

УДК 532.64.08:621.316.95

СОЗДАНИЕ ГИДРОФИЛЬНЫХ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СТОЙКОСТИ К ФАКТОРАМ, СОПРОВОЖДАЮЩИМ КОРОННЫЙ РАЗРЯД

© 2024 г. **К. А. Емельяненко***, **О. А. Рябкова**, **Н. Денман**

*Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Ленинский
просп.31, корп. 4, Москва, 119071 Россия*

**e-mail: emelyanenko.kirill@mail.ru*

Поступила в редакцию 16.07.2024 г.

После доработки 22.07.2024 г.

Принята к публикации 22.07.2024 г.

Современная электроэнергетика широко использует для транспортировки электроэнергии воздушные линии высокого напряжения, для которых характерны проблемы коронного разряда и токов утечки, особенно в условиях дождя и снега. Одним из подходов по решению этих проблем является создание защитных покрытий, которые могут снизить коронирование в неблагоприятных погодных условиях. В данной работе представлено исследование гидрофильного кремнийорганического покрытия на основе аминопропилтриэтоксисилана и полиэтиленгликоля-400 для алюминиевых проводов. Проведенные исследования по оценке устойчивости покрытия к длительному контакту с водой, УФ-излучению и насыщенной озоном атмосфере показали, что гидрофильность покрытия увеличивается при этих воздействиях, что улучшает его противокоронные свойства. Таким образом, разработанное покрытие обладает перспективами для применения в энергетике, поскольку проявляет стойкость в эксплуатационных условиях.

Ключевые слова: гидрофильность, кремнийорганические покрытия, стойкость к озону, противокоронные покрытия

ВВЕДЕНИЕ

Современная электроэнергетика во многих странах мира использует воздушные линии электропередач высокого напряжения для транспортировки электроэнергии. Однако при эксплуатации сетей высокого напряжения, которая оправдана экономически, возникает ряд проблем, связанных с потерями на коронный разряд [1, 2] и токами утечки [3]. Эти потери возрастают в разы в условиях дождя или снега [4–6], вызывая необходимость постоянного наблюдения и снижения напряжения и пропускной способности сети при неблагоприятных погодных условиях [7].

В этой связи усилия многих исследователей, работающих в области создания специальных защитных покрытий, направлены на создание новых функциональных материалов, которые могут смягчить последствия неблагоприятных погодных условий и снизить потери при транспортировке электроэнергии. В серии недавних работ нашей лаборатории было показано, что нанесение полифункциональных покрытий с экстремальной смачиваемостью на поверхности электрического провода приводит к снижению потерь на коронный разряд при высоких напряжениях сети [8, 9]. Длительная выдержка таких покрытий в короне в условиях дождя показала большую перспективность для многолетнего использования именно супергидрофильных проводов. Анализ механизмов, приводящих к снижению потерь при коронном разряде, показал, что основным источником потерь являются вызывающие неоднородность напряженности электрического поля и формирование коронных разрядов выступающие элементы на поверхности провода, роль которых играют капли дождя или инея, оседающие на поверхности [10]. Для супергидрофобных проводов с малыми углами скатывания (углы меньше 10°) капли воды на поверхности не удерживаются и самопроизвольно удаляются. Для высокогидрофильных и супергидрофильных проводов плоская форма капель, оседающих на поверхность провода, снижает напряженность поля у поверхности и, тем

самым, подавляет формирование коронных разрядов. До настоящего времени внимание исследователей привлекало создание супергидрофобных и гидрофобных покрытий [11–15]. Однако при длительной эксплуатации провода возможна некоторая деградация супергидрофобного состояния под действием УФ-излучения [16] или образования озона, сопровождающих коронный разряд [17, 18]. Напротив, для супергидрофильных и гидрофильных покрытий эти же факторы способствуют улучшению смачивания. В связи с вышесказанным, представляется более перспективной дальнейшая разработка гидрофильных и супергидрофильных покрытий для снижения потерь на коронный разряд. Одним из простейших видов обработки, приводящей к достижению супергидрофильного состояния поверхности, является обработка провода импульсным лазерным излучением [19]. Однако в этом случае при эксплуатации провода в открытых атмосферных условиях, при которых происходит периодический контакт с атмосферными осадками, для алюминиевых проводов имеет место изменение состава поверхностного слоя провода, которое ухудшает его механические характеристики [20].

В этой связи представляется целесообразным наносить на гидрофильный алюминиевый провод защитное покрытие с гидрофильными свойствами, позволяющее не только понижать потери на коронный разряд, но и защищать поверхностный слой материала от коррозии и деградации механических свойств. В данной работе мы предложили метод получения гидрофильного кремнийорганического покрытия, которое при нанесении на гладкую алюминиевую поверхность позволяет получать гидрофильное состояние провода. Было исследовано изменение смачивания полученных покрытий при их длительном контакте с водой, при УФ-облучении поверхности и при выдержке в атмосфере, насыщенной озоном. Анализ результатов исследований позволил сделать выводы о возможности применения покрытий для снижения потерь на коронный разряд.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Изготовление покрытий.

