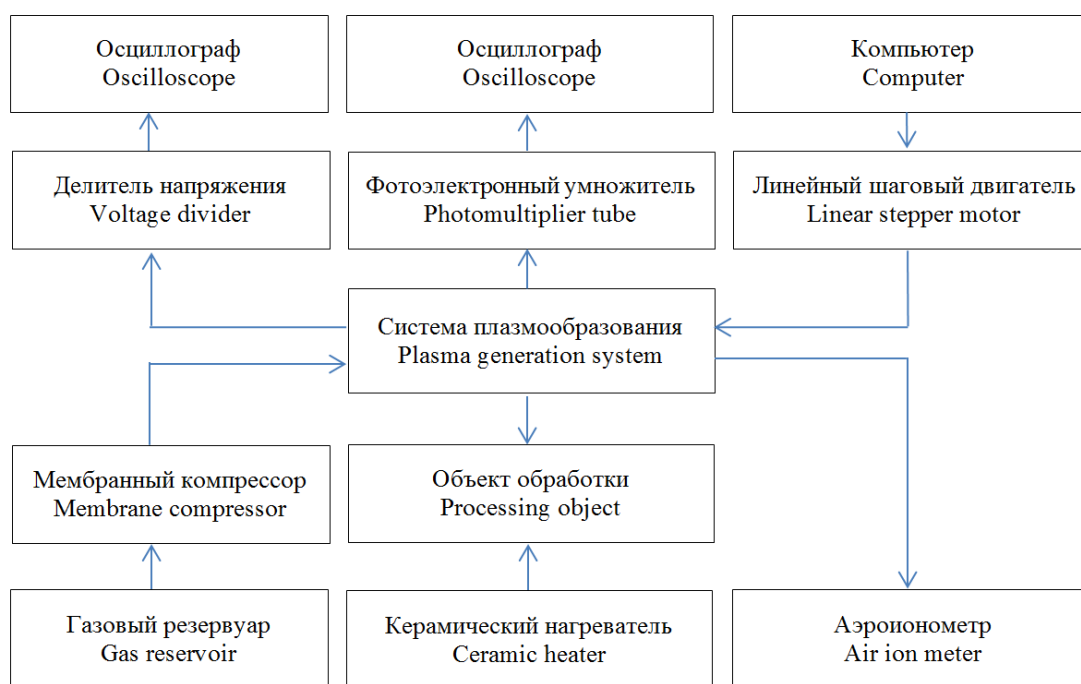


Рис. 1. Структурная схема исследовательского стенда  
Fig. 1. Block diagram of the research stand



1 – осциллограф, 2 – линейный шаговый двигатель, 3 – компрессор, 4 – аэроионметр, 5 – каретка двигателя, 6 – устройство для возбуждения искрового импульсного разряда, 7 – кремниевая пластина, 8 – нагреватель, 9 – источник питания разрядной системы  
1 – oscilloscope, 2 – linear stepper motor, 3 – compressor, 4 – air ion meter, 5 – stepper motor carriage, 6 – device for spark impulse discharge excitation, 7 – silicon wafer, 8 – heater, 9 – power supply for the discharge system

**Рис. 2.** Общий вид исследовательского стенда  
**Fig. 2.** General view of the research stand

Таким образом совокупность представленных и используемых приборов и систем позволяет не только обеспечивать обработку поверхности материалов в достаточно широком диапазоне режимов при помощи различных разрядов в атмосфере газов (воздуха, кислорода, азота и др.), но и устанавливать корреляционные связи с целевыми показателями состояния поверхности.

