

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ БАРЬЕРНЫЙ РАЗРЯД АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ПАРАХ ГЕКСАМЕТИЛДИСИЛАЗАНА КАК СПОСОБ ОСАЖДЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Д.А. Шутов, А.Н. Иванов, А.В. Сунгурова, А.А. Игнатъев, Ю.Н. Морозова, В.В. Рыбкин

Дмитрий Александрович Шутов (ORCID 0000-0002-4662-4631)*

Кафедра информационных технологий и цифровой экономики, Ивановский государственный химико-технологический университет, Шереметевский пр., 7, Иваново, Российская Федерация, 153000
E-mail: shutov@isuct.ru*

Александр Николаевич Иванов (ORCID 0000-0002-5207-7582), Владимир Владимирович Рыбкин (ORCID 0000-0001-7295-7803), Андрей Анатольевич Игнатъев, Юлия Николаевна Морозова

Кафедра технологии приборов и материалов электронной техники, Ивановский государственный химико-технологический университет, Шереметевский пр., 7, Иваново, Российская Федерация, 153000
E-mail: rybkin@isuct.ru

Александра Вадимовна Сунгурова

Кафедра промышленной экологии, Ивановский государственный химико-технологический университет, Шереметевский пр., 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

В работе показана возможность использования диэлектрического барьерного разряда для осаждения полимерных органосиликатных пленок на поверхность стеклянных подложек. Планарный барьерный разряд атмосферного давления возбуждался в проточной камере в атмосфере гексаметилдисилазана при фиксированном расходе. В качестве газа-носителя выступал гелий. Расходы газа-носителя и рабочей жидкости были фиксированными и составляли 45 мл/с и 0,2 мл/с, соответственно. Частота диэлектрического барьерного разряда составляла 50 Гц, средний ток разряда 3 мА при полной мощности, вкладываемой в разряд 24 ВА. Время осаждения варьировалось в диапазоне 30-1200 с. Показано, что в исследованных условиях разряд имеет филаментную форму. Исследование морфологии поверхности и элементного состава осажденной пленки выполняли методом сканирующей электронной микроскопии и методом энергодисперсионной спектроскопии. Смачиваемость поверхности определяли методом краевых углов методом фотофиксации капель. Элементный состав осаждаемых покрытий свидетельствует об образовании кремнийорганической пленки. Метод краевых углов смачивания по полярным (дистиллированная вода) и неполярным (дийодометан, глицерин) жидкостям показал, что смачиваемость осажденных покрытий выше, чем у исходной подложки. Дополнительно исследовано влияние времени хранения осажденных покрытий (при нормальных условиях) на их свойства. Установлено, что эффект хранения не оказывает существенного влияния на смачиваемость пленок.

Ключевые слова: газоразрядная плазма, барьерный разряд, осаждение, гексаметилдисилазан

ATMOSPHERIC PRESSURE DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE IN HMDS VAPOR AS A COATING DEPOSITION INSTRUMENT

D.A. Shutov, A.N. Ivanov, A.V. Sungurova, A.A. Ignatiev, Yu.N. Morozova, V.V. Rybkin

Dmitry A. Shutov (ORCID 0000-0002-4662-4631)*

Department of Information Technologies and Digital Economy, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia
E-mail: shutov@isuct.ru*

Alexander N. Ivanov (ORCID 0000-0002-5207-7582), Vladimir V. Rybkin (ORCID 0000-0001 -7295-7803), Andrey A. Ignatiev, Yuliya N. Morozova

Department of Microelectronic Devices and Materials, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: rybkin@isuct.ru

Aleksandra V. Sungurova

Department of Industrial Ecology, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

The paper demonstrates the possibility of using a dielectric barrier discharge for the deposition of polymer organosilicate films on the surface of glass substrates. A planar barrier discharge of atmospheric pressure was excited in a flow reactor in an atmosphere of (Bis(trimethylsilyl)amine at a fixed flow rate. Helium as the carrier gas was used. The carrier gas and working fluid flow rates were fixed at 45 ml/s and 0.2 ml/s, respectively. The frequency of the dielectric barrier discharge was 50 Hz, the average discharge current was 3 mA at a total power put into the discharge of 24 VA. The deposition time varied in the range of 30–1200 s. It was shown that under the conditions studied, the discharge has a filamentous form. The study of the surface morphology and elemental composition of the deposited film was carried out using scanning electron microscopy and energy-dispersive spectroscopy. Surface wettability was determined by the contact angle method and the method of photofixation of drops. The elemental composition of the deposited coatings indicates the formation of an organosilicon film. The contact angle method for polar (distilled water) and non-polar (diiodomethane, glycerol) liquids showed that the wettability of the deposited coatings is higher than that of the original substrate. Additionally, the effect of storage time of deposited coatings (under normal conditions) on their properties was studied. It was found that the storage effect does not have a significant effect on the wettability of the films.