Образцы для исследования представляли собой плоские пластины размером 15×20 мм и толщиной 2 мм из алюминиевого сплава Д16Т (ООО «Продиэлком», Россия). Большую часть сплава составляет алюминий – до 94.7%, остальное приходится на медь (3.8–4.9%), магний (1.2–1.8%) и другие примеси (Mn – 0.3–0.9%, Fe – до 0.5%, Si – до 0.5%, Zn – до 0.25%, Ti – до 0.25%, Cr – до 0.1%).

Первым этапом производили ультразвуковую очистку пластин, погруженных сначала в ацетон («Компонент-Реактив», Россия, ОСЧ, содержание основного вещества 99.8%), затем в дистиллированную воду. Далее алюминиевые пластины помещали в кислородную плазму Plasma Cleaner PDC-030 (Zhengzhou CY Scientific Instrument, Китай) с давлением кислорода 20–30 Па на 5 минут для формирования на поверхности металла активных центров хемосорбции, обеспечивающих химическое связывание покрытия с подложкой. Для нанесения гидрофильного покрытия на одну из сторон использовали раствор следующего состава: дистиллированная вода (300 масс. ч.), полиэтиленгликоль-400 (1800 масс. ч, «Sigma Aldrich», США, содержание основного вещества не менее 91%), изопропиловый спирт (6000 масс. ч., «Компонент-Реактив», Россия, ОСЧ, содержание основного вещества 99.8%) и 3-аминопропилтриэтоксисилан (600 масс. ч., «Силан», Россия, содержание основного вещества 98.97%). Все реагенты использовались без дополнительной очистки. Воду, полиэтиленгликоль-400 и изопропиловый спирт смешивали в указанных соотношениях и перемешивали, затем добавляли 3-аминопропилтриэтоксисилан, чтобы он, являясь наиболее реакционноспособным компонентом, как можно меньшее время контактировал с воздухом и растворителем.

При получении покрытий методом дип-коутинга алюминиевые пластины помещали вертикально в стакан объёмом 50 мл, на дне которого была выложена сетка с отверстием посередине для удаления остатков жидкости с нижнего торца образца. В стакан заливался раствор для формирования покрытия для полного погружения образца и после 1 минуты пропитки включали перистальтический насос со скоростью 60 мл/мин для обеспечения плавного снижения уровня жидкости вдоль всей подложки так, чтобы покрытие получилось равномерным по всей площади. После этого образцы аккуратно доставали сухим пинцетом из ёмкости и проводили их термообработку при 200°C в течение двух часов. После термической обработки все пластины охлаждали до комнатной температуры.

Исследование смачивания.

Состояние поверхности покрытия после приготовления и в процессе различных внешних воздействий характеризовалось углами смачивания водой и величиной поверхностного натяжения воды, контактирующей с покрытием. Для определения указанных величин использовали метод «поджатого» пузырька. С этой целью образец с покрытием помещали на подставку внутри оптической кюветы и добавляли необходимое количество воды так, чтобы образец был полностью погружён в жидкость. С помощью иглы, находящейся в кювете под образцом, выдували пузырёк воздуха и подводили его к поверхности покрытия (рис. 1). Для устранения искажений формы поверхности пузырька в гравитационном поле, возникающих при наклонном расположении подложки, подставка, на которую помещалась подложка, выставлялась в трёх плоскостях с помощью микрометрических винтов. Экспериментальная установка для регистрации оптических изображений подложки с пузырьком в воде включала телескопическую линзу Edmund Optics (Германия), черно-белую цифровую камеру PixeLink PL-A641 (Канада) и светодиодный осветитель. С применением описанной оптической системы на

чувствительной зоне видеокамеры формировали оптическое изображение пузырька. Анализ формы пузырька проводился методом цифровой обработки изображения и последующим описанием формы пузырька уравнением Лапласа с учетом гравитационного члена. Разработанное в лаборатории программное обеспечение позволяет описать экспериментальные точки, отвечающие поверхности пузырька, кривой Лапласа и найти такие параметры уравнения Лапласа, как отношение поверхностного натяжения жидкость/пар к плотности жидкости, угол смачивания подложки паровой средой, объем пузырька и его площадь поверхности [21]. В этой работе изменение состояния покрытия оценивалось по средним значениям углов смачивания, определенных для пяти различных участков поверхности каждого образца.

Рис. 1. Фотографии экспериментальной установки для исследования эволюции угла смачивания.

Выдержка покрытий в насыщенной озоном атмосфере.

Испытание на стойкость покрытий к воздействию озона проводили с помощью озоногенератора «Ozonbox Air-30» (Россия). Этот генератор производит озон из атмосферного кислорода. Озон генерируется в кварцевых разрядниках и поступает в емкость, в которой размещались исследуемые образцы. Концентрация озона составляла 0.1 г/м³ и оставалась постоянной в течение всей серии экспериментов. Для определения накопления озона в покрытии и деградации покрытия во времени в процессе контакта с насыщенной озоном атмосферой, сразу после извлечения образца из емкости с атмосферой, обогащенной озоном, измерялись углы смачивания водой.