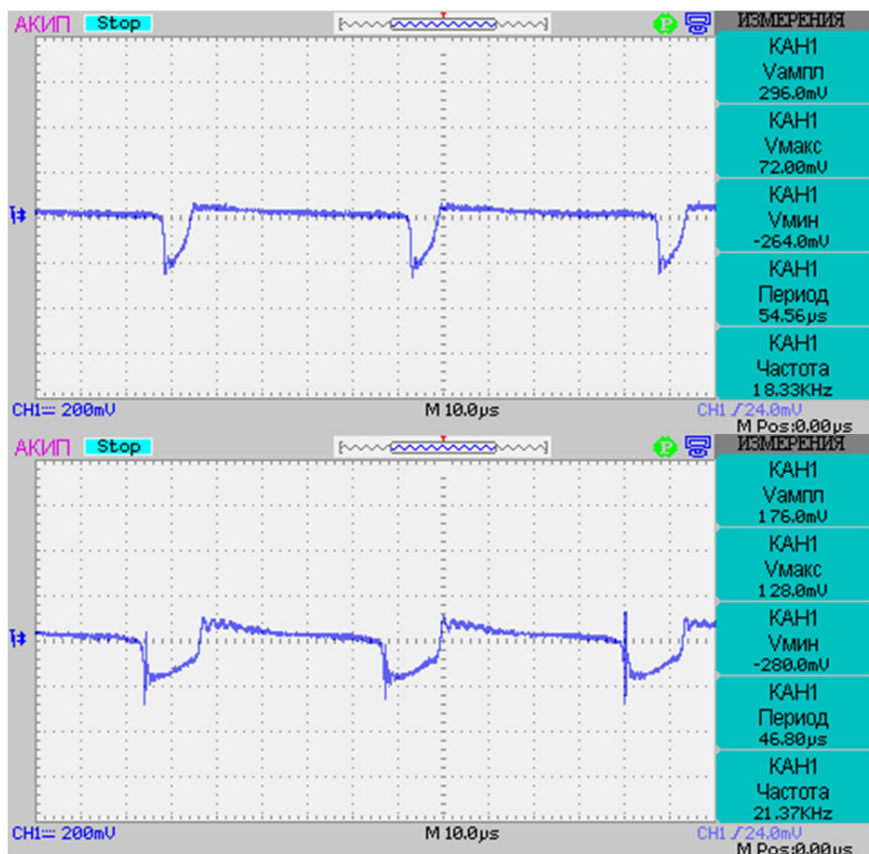
### Данные об апробации стенда

Примеры экспериментальных данных, полученных при изучении электрических режимов работы разрядных устройств, состава и характеристик плазменной среды, результатов управляемого плазменного модифицирования обработанных поверхностей материалов представлены на рис. 3 – 6 и в кратких комментариях к ним.

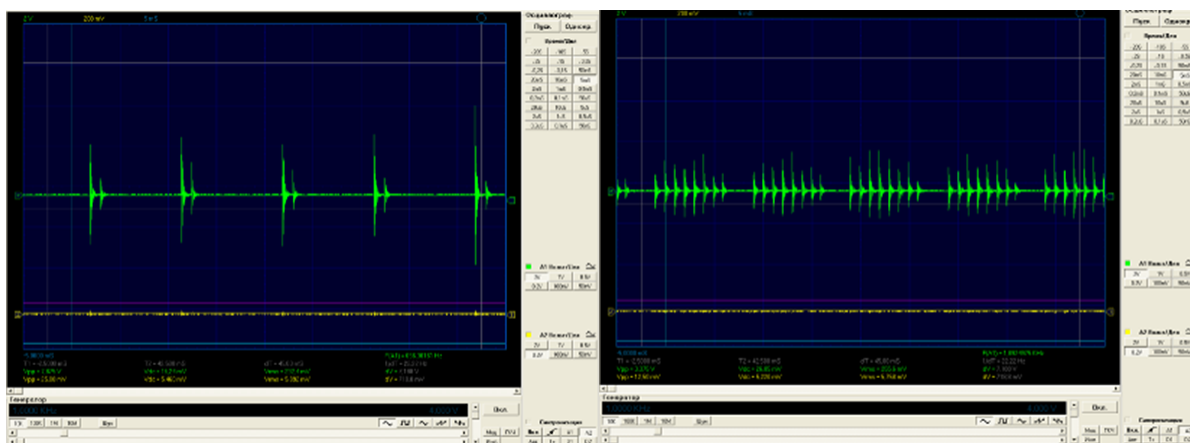
На рис. 3 показаны осциллограммы импульсов напряжения ( $U_{\text{вых}}$ ) на межэлектродном промежутке устройства для возбуждения искрового импульсного разряда при разной величине входного напряжения генераторного каскада ( $U_{\text{вх}}$ ). Осциллограммы снимались во время горения разряда с использованием делителя напряжения 1:1000. Цена деления по оси  $X$  – 10 мкс/кл, по оси  $Y$  – 200 мВ/кл.