Keywords: gas discharge plasma, barrier discharge, deposition, hexamethyldisilazane

Для цитирования:

Шутов Д.А., Иванов А.Н., Сунгурова А.В., Игнатъев А.А., Морозова Ю.Н., Рыбкин В.В. Диэлектрический барьерный разряд атмосферного давления в парах гексаметилдисилазана как способ осаждения покрытий. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2024. Т. 67. Вып. 12. С. 80–85. DOI: 10.6060/ivkkt.20246712.7148.

For citation:

Shutov D.A., Ivanov A.N., Sungurova A.V., Ignatiev A.A., Morozova Yu.N., Rybkin V.V. Atmospheric pressure dielectric barrier discharge in hmds vapor as a coating deposition instrument. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 12. P. 80–85. DOI: 10.6060/ivkkt.20246712.7148.

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение количества промышленных нефтесодержащих сточных вод, сбрасываемых, например, из нефтеперерабатывающих заводов, одна из самых актуальных экологических проблем, наряду с частыми утечками органических растворителей в различных производственных процессах [1, 2]. Разработка эффективных стратегий восстановления водных ресурсов за счет селективного удаления из них масел и неполярных органических растворителей (так называемое “отделение нефти от воды”) привлекает внимание мирового сообщества экологов в течение нескольких последних десятилетий [3]. Один из популярных подходов в этом направлении предполагает использование

функциональных материалов с резко противоположной смачиваемостью по отношению к воде и маслам, а также к неполярным органическим растворителям [4]. В частности, использование абсорбирующих материалов с одновременными супергидрофобными и суперолеофильными свойствами (имеющие краевой угол смачивания водой более 150° и угол смачивания маслами менее 10°) считается одним из наиболее перспективных [5, 6].

В качестве сорбентов применяют так называемые пенные материалы, т.е. высокопористые трехмерные (3D) структуры, с большим объемом пор и, следовательно, высокими поглощающими способностями [7-9].

Пенополиуретан с открытыми порами (PU) предпочтителен из-за его доступности, низкой сто-

имости [10-13], хорошей химической и термической стойкости, гибкости, механической стабильности, а также малого веса и низкой удельной плотности [11, 14]. Интересно, что эти последние свойства [11, 14] позволяют пенополиуретановым губкам плавать на поверхности воды и избирательно поглощать масла и неполярные органические растворители из нее [15, 16]. Однако губки из немодифицированного полиуретана демонстрируют низкую способность к отделению масла от воды, т.к. полиуретан по своей природе гидрофилен [17] и суперолеофилен. Следовательно, для достижения супергидрофобности необходима модификация поверхности. Приготовление супергидрофобного пенополиуретана требует изменения химического состава его поверхности, ее морфологии, для достижения низких величин поверхностной энергии и высокой шероховатости поверхности на микро- и/или наноуровне [8, 9]. Для функционализации поверхности используют различные методы, преимущественно чисто химического характера.

В то же время, в последние 20 лет низкотемпературная плазма атмосферного давления получила широкое распространение как инструмент для обработки и модификации поверхности различных материалов [18-20]. Причем, в контексте предлагаемого проекта, можно отметить, что недавние исследования показали значительный потенциал плазмы атмосферного давления для эффективной модификации поверхности трехмерных пористых материалов [21-29]. При этом мало работ было посвящено использованию разрядов атмосферного давления для подготовки функциональных материалов с точки зрения их использования при разделении водомасляных и водонефтяных эмульсий [28, 30-33].