УФ-облучение покрытий.

Для исследования устойчивости покрытий к УФ-излучению использовали диодную сборку (10 Вт High Power LED UV Light Chip, $\lambda = 365 \pm 5$ нм), включающую 9 светодиодов общей мощностью 10 Вт, прикреплённую к радиатору охлаждения. Поверхность исследуемого образца была параллельна поверхности диодной сборки и располагалась на расстоянии 2 мм так, чтобы площадь поперечного сечения расходящегося пучка лучей светодиодов совпадала с площадью образца. При такой взаимной ориентации излучателя и образца плотность мощности, падающего на образец УФ-излучения, составила 10 Вт/см².

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим вначале взаимодействие компонентов смеси в процессе формирования покрытий. Гидролиз 3-аминопропилтриэтоксисилана в присутствии воды с заменой этоксигрупп силана на –ОН-группы приводит к образованию концевых силанольных групп ($\equiv\text{Si-OH}$). Поликонденсация молекул с силанольными группами ведёт к образованию силоксановой связи и образованию полимерной пленки. Кроме того, часть концевых силанольных групп образует водородную связь с атомами кислорода ПЭГ-400, который встраивается в полимерную силоксановую сетку [22]. При этом часть молекул ПЭГ остается в несвязанном состоянии внутри полимера, формирующегося в процессе поликонденсации. Результатом таких процессов является образование гибридной полимерной сетки с частично связанными и частично свободными молекулами полиэтиленгликоля. При термическом отжиге плёнок свободные молекулы ПЭГ-400 не полностью удаляются из полимерной матрицы [22]. При дальнейшем нанесении смеси на подложку, содержащую хемосорбционно-активные гидроксильные и карбоксильные группы, адгезия пленки к подложке обеспечивается водородными связями, образующимися между этими центрами и концевыми силанольными группами силоксановой матрицы и

полиэтиленоксида. При контакте покрытия с сильными окислительными средами, например, насыщенной озоном атмосферой, или длительном контакте с водой, водородные связи молекул полиэтиленгликоля между собой и с силоксановой сеткой могут разрушаться, приводя к деградации пленки.

Для исследования стабильности полученных гибридных полимерных пленок на первом этапе исследовалась эволюция угла смачивания и поверхностного натяжения поджатого газопарового пузырька при погружении покрытия в воду. Эволюция обоих параметров при увеличении времени контакта покрытия с водой представлена на рис. 2. Для лучшего понимания процессов, происходящих при контакте пузырька с подложкой в окружении воды, также определяли эволюцию объема пузырька (рис. 2).

Рис. 2. Эволюция угла смачивания (красные квадратики, правая ось), поверхностного натяжения (синие кружки, первая левая ось) и объема пузырька (зеленые треугольники, вторая левая ось) от времени непрерывного контакта поверхности с поджатым пузырьком под водой.

Представленные на рис. 2 данные указывают на очень медленный рост объема пузырька. Этот рост в течение 32 ч сопровождается падением угла смачивания водой от $\theta = 58.7^\circ$ до $\theta = 51.1^\circ$ и поверхностного натяжения пузырька с 72.5 до 49.6 мН/м. Дальнейший контакт пузырька с подложкой до 75 ч также показывает рост объема пузырька, но значительно меньший, чем на первом этапе. Угол смачивания на этом, втором этапе, выходит на плато, соответствующее значению угла смачивания водой $\theta \approx 51^\circ$.

При этом на втором этапе экспозиции поверхностное натяжение возрастает до значения 50.7 ± 0.1 мН/м. Наблюдаемое поведение хорошо согласуется с взаимодействием связанных фрагментов ПЭГ-400 с водой, с одновременным удалением из гибридной

полимерной пленки слабо связанных с ней поверхностно-активных компонентов. Удаляющиеся из пленки поверхностно-активные фрагменты гибридной матрицы диффундируют на границу пузырек/вода, снижая ее поверхностное натяжение. При этом граница пленка/вода становится более гидрофильной. Однако тот факт, что угол смачивания покрытия водой выходит на постоянное значение, указывает на достаточно высокую стабильность покрытия. Наблюдающийся рост поверхностного натяжения пузырька, по-видимому, связан с ростом площади поверхности растущего в объеме пузырька при сохранении количества ПАВ на границе.