На осциллограммах видно, что увеличение питающего напряжения генераторного каскада приводит к увеличению длительности разрядных импульсов при несущественном изменении их амплитуды.

Результаты исследования электрических характеристик разрядного устройства барьерного типа показаны на рис. 4. Задающий генератор источника питания барьерного разряда работает на частоте до 1 кГц. Сформированные высоковольтные импульсы имеют внутреннюю структуру – высокочастотное заполнение в виде затухающих колебаний, обусловленных резонансными свойствами выходного высоковольтного трансформатора. Источник питания энергетической системы барьерного разряда позволяет регулировать амплитуду напряжения в пределах 20–40 кВ. Возможна обработка материалов как одиночными импульсами с частотой их следования 100 Гц, так и пачками импульсов.



**Рис. 3.** Осциллограммы напряжения  $U_{\text{вых}}$  на электродах устройства для возбуждения искрового импульсного разряда при величине входного напряжения  $U_{\text{вх}}$ , равной 3,5 В (вверху) и 6 В (внизу)  
**Fig. 3.** Oscillograms of the voltage  $U_{\text{out}}$  on the electrodes of the spark pulse discharge excitation device at the value of the input voltage  $U_{\text{in}}$  equal to 3,5 V (above) 6V (below)



**Рис. 4.** Осциллограммы импульсов высоковольтного напряжения частотой  $f \approx 100$  Гц (слева) и  $f \approx 800$  Гц (справа) разрядного устройства барьерного типа  
**Fig. 4.** Oscillograms of high-voltage pulses with a frequency of  $f \approx 100$  Hz (left) and  $f \approx 800$  Hz (right) of a barrier-type discharge device

На рис. 5 приведены фрагменты спектра излучения плазмы барьерного разряда в воздухе, полученные с использованием спектрометра SL 40-2-1024. Проведенные по ним расчеты величины газокинетической температуры плазмы  $T_g$  дали значения порядка 390 К.

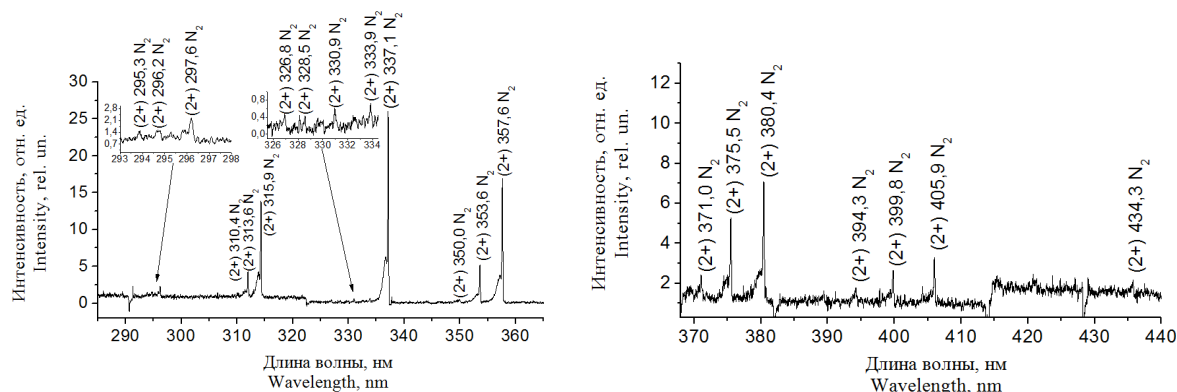


Рис. 5. Спектр излучения плазмы барьерного разряда в воздухе в области 290–60 нм (слева) и 370–440 нм (справа)