В данной работе предложен способ осаждения покрытий на поверхность стеклянных подло-

жек в диэлектрическом барьерном разряде атмосферного давления в атмосфере паров гексаметилдисилазана и газа-носителя гелия.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для осаждения покрытий была сконструирована лабораторная установка, схема которой представлена на рис. 1. Использовалась конструкция планарного диэлектрического барьерного разряда частотой 50 Гц. В качестве подложки выступали стеклянные покровные стекла, которые укладывались на нижний электрод ДБР ячейки. Подача рабочего плазмообразующего газа осуществлялась путем барботирования гелия (99,98%) через емкость, содержащую гексаметилдисилазан ($C_6H_{19}NSi_2$, х.ч., Химреактив, Россия). Перед проведением процесса осаждения герметичная камера продувалась чистым гелием в течение 2 мин с расходом ~ 45 мл/с. Затем поток гелия уменьшался до 10 мл/с и поток направлялся в склянку Дрекселя, наполненную гексаметилдисилазаном (ГМДС), тем самым насыщая его парами. Расход ГМДС составлял 0,2 мл/мин. Через 2 мин с начала продувки возбуждали разряд. Время осаждения варьировалось от 0,5 до 20 мин.

В течение 1 ч после завершения процесса осаждения измеряли краевой угол смачивания осажденных покрытий. В качестве тестовых жидкостей использовали деионизованную воду (в качестве полярной жидкости), дийодометан (в качестве сильно неполярной жидкости), глицерин (как слабо неполярная жидкость).

Исследование морфологии поверхности и элементного состава осажденной пленки выполняли на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA3 SBH (Чехия) с приставкой элементного энергодисперсионного анализа Aztec EDS (Oxford Instrumental, Англия).

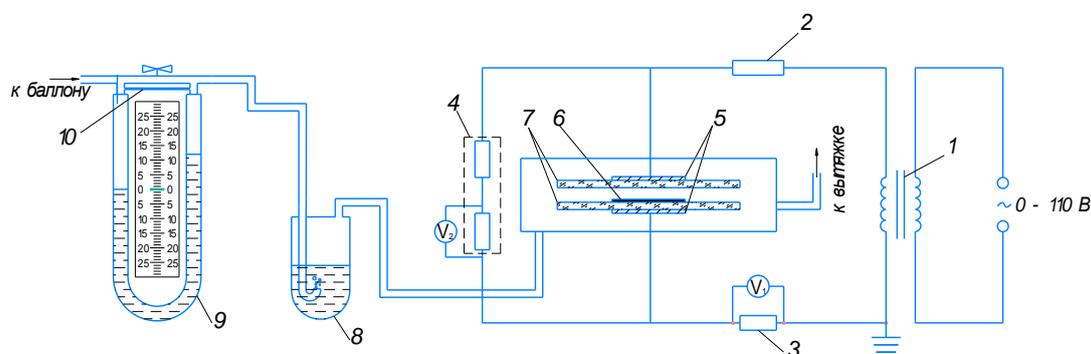


Рис. 1. Схема установки: 1 – высоковольтный трансформатор, 2 – балластное сопротивление, 3 – токовый шунт, 4 – делитель напряжения, 5 – медные электроды, 6 – образец, 7 – диэлектрические барьеры, 8 – склянка Дрекселя с ГМДС, 9 – U-образный манометр, 10 – капилляр, V1 – первый канал осциллографа (измерение тока разряда), V2 – второй канал осциллографа (измерение напряжения)
 Fig. 1. The scheme of the experimental setup. 1 - step-up transformer, 2 - ballast resistance, 3 - current shunt, 4 - voltage divider, 5 - copper electrodes, 6 - substrate; 7 - glass dielectric; 8 - HDMS vessel; 9 - U-shaped pressure gauge; 10 - capillary; V1, V2 - oscilloscope channels

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 приведены осциллограммы горения разряда. ДБР разряд диффузный. Среднеквадратичный ток горения разряда составлял 3 мА, а среднеквадратичное напряжение 8 кВ. Полная мощность, вкладываемая в разряд, при которой проводили процесс осаждения составила 24 ВА.

