

НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ РАЗРЯДНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОЧИСТКИ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ**А.Е. Ефимов¹, А.Г. Бубнов²**

¹Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: artem.efimov.1995@list.ru

²Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы МЧС РФ, проспект Строителей, 33, Иваново, Российская Федерация, 153040

Выявлено отсутствие методов проектирования наилучших доступных технологий, в частности, газоразрядных систем очистки воздуха. Отсутствие первого затрудняет имплементацию плазменно-химических систем в промышленность, особенно в системы защиты окружающей среды, а также препятствует их совершенствованию. Для решения выявленной проблемы предложена структурная схема надежности функционирования газоразрядной системы очистки, состоящая из системы подачи воздуха, системы питания и системы генерации активных частиц, и позволяющая определить основные причины отказов и/или повреждений компонентов системы. Найдено, что системы подачи газо-паровоздушных смесей и питания не определяют надежность рассматриваемых систем очистки воздуха/газов, поскольку их показатели надежности имеют относительно высокие значения. К основным причинам отказов системы питания относятся нарушение изоляции и короткое замыкание трансформаторов. Поскольку публикации, посвященные исследованию надежности газоразрядных устройств при очистке воздуха, крайне малочисленны, то оценка средних значений упомянутых показателей, а также выяснение причин основных причин отказов, крайне затруднены. Исходя из этого, определение причин отказов газоразрядных ячеек осуществлялось косвенно, т.е. на основе данных по отказам разрядных устройств, применяемых в других отраслях промышленной или иной деятельности. Обнаружено, что наиболее уязвимым компонентом схемы является система генерации активных частиц. Так, основной причиной уменьшения наработки на отказ устройства является образование конденсированной/полимеризованной фазы на поверхности электрода, при этом рассмотренная причина обуславливает относительно низкую надежность газоразрядных элементов системы. Менее вероятными причинами неисправностей являются сублимация материала электрода, также диффузия и адсорбция частиц плазмы (включая материал электрода) в/на стеклянные стенки реактора, с последующим повышением электрического сопротивления разрядного устройства. Последние причины могут оказывать влияние на показатель долговечности.

Ключевые слова: газоразрядные системы очистки воздуха, надежность, летучие органические соединения

ELEMENTS RELIABILITY OF DISCHARGE SYSTEMS FOR CLEANING EXHAUST GASES**A.E. Efimov¹, A.G. Bubnov²**

¹Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, Russia, 153000

E-mail: artem.efimov.1995@list.ru

²Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters», Stroiteley ave., 33, Ivanovo, Russia, 153040

A lack of methods for designing the best available technologies, in particular, gas-discharge air purification systems, has been revealed. The absence of the first makes it difficult to introduce

plasma-chemical systems into industry, especially into environmental protection systems, and also hinders their improvement. Therefore, at the initial stage, to solve the identified problem, a block diagram of the reliability of the functioning of the gas-discharge cleaning system was proposed, consisting of an air supply system, a power supply system and an active particle generation system, and allowing one to determine the main causes of failures and/or damage to system components. It was found the systems for supplying gas-steam-air mixtures and power do not determine the reliability of the air/gas purification systems under consideration, since their reliability indicators have relatively high values. The main causes of power system failures include insulation failure and short-circuiting of transformers. Since publications devoted to the study of the reliability of gas-discharge devices for air purification are extremely few in number, assessing the average values of the mentioned indicators, as well as identifying the causes of the main causes of failures, is extremely difficult. Based on this, the determination of the causes of failures of gas-discharge cells was determined indirectly, i.e. based on data on failures of discharge devices used in other industries or other activities. It was discovered that the most vulnerable component of the scheme is the active particle generation system. Thus, the main reason for reducing the time between failures of a device is the formation of a condensed/polymerized phase on the surface of the electrode, while the considered reason causes the relatively low reliability of the gas-discharge elements of the system. Less likely causes of malfunction are sublimation of the electrode material, as well as diffusion and adsorption of plasma particles (including electrode material) into/on the glass walls of the reactor, with a subsequent increase in the electrical resistance of the discharge device. The latter reasons may affect the durability indicator.

Keywords: gas discharge air purification systems, reliability, volatile organic compounds

Для цитирования:

Ефимов А.Е., Бубнов А.Г. Надежность элементов разрядных систем для очистки отходящих газов. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2024. Т. LXVIII. № 3. С. 90–99. DOI: 10.6060/rcj.2024683.14.

For citation:

Efimov A.E., Bubnov A.G. Elements reliability of discharge systems for cleaning exhaust gases. *Ros. Khim. Zh.* 2024. V. 68. N 3. P. 90–99. DOI: 10.6060/rcj.2024683.14.

ВВЕДЕНИЕ

В справочнике [1] по наилучшим доступным технологиям (НДТ) указано, что плазменно-каталитические системы очистки воздуха (ПКС) от летучих органических соединений (ЛОС, в действительности являющимися актуальными загрязнителями [2]) относятся к группе перспективных технологий. Причина отнесения ПКС к указанной группе заключается в том, что подобные системы позволяют устранять низкие в технологическом, но высокие в санитарно-экологическом смысле, концентрации ЛОС, более эффективно, по сравнению с другими системами НДТ. Отметим, что в литературе имеется достаточно большое количество публикаций, посвященных удалению органических соединений из отходящих газов в лабораторных условиях (например, в [3–5]). Вместе с тем, применение плазмы газоразрядных систем в промышленности ограничено не только недостаточно разработанным аппаратным оформлением проектирова-

ния газоразрядных систем для имплементации в промышленности (для реальных условий очистки), а также отсутствием данных по надежности ПКС.