Fig. 5. Emission spectrum of barrier discharge plasma in air in the range of 290–360 nm (left) and 370–440 nm (right)

Оценка воздействия плазмы искрового разряда на поверхность материалов проводилась путем измерения краевого угла смачивания обработанных образцов (сталь, стекло, кремний) с использованием гониометра ЛК-1. Зависимость угла смачивания от времени обработки показана на рис. 5.

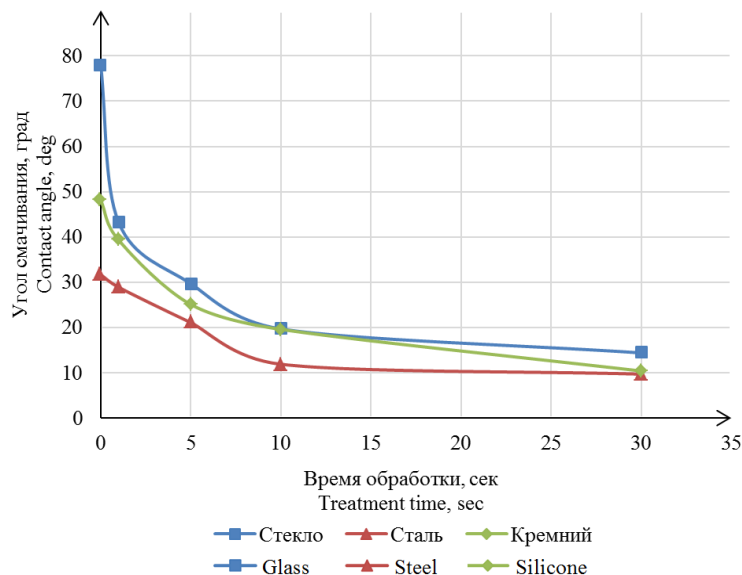


Рис. 5. Зависимость угла смачивания от времени обработки  
Fig. 5. Dependence of the contact angle on the treatment time

Представленные зависимости показывают, что при обработке разрядом атмосферного давления в воздухе происходит активация поверхностей объектов, что приводит к повышению смачиваемости поверхностей и может быть использовано перед проведением таких операций, как склеивание, окраска, пайка и др. Данные результатов исследований позволяют сделать вывод о целесообразности и длительности обработки для достижения определенных свойств поверхности.

### Выводы

Разработан исследовательский стенд для микроплазменной обработки поверхностей объектов. Исследовательский стенд предназначен для изучения процессов модификации поверхностей широкого ряда объектов (пластмасс, стекла, металлов и т. д.) и установления корреляционных связей режимов обработки с целевыми показателями состояния поверхности материалов.