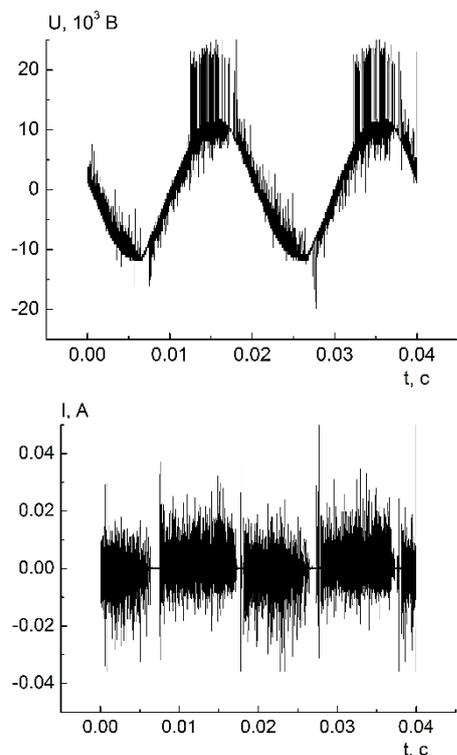


Рис. 2. Осциллограммы токов и напряжений горения разряда в процессе осаждения

Fig. 2. Oscillograms of currents and voltages during the deposition process

На рис. 3 приведены результаты измерения угла смачивания водой поверхности подложек с осажденными покрытиями в зависимости от времени осаждения. Полученное покрытие лучше смачивается деионизованной водой по сравнению с исходной подложкой. Измерения проводили в течение 1 ч после осаждения, и через 50 сут. Видно, что наблюдается незначительный эффект хранения, то есть с течением времени происходит незначительное увеличение краевого угла смачивания.

На рис. 4 показаны результаты измерения углов смачивания на полученных покрытиях для неполярных жидкостей. Видно, что в случае CH_2I_2 поведение угла смачивания с изменением времени осаждения качественно схоже с таковым для воды. В то же время можно отметить, что угол смачива-

ния глицерином меняется сильнее, снижаясь от величины $\sim 65^\circ$ до 45° .

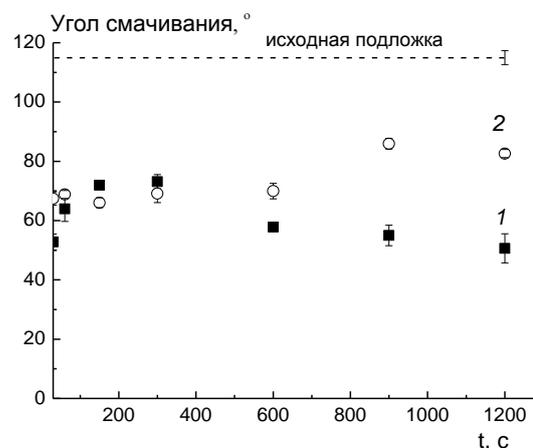


Рис. 3. Краевой угол смачивания по воде в зависимости от времени осаждения. 1 – измеренный после осаждения; 2 – измеренный через 50 дней хранения на воздухе

Fig. 3. Contact angle by water as function of deposition time. 1 – after deposition; 2 – after 50 days of storage

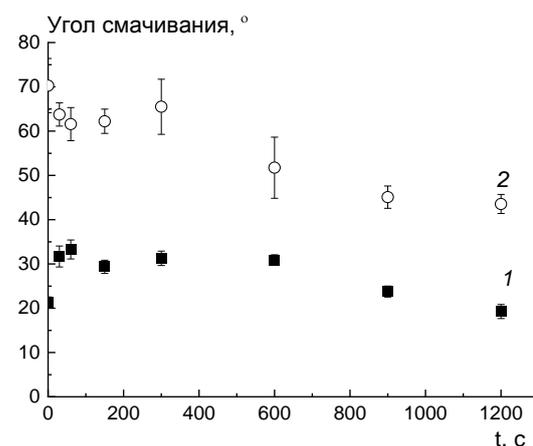


Рис. 4. Краевой угол смачивания в зависимости от времени осаждения. 1 – диодометан; 2 – глицерин

Fig. 4. Contact angle as function of deposition time. 1 – diiodomethane; 2 – glycerol

В энергодисперсионном спектре как исходной подложки, так и подложки с осажденным покрытием присутствуют линии натрия, калия и алюминия, которые входят в состав покровных стекол, использованных в качестве подложек. Известно [34], что типичная глубина ЭДС анализа составляет порядка 2 мкм, то есть толщина осажденных покрытий не превышает этой величины. Основное отличие в энергодисперсионном спектре образцов с нанесенным покрытием, это появление углерода в значительном количестве (~ 19 атомных процентов, рис. 5). Это однозначно свидетельствует о том, что на поверхности формируется углеродсодержа-

шее покрытие. Можно отметить также, что увеличивается число атомов кислорода и азота, приходящихся на один атом кремния. То есть покрытие, вероятно, имеет кремнийорганическую полиорганосилоксановую природу.