Рассмотрим теперь изменение свойств покрытия при длительном контакте с насыщенной озонной атмосферой. На рис. 3 представлено изменение угла смачивания со временем экспозиции. Представленные данные указывают на падение угла смачивания покрытия водой от $50.0 \pm 1.3^\circ$ до $29.9 \pm 2.6^\circ$ за 11 ч воздействия озона. При этом наблюдается увеличение разброса углов смачивания. Описанное поведение согласуется с данными, полученными ранее для супергидрофобного покрытия на алюминии [17], что указывает на близость механизмов гидрофилизации поверхности в обоих случаях. В основе наблюдаемого поведения могут лежать следующие два механизма. Во-первых, это разрушение и частичное удаление полимерной пленки под воздействием молекул сильного окислителя с одновременным окислением поверхности алюминиевой подложки. Здесь нужно отметить, что выбранная концентрация озона в воздухе значительно превышает ПДК и выше типичных концентраций озона, накапливающихся в воздухе вблизи линии электропередач в условиях коронирования провода [9]. Второй возможный механизм повышения смачиваемости водой может быть связан с адсорбцией озона, которая тем больше, чем гидрофильнее подложка, что было показано методами ИК-спектроскопии ранее [17]. Эффект гидрофилизации в последнем случае связан с тем, что молекулы озона, адсорбированные на поверхности, легко гидратируются.

Для разделения вклада этих двух механизмов в повышение гидрофильности покрытия под действием озона, в ходе эксперимента, данные которого представлены на рис. 3, нами было исследовано изменение смачивания при длительном перерыве в контакте с обогащенной озоном атмосферой. На рис. 3 по оси абсцисс отложено время нахождения образца в атмосфере озона, синими символами показаны результаты измерения углов смачивания сразу после контакта с озоном, а красным – углы, измеренные после выдержки образца на воздухе под бумажным фильтром, после соответствующего периода контакта с озоном. Отметим, что бумажный фильтр защищает от адсорбции на поверхность углеводородных загрязнений из атмосферы, а длительная выдержка после контакта с озоном приводит к десорбции с поверхности и разложению озона. Анализ полученных данных показывает, что если после 180 и 300 ч экспозиции в озоне последующая выдержка образца на воздухе в течение 10–20 ч сопровождается восстановлением угла смачивания практически до начального значения, то после 600 ч суммарного контакта с озоном, самовосстановление смачивания происходит лишь частично. Такое поведение позволяет заключить, что гидрофилизация покрытия на начальных этапах контакта с озоном определяется, в основном, адсорбцией озона. Однако после длительной экспозиции в озоне основной вклад в снижение угла смачивания вносят уже разрушение и окисление пленки и подложки. Увеличение разброса углов смачивания и нарушение, в ряде случаев, осевой симметрии пузырька согласуется с представленной здесь интерпретацией механизмов воздействия озона. В то же время следует подчеркнуть, что при использованных больших временах экспозиции и очень больших концентрациях озона эффект деградации пленки не очень значительный. При этом он способствует гидрофилизации пленки, что улучшает ее противокоррозионные свойства.

Рис. 3. Изменение угла смачивания покрытий в процессе экспозиции в озоне. Синими квадратиками отмечены углы смачивания непосредственно после экспозиции, красными кружками после дополнительной выдержки в воздушной атмосфере в течение 14 часов.

Рассмотрим теперь, как влияет длительное УФ-облучение на состояние поверхности полученной нами гибридной полимерной пленки. На рис. 4 показаны значения углов смачивания покрытия после длительного облучения излучением с длиной волны 365 нм.

Рис. 4. Изменение угла смачивания покрытий в процессе экспозиции в ультрафиолете с интенсивностью 10 Вт/см².

Практически постоянное значение углов смачивания в течение всего эксперимента при больших использованных мощностях излучения и длительных временах облучения указывает на высокую устойчивость полученного покрытия к разрушению под действием ультрафиолета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было синтезировано гидрофильное кремнийорганическое покрытие на основе 3-аминопропилтриэтоксисилана и полиэтиленгликоля-400 для нанесения на поверхность алюминиевых электрических проводов с целью снижения потерь на коронный разряд. Серия лабораторных экспериментов по исследованию поведения разработанного покрытия при длительном контакте с водой, насыщенной озоном атмосферой и достаточно мощным УФ-излучением показало, что в условиях эксплуатации при развитии коронного разряда и выпадении осадков, гидрофильность покрытия, необходимая для снижения потерь на корону, даже возрастает. Таким образом, результаты выполненных в данной

работе исследований позволяют рассматривать разработанное нами покрытие, как перспективное для использования в электроэнергетике при транспортировке энергии по линиям электропередач.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант № 21-73-10283, <https://rscf.ru/project/21-73-10283/>.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят академика РАН Бойнович Л.Б. за обсуждение этой работы.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бакай Е.О.* Экономико-статистический анализ потерь при передаче электроэнергии по высоковольтным проводам в России // Вестник ЮУрГУ. Серия «Экономика и менеджмент». 2017. Т. 11. № 4. С. 117–125.

<https://doi.org/10.14529/em170416>

2. *Sollerqvist F.J., Maxwell A., Rouden K., Ohnstad T.M.* Evaluation, verification and operational supervision of corona losses in Sweden // IEEE Transactions on Power Delivery. 2007. V. 22. № 2. P.1210–1217.