### Список литературы / References

1. Selwyn G.S., Herrmann H.W., Park J., & Henins I. Materials Processing Using an Atmospheric Pressure, RF-Generated Plasma Source. *Contributions to Plasma Physics*. 2001;41(6):610-619. DOI:10.1002/1521-3986(200111)41:6<610:aid-ctpp610>3.0.co;2-1.
2. Peran J., & Ercegović Ražić S. Application of atmospheric pressure plasma technology for textile surface modification. *Textile Research Journal*. 2019: 1-24. DOI:10.1177/0040517519883954.
3. d'Agostino R., Favia P., Kawai Y., Ikegami H., Sato N., Arefi-Khonsari F. *Advanced plasma technology*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; 2008.
4. Yamamoto T., Okubo M. Nonthermal Plasma Technology. In: Wang L.K., Hung Y.T., Shammass N.K. (Eds.) *Advanced Physicochemical Treatment Technologies*; 2017: 135-293. Humana Press. DOI:10.1007/978-1-59745-173-4 4
5. Johansson K.S. Surface Modification of Plastics. In: *Applied Plastics Engineering Handbook (Second Edition): Processing, Materials, and Applications*, 2017: 443-87. William Andrew Publishing. DOI: 10.1016/B978-0-323-39040-8.00020-1.
6. Meichsner J., Schmidt M., Schneider R., & Wagner H.-E. (Eds.). *Nonthermal Plasma Chemistry and Physics (1st ed.)*. CRC Press; 2013. DOI:10.1201/b12956.
7. Ono R. Optical diagnostics of reactive species in atmospheric-pressure nonthermal plasma. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2016; 49(8), 083001. DOI:10.1088/0022-3727/49/8/083001.
8. Veldhuizen van E.M., Rutgers W.R. Corona discharges: fundamentals and diagnostics. In *Frontiers in low temperature plasma diagnostics IV: papers, Rolduc Conference Centre, The Netherlands, 25.03–29.03.2001*. Eindhoven: Eindhoven University of Technology; 2001: 40-49
9. Al-Abduly, Abdullah & Christensen P. An in situ and downstream study of non-thermal plasma chemistry in an air fed dielectric barrier discharge (DBD). *Plasma Sources Science and Technology*. 2015;24(6), 065006. DOI: 10.1088/0963-0252/24/6/065006.
10. Keller S., Rajasekaran P., Bibinov N., & Awakowicz P. Characterization of transient discharges under atmospheric-pressure conditions applying nitrogen photoemission and current measurements. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2012;45(12), 125202. DOI:10.1088/0022-3727/45/12/125202.

### Вклад авторов

Бордусов С.В. участвовал в выборе методик, постановке задач проведения исследований, выборе и обосновании состава оборудования и компоновочной схемы исследовательско-диагностического стенда.

Мадвейко С.И. участвовал в определении целей и задач исследований, разработке методик проведения экспериментов, обсуждении результатов экспериментов.

Барахоев А.Л. принял участие в сборке исследовательского стенда, настройке и отладке его режимов работы, участвовал в обсуждении методик и задач проводимых исследований, а также в обработке и интерпретации полученных результатов.

Тихон О.И. принял участие в разработке методик исследований и снятии электрических характеристик.

Моисеев А.А. принял участие в измерении краевого угла смачивания обработанных образцов.

### Authors' contribution

Bordusov S.V. participated in the choice of research methods, setting of research tasks, selection and justification of the equipment composition and layout of the research and diagnostic stand.

Madveiko S.I. participated in defining the goals and objectives of the research, developing the methods of conducting experiments, and discussing the results of the experiments.

Barakhoev A.L. took part in assembling the research bench, setting up and adjusting the modes of operation of the research stand, took part in discussing the methods and objectives of the studies, as well as processing and interpreting the results.

Tikhon O.I. took part in the development of research methods and taking electrical characteristics.

Moiseev A.A. took part in measuring the wetting angle of the treated samples.

### Сведения об авторах

Бордусов С.В., д.т.н., профессор, профессор кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Мадвейко С.И., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Барахоев А.Л., аспирант кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Тихон О.И., аспирант кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Моисеев А.А., магистрант кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники;  
тел. +375-44-760-08-74;  
e-mail: andreibarahoev@gmail.com  
Барахоев Андрей Леонидович

### Information about the authors

Bordusau S.V., D.Sc., Professor, Professor at the Electronic Technique and Technology Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Madveika S.I., PhD, Associate Professor, Head of the Electronic Technique and Technology Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Barakhoyeu A.L., Postgraduate student at the Electronic Technique and Technology Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Tsikhan O.I., Postgraduate student at the Electronic Technique and Technology Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Maiseyeu A.A., Undergraduate student at the Electronic Technique and Technology Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki str., 6,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics;  
tel. +375-44-760-08-74;  
e-mail: andreibarahoev@gmail.com  
Barakhoyeu Andrei Leonidovich