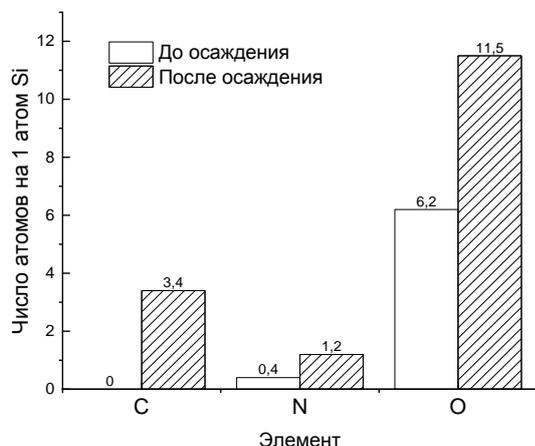


Рис. 5. Результаты элементного анализа исходной подложки и подложки с осажденным покрытием
Fig. 5. EDX analysis results of the substrate and the substrate with the deposited coating

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показана возможность осаждения кремнийорганической полимерной пленки в планарном диэлектрическом барьерном разряде атмосферного давления в среде гелий-гексаметилдисилазан. Установлено, что осажденное покрытие приводит к увеличению смачиваемости поверхности исходной подложки как полярными (дистиллированная вода), так и неполярными (глицерин, дийодометан) жидкостями.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 24-22-00364.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, project No. 24-22-00364.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

- Lee H.-J., Choi W.S. 2D and 3D bulk materials for environmental remediation: Air filtration and oil/water separation. *Materials*. 2020. V. 13. P. 5714. DOI: 10.3390/ma13245714.
- Sharma K., Vaya D., Prasad G., Surolia P.K. Photocatalytic process for oily wastewater treatment: A review. *Int. J. Environ. Sci. Techn.* 2022. V. 20. P. 4615. DOI: 10.1007/s13762-021-03874-2.
- Abdulkareem A., Popelka, A., Sobol'ciak P., Tanvir A., Ouederni M., AlMaadeed M.A., Kasak P., Adham S., Krupa I. The separation of emulsified water/oil mixtures through adsorption on plasma-treated polyethylene powder. *Materials*. 2021. V. 14. P. 1086. DOI: 10.3390/ma14051086.
- Zheng W., Huang J., Li S., Ge M., Teng L., Chen Z., Lai Y. Advanced materials with special wettability toward intelligent oily wastewater remediation. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2021. V. 13. P. 67–87. DOI: 10.1021/acsami.0c18794.
- Ge J., Zhao H.-Y., Zhu H.-W., Huang J., Shu L.-A., Yu S.-H. Advanced sorbents for oil-spill cleanup: Recent advances and future perspectives. *Adv. Mater.* 2016. V. 28. P. 10459–10490. DOI: 10.1002/adma.201601812.
- Sam E.K., Liu J., Lv X. Surface engineering materials of superhydrophobic sponges for oil/water separation: A review. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2021. V. 60. P. 2353–2364. DOI: 10.1021/acs.iecr.0c05906.
- Udayakumar K.V., Gore P.M., Kandasubramanian B. Foamed materials for oil-water separation. *Chem. Eng. J. Adv.* 2021. V. 5. P. 100076. DOI: 10.1016/j.ceja.2020.100076.
- Hailan S.M., Ponnamma D., Krupa I. The separation of oil/water mixtures by modified melamine and polyurethane foams: A review. *Polymers*. 2021. V. 13. P. 4142. DOI: 10.3390/polym13234142.
- Peng M., Zhi Y., Li H., He K., Zeng G., Chen A., Huang Z., Huang T., Yuan L., Chen G. Synthesis and application of modified commercial sponges for oil-water separation. *Chem. Eng. J.* 2019. V. 373. P. 213–226. DOI: 10.1016/j.cej.2019.05.013.
- Pantone V., Annesse C., Fusco C., Fini P., Nacci A., Russo A., D'Accolti L. One-pot conversion of epoxidized soybean oil (ESO) into soy-based polyurethanes by MoCl₂O₂ Catalysis. *Molecules*. 2017. V. 22. P. 333. DOI: 10.3390/molecules22020333.
- Guo G., Liu L., Dang Z., Fang W. Recent progress of polyurethane-based materials for oil/water separation. *Nano*. 2017. V. 4. P. 1730001. DOI: 10.1142/S1793292017300018.
- Ranganathan P., Chen C.-W., Chou Y.-L., Rwei S.-P., Ramaraj S.K. Biomass chemical upcycling of waste rPET for the fabrication of formamide-free TPEE microcellular foams via scCO₂ foaming. *J. CO₂ Util.* 2022. V. 65. P. 102199. DOI: 10.1016/j.jcou.2022.102199.
- Chang C.-J., Venkatesan M., Cho C.-J., Chung P.-Y., Chandrasekar J., Lee C.-H., Wang H.-T., Wong C.-M., Kuo C.-C. Thermoplastic starch with poly(butylene adipate-co-terephthalate) blends foamed by supercritical carbon dioxide. *Polymers*. 2022. V. 14. P. 1952. DOI: 10.3390/polym14101952.
- Zhu Q., Pan Q., Liu F. Facile removal and collection of oils from water surfaces through superhydrophobic and superoleophilic sponges. *J. Phys. Chem. C*. 2011. V. 115. P. 17464–17470. DOI: 10.1021/jp2043027
- Calcagnile P., Fragouli D., Bayer I.S., Anyfantis G.C., Martiradonna L., Cozzoli P.D., Cingolani R., Athanassiou A. Magnetically driven floating foams for the removal of oil contaminants from water. *ACS Nano*. 2012. V. 6. P. 5413–5419. DOI: 10.1021/nn3012948.
- Guo J., Wang J., Zhang S., Ma X., Qiu Z., Peng X., Ying J., Wang Y., Wu G. One-step modification of PU sponges for selective absorption of oil–water mixtures. *N. J. Chem.* 2017. V. 41. P. 90. DOI: 10.1039/C6NJ03239G.