<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.881598>

3. *Boinovich L.B., Emel'yanenko A.M., Pashinin A.S.* Interactions of silicone rubbers designed for electrical engineering applications with aqueous media // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2009. V. 45. № 1. P. 89–94.

<https://doi.org/10.1134/S2070205109010146>

4 *Chen L., Bian X., Wang L., Guan Z.* Effect of rain drops on corona discharge in alternating current transmission lines with a corona cage // Japanese Journal of Applied Physics. 2012. V. 51. № 9. P. 09MG02.

<https://doi.org/10.1143/JJAP.51.09MG02>

5. *Yin F., Farzaneh M., Jiang X.* Electrical characteristics of an energized conductor under various weather conditions // High Voltage. 2017. V. 2. № 2. P. 102–109.

<https://doi.org/10.1049/hve.2016.0094>

6. *Yin F., Farzaneh M., Jiang X.* Laboratory investigation of AC corona loss and corona onset voltage on a conductor under icing conditions // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2016. V. 23, № 3. P. 1862–1871.

<https://doi.org/10.1109/TDEI.2016.005626>

7. Мороз А.С., Ковалева В.Д., Морозов А.Г. Способ снижения потерь электроэнергии в ЛЭП 500 кВ и выше с учетом влияния погодных условий на коронный разряд // Актуальные проблемы энергетики. СНТК-74. 2018. P. 369–370.
8. Emelyanenko K.A., Emelyanenko A.M., Boinovich L.B. Laser nanoengineered coatings for efficient energy transportation through corona discharge suppression // Optics & Laser Technology. 2024. V. 171. P. 110394.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.110394>
9. Emelyanenko K.A., Domantovsky A.G., Platonov P.S., Kochenkov P.S., Emelyanenko A.M., Boinovich L.B. The durability of superhydrophobic and slippery liquid infused porous surface coatings under corona discharge characteristic of the operation of high voltage power transmission lines // Energy Reports. 2022. V. 8. № 9. P. 6837–6844.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.05.035>
10. Bousiou E.I., Mikropoulos P.N., Zagkanas V.N. Corona inception field of typical overhead line conductors under variable atmospheric conditions // Electric Power Systems Research. 2020. V. 178. P. 106032.
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106032>.
11. Amin M., Akbar M., Amin S. Hydrophobicity of silicone rubber used for outdoor insulation (an overview) // Reviews on Advanced Materials Science. 2007. V. 16. P. 10–26.
12. Xu P., Hedtke S., Zhang B., Pfeiffer M., Franck C.M., He J. HVAC corona current characteristics and audible noise during rain // IEEE Transactions on Power Delivery. 2020. V. 36, № 1. P. 331–338.
<http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2020.2975803>
13. Schultz T., Pfeiffer M., Franck C.M. Optical investigation methods for determining the impact of rain drops on HVDC corona // Journal of Electrostatics. V. 77. P. 13–20.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2015.06.007>

14. Zhang X., Plaengpraphan C., Lian C., Li W., Han Q., Rowland S.M., Cotton I., Li Q. Degradation of superhydrophobic aluminium overhead line conductor surfaces // High Voltage. 2024. P. hve2.12455, <https://doi.org/10.1049/hve2.12455>.
15. Lian C., Emersic C., Rajab F.H., Cotton I., Zhang X., Lowndes R., Li L. Assessing the superhydrophobic performance of laser micropatterned aluminium overhead line conductor material // IEEE Transactions on Power Delivery. 2021. P. 1–1. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2021.3074946>.
16. Lian C., Zhang X., Emersic C., Lowndes R., Cotton I. Long-term durability of stearic acid silicon dioxide nanoparticle superhydrophobic coating on aluminium alloy overhead line conductors // 2019 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC) 2019 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). – Calgary, AB, Canada: IEEE. 2019. P. 238–241.
17. Domantovsky A.G., Emelyanenko K.A., Emelyanenko A.M., Boinovich L.B. The influence of prolonged high concentration ozone exposure on superhydrophobic coatings in static and high-speed flow atmosphere // Materials. 2022. V. 15. № 16. P. 5725. <https://doi.org/10.3390/ma15165725>
18. Montes Ruiz-Cabello F.J., Ibañez-Ibañez P., Paz-Gomez G., Cabrerizo-Vilchez M., Rodriguez-Valverde M.A. Fabrication of superhydrophobic metal surfaces for anti-icing applications // Journal of Visualized Experiments. 2018. № 138. P. 57635. <https://doi.org/10.3791/57635>.
19. Boinovich L.B., Emelyanenko K.A., Domantovsky A.G., Emelyanenko A.M. Laser tailoring the surface chemistry and morphology for wear, scale and corrosion resistant superhydrophobic coatings // Langmuir. 2018. V. 34. P. 7059–7066. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b01317>