В действительности, научное обоснование, разработка и совершенствование методов проектирования технико-технологических систем очистки в настоящее время осуществляется при помощи математических моделей, поскольку в значительной степени упрощается экспериментальная проверка и анализ работы всей системы [6]. Кроме того, облегчается способ совершенствования очистного сооружения, благодаря улучшению точности математической модели. Однако, отсутствие систематических исследований, направленных на выявление причин отказов газоразрядных очистных систем создало актуальную проблему, связанную с затруднением разработки метода проектирования (и, соответственно, совершенствования). Поэтому, в данной работе обсуждаются факторы, влияющие на надежность газоразрядных очистных устройств и компонентов, входящих в эти системы.

ПРИЧИНЫ ОТКАЗОВ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ СИСТЕМ ОЧИСТКИ

Количество факторов, обуславливающих надежность рассматриваемых систем, может быть большим, поскольку зависит от числа компонентов, включенных в систему. Поэтому для выявления причин неисправностей газоразрядных систем необходимо определить основные компоненты последних, соответственно, для этого можно воспользоваться структурной схемой надежности функционирования аппарата с последовательным соединением элементов [7]:

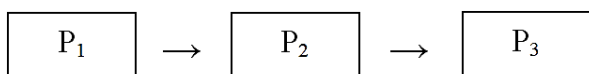


Рис. 1. Структурная схема надежности газоразрядной системы очистки. P_1 – система подачи воздуха (насос), P_2 – система питания (трансформатор), P_3 – система генерации активных частиц (реактор)

Из рисунка 1 видно, что основными компонентами ПКС являются насос, повышающий/понижающий трансформатор и проточный плазменный реактор. Первый в системах используется для регулирования объемного расхода воздуха, и, соответственно, концентрации загрязняющего вещества, а также изменения времени контакта загрязненного воздуха с окислительной средой реактора. Функцией системы питания/трансформатора является создание и/или изменение напряжения разряда вплоть до пробоя воздушного промежутка, а также поддержание возбужденной ионизированной среды. Последний элемент (система генерации активных частиц) представляет собой реактор с изолированными и/или неизолированными электродами, расположенными на малом расстоянии (от 0,1 до 5 мм), и используется для создания выше упомянутой среды, включающей активные частицы типа OH^* , $\text{O}(^3\text{P})$ и O_3 [8]. Радикал OH^* обладает высоким коэффициентом скорости взаимодействия по отношению к ЛОС [9, 10], а $\text{O}(^3\text{P})$ [11] и O_3 , вероятно, эффективны за счет того, что присутствуют в разряде в относительно высоком количестве [8, 12, 13].

Так, насосы, используемые в промышленной деятельности, обладают высокими значениями времени наработки на отказ [14], кроме того, такие устройства подвержены резервированию для снижения вероятности загрязнения воздуха рабочей зоны в предприятиях. Соответственно, P_1 не может определять надежность системы очистки ($P_{\text{сист}}$),

поскольку последнее является результатом произведения вероятностей безотказной работы элементов. Таким образом, цель работы посвящена выявлению/установлению причин отказов и/или снижения срока службы (как показателей надежности) P_2 и P_3 .

ПРИЧИНЫ ОТКАЗОВ И НАДЕЖНОСТЬ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В настоящее время причины отказов трансформаторов достаточно хорошо изучены, поскольку благодаря им обеспечивается снабжение энергией промышленного комплекса и, соответственно, появление неисправностей в таких системах приводит к экономическим потерям, в неблагоприятном случае – аварийным ситуациям. По этой причине трансформаторы, как и насосы, подвергаются резервированию [15]. Поэтому, в данной части отмечаются только основные (наиболее частые) причины отказов P_2 .

Основной причиной зарегистрированных отказов трансформаторов, как сообщают Виллиам и Бартли [16], является «пробой изоляции». Эта категория включает в себя неправильную или дефектную установку, ухудшение изоляции и короткие замыкания, но не внешние перенапряжения, такие как молния и неисправности линии.

Второй ведущей причиной отказов трансформаторов является ошибка проектирования/производства [16]. В эту категорию входят такие состояния, как: незакрепленные или неподдерживаемые выводы, ослабленная блокировка, плохая пайка, неадекватная изоляция жилы, низкая устойчивость к короткому замыканию и посторонние предметы, оставшиеся в баке [16].

Авторы [16] отмечают, что средний возраст трансформаторов, вышедших из строя из-за пробоя изоляции, составил 18 лет. С другой стороны, согласно Institute of Electrical and Electronics Engineers Standard 57.100–1999 [17] срок службы трансформатора с диэлектрическим маслом составляет 20,55 лет.

Джасприт и др. [18] на основе проведенного анализа отказов 348 трансформаторов (2010–2015 гг.) выявили, что наиболее распространенной причиной отказа является нарушение изоляции (табл. 1).

В [18–20] подчеркивается, что нарушения изоляции и другие отказы трансформатора могут быть следствием комбинации электрических, механических или тепловых факторов. Так, в [21] отмечается, что из перечисленных факторов наибольшее влияние на состояние 334 трансформатора оказал механический фактор (45%), затем следует электрический (25%), а тепловому соответствует (30%).

Анализ отказов компонентов трансформатора [18] показывает, что 42% устройств вышли из строя из-за повреждения изоляции, 15% – из-за повреждения обмотки, 14% – из-за выхода из строя вводов (табл. 2).

Похожие причины для 136 трансформаторов наблюдаются в [22] – втулки и переключатели составляют 30% и 33% отказов соответственно, а обмотки