17. **Pantone V., Laurenza A.G., Annese C., Comparelli R., Fracassi F., Fini P., Nacci A., Russo A., Fusco C., D'Accolti L.** Preparation and characterization of soybean oil-based polyurethanes for digital doming applications. *Materials*. 2017. V. 10. P. 848. DOI: 10.3390/ma10080848.
18. **Massines F., Sarra-Burnet C., Fanelli F., Naudé N., Gherardi N.** Atmospheric pressure low temperature direct plasma technology: Status and challenges for thin film deposition. *Plasma Proc. Polym.* 2012. V. 9. P. 1041–1073. DOI: 10.1002/ppap.201200029.
19. **Лещик А.В., Очередько А.Н., Рябов А.Ю., Кудряшов С.В.** Окисление алкилароматических соединений кислородом в барьерном разряде. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2024. Т. 67. Вып. 8. С. 15–21.
Leshchik A.V., Ochered'ko A.N., Ryabov A.Yu., Kudryashov S.V. Oxidation of alkylaromatics by oxygen in the dielectric barrier discharge. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 8. P. 15–21. DOI: 10.6060/ivkkt.20246708.16t.
20. **Гущин А.А., Гриневиц В.И., Квиткова Е.Ю., Гусев Г.И., Шутов Д.А., Иванов А.Н., Манукян А.С., Рыбкин В.В.** Газовые разряды как инструмент очистки газовых и растворных сред и синтеза неорганических материалов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 7. С. 120–131.
Guschin A.A., Grinevich V.I., Kvitkova E.Yu., Gusev G.I., Shutov D.A., Ivanov A.N., Manukyan A.S., Rybkin V.V. Gas discharges as a tool for cleaning gas and solution mediums and synthesis of inorganic materials. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. T. 66. Вып. 7. С. 120–131. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6835j.
21. **Armenise V., Fanelli F., Milella A., D'Accolti L., Uricchio A., Fracassi F.** Atmospheric pressure plasma treatment of polyurethane foams with He–O₂ fed dielectric barrier discharges. *Surf. Interfaces*. 2020. V. 20. P. 100600. DOI: 10.1016/j.surfin.2020.100600.
22. **Fanelli F., Fracassi F.** Thin film deposition on open-cell foams by atmospheric pressure dielectric barrier discharges. *Plasma Proc. Polym.* 2016. V. 13. P. 470–479. DOI: 10.1002/ppap.201500150.
23. **Fanelli F., Bosso P., Mastrangelo A.M., Fracassi F.** Thin film deposition at atmospheric pressure using dielectric barrier discharges: Advances on three-dimensional porous substrates and functional coatings. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2016. V. 55. P. 07LA01. DOI: 10.7567/JJAP.55.07LA01.
24. **Uricchio A., Nadal E., Plujat B., Plantard G., Massines F., Fanelli F.** Low-temperature atmospheric pressure plasma deposition of TiO₂-based nanocomposite coatings on open-cell polymer foams for photocatalytic water treatment. *Appl. Surf. Sci.* 2021. V. 561. P. 150014. DOI: 10.1016/j.apusc.2021.150014.