20. *Domantovsky A.G., Chulkova E.V., Emelyanenko K.A., Maslakov K.I., Emelyanenko A.M., Boinovich L.B.* Evolution of superhydrophilic aluminum alloy properties in contact with water during cyclic variation in temperature // *Materials*. 2022. V. 15. № 7. P. 2447.
<https://doi.org/10.3390/ma15072447>
21. *Emelyanenko A.M., Boinovich L.B.* Application of dynamic thresholding of video images for measuring the interfacial tension of liquids and contact angles // *Instruments and Experimental Techniques*. 2002. V. 25. № 1. P. 44–49.
<https://doi.org/10.1023/A:1014544124713>
22. *Ramanauskaitė L., Snitka V.* The synthesis of controlled shape nanoplasmonic silver-silica structures by combining sol-gel technique and direct silver reduction // *Nanoscale Research Letters*. 2015. V. 10. № 1. P. 133.
<https://doi.org/10.1186/s11671-015-0839-x>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Фотографии экспериментальной установки для исследования эволюции угла смачивания.

Рис. 2. Эволюция угла смачивания (красные квадратики, правая ось), поверхностного натяжения (синие кружки, первая левая ось) и объема пузырька (зеленые треугольники, вторая левая ось) от времени непрерывного контакта поверхности с поджатым пузырьком под водой.

Рис. 3. Изменение угла смачивания покрытий в процессе экспозиции в озоне. Синими квадратиками отмечены углы смачивания непосредственно после экспозиции, красными кружками после дополнительной выдержки в воздушной атмосфере в течение 14 часов.

Рис. 4. Изменение угла смачивания покрытий в процессе экспозиции в ультрафиолете с интенсивностью 10 Вт/см^2 .

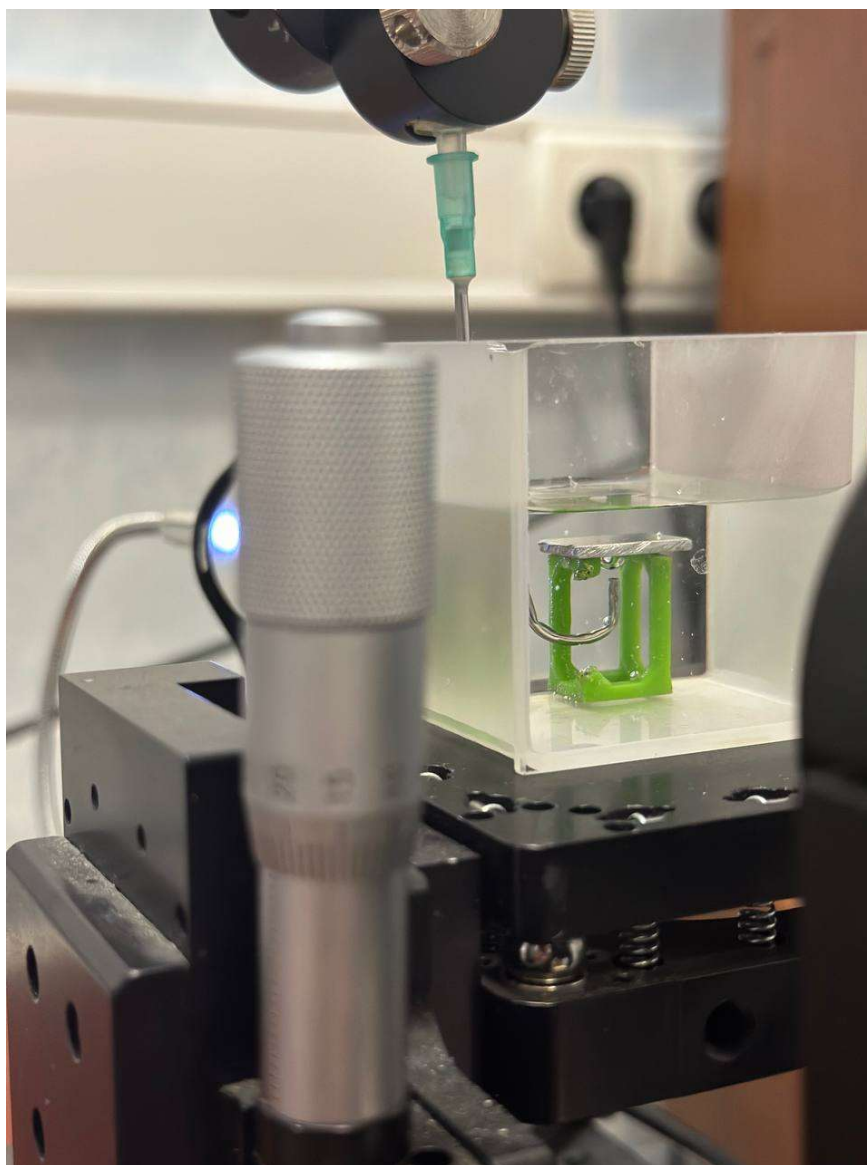


Рисунок 1. (Емельяненко)

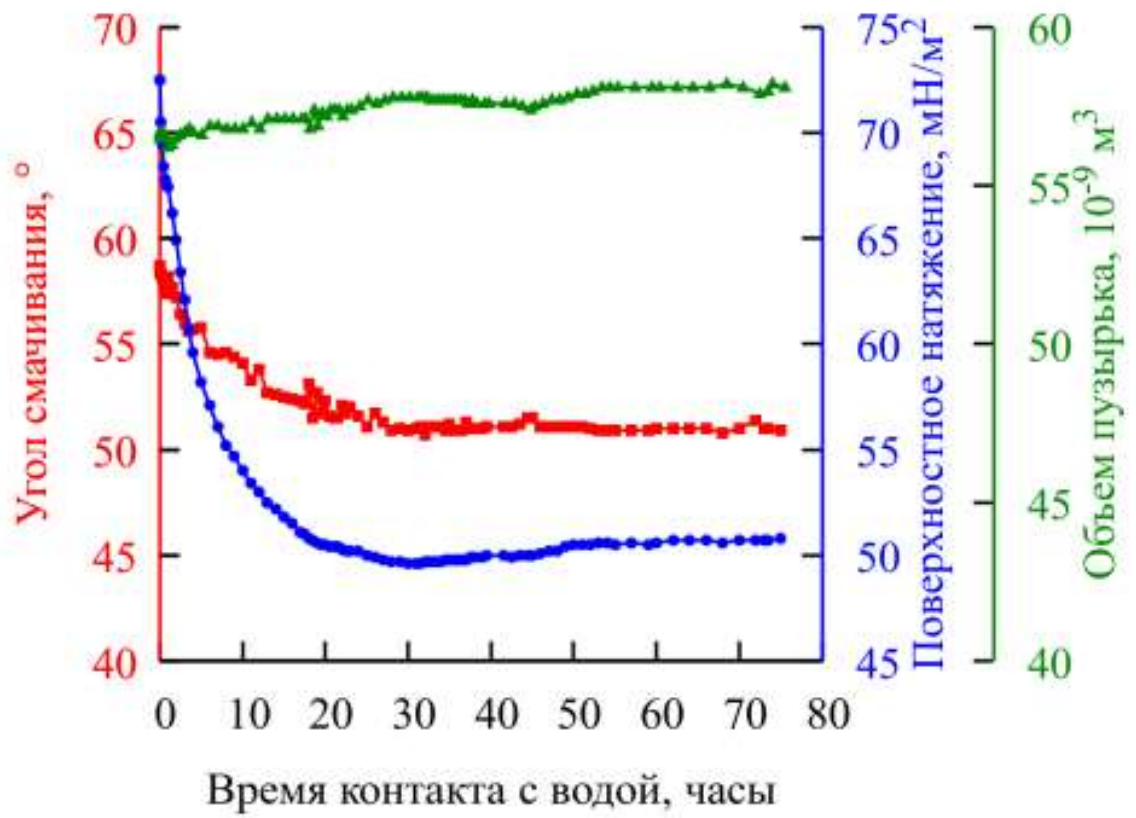


Рисунок 2. (Емельяненко)

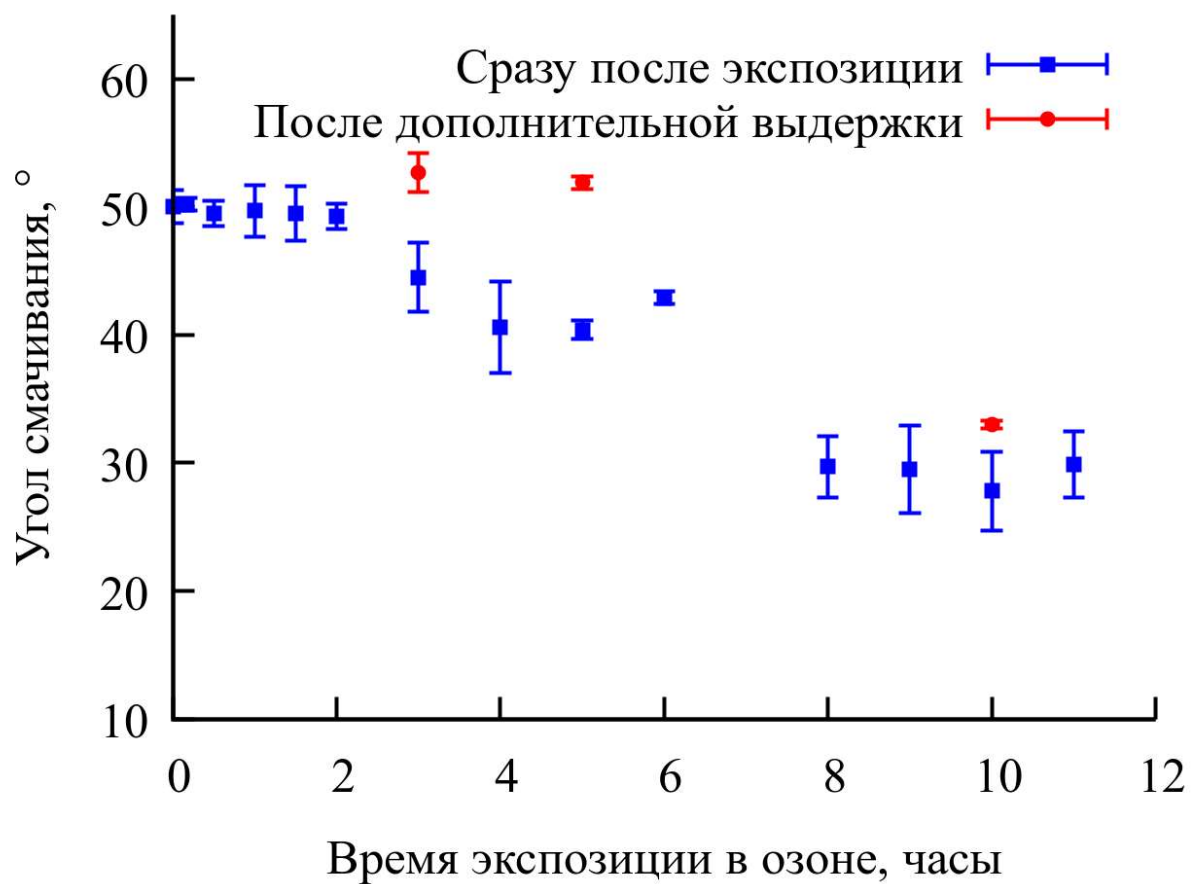


Рисунок 3. (Емельяненко)

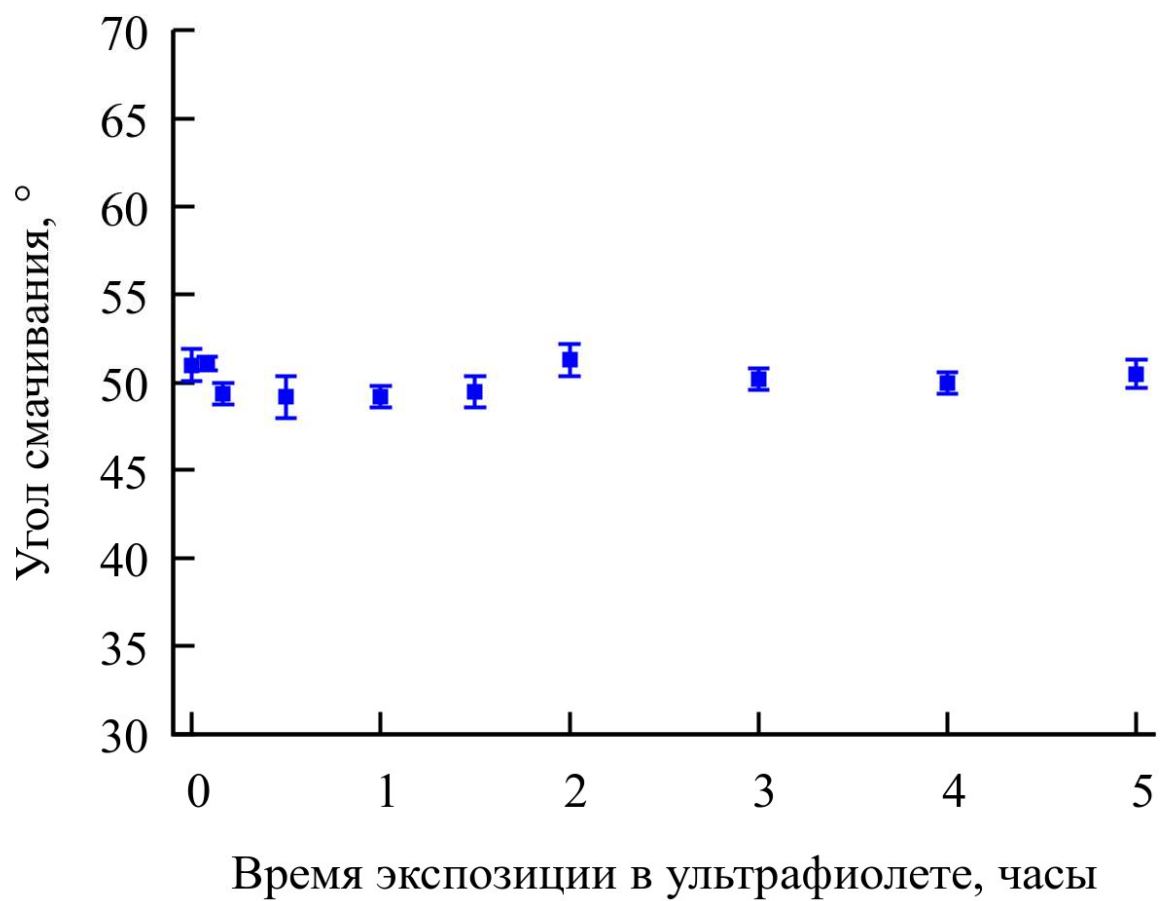


Рисунок 4. (Емельяненко)