25. **Gao M., Wang Y., Zhang Y., Li Y., Tang Y., Huang Y.** Deposition of thin films on glass fiber fabrics by atmospheric pressure plasma jet. *Surf. Coat. Technol.* 2020. V. 404. P. 126498. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126498.
26. **Michlíček M., Manakhov A., Dvořáková E., Zajíčková L.** Homogeneity and penetration depth of atmospheric pressure plasma polymerization onto electrospun nanofibrous mats. *Appl. Surf. Sci.* 2019. V. 471. P. 835–841. DOI: 10.1016/j.apusc.2018.11.148.
27. **Meunier L.-F., Profili J., Babaei S., Asadollahi S., Sarkissian A., Dorris A., Beck S., Naudé N., Stafford L.** Modification of microfibrillated cellulosic foams in a dielectric barrier discharge at atmospheric pressure. *Plasma Proc. Polym.* 2021. V. 18. P. e2000158. DOI: 10.1088/1361-6595/abe91c.
28. **Meunier L.-F., Profili J., Babaei S., Asadollahi S., Sarkissian A., Dorris A., Beck S., Naudé N., Stafford L.** Characterization of non-thermal dielectric barrier discharges at atmospheric pressure in presence of microfibrillated cellulosic foams. *Plasma Sources Sci. Technol.* 2021. V. 30. P. 095019. DOI: 10.1088/1361-6595/abe91c.
29. **Cámara-Torres M., Sinha R., Scopece P., Neubert T., Lachmann K., Patelli A., Mota C., Moroni L.** Tuning cell behavior on 3D scaffolds fabricated by atmospheric plasma-assisted additive manufacturing. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2021. V. 13. P. 3631–3644. DOI: 10.1021/acsami.0c19687.
30. **Akhavan B., Jarvis K., Majewski P.** Hydrophobic plasma polymer coated silica particles for petroleum hydrocarbon removal. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2013. V. 5. P. 8563–8571. DOI: 10.1021/am4020154.
31. **Chen F., Song J., Liu Z., Liu J., Zheng H., Huang S., Sun J., Xu W., Liu X.** Atmospheric pressure plasma functionalized polymer mesh: An environmentally friendly and efficient tool for oil/water separation. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2016. V. 4. P. 6828–6837. DOI: 10.1021/acssuschemeng.6b01770.
32. **You Y.S., Kang S., Mauchauffé R., Moon S.Y.** Rapid and selective surface functionalization of the membrane for high efficiency oil-water separation via an atmospheric pressure plasma process. *Sci. Rep.* 2017. V. 7. P. 15345. DOI: 10.1038/s41598-017-15713-x.
33. **Sadeghi I., Aroujalian A., Raisi A., Dabir B., Fathizadeh M.** Surface modification of polyethersulfone ultrafiltration membranes by corona air plasma for separation of oil/water emulsions. *J. Membr. Sci.* 2013. V. 430. P. 24–36. DOI: 10.1016/j.memsci.2012.11.051.
34. **Gupta B.D., Semwal V., Pathak A.** Nano-Optics: Fundamentals, Experimental Methods, and Applications Micro and Nano Technologies. Chap. 7. Elsevier. 2020. P. 163–195. DOI: 10.1016/B978-0-12-818392-2.00007-X.

Поступила в редакцию 01.03.2024

Принята к опубликованию 10.04.2024

Received 01.03.2024

Accepted 10.04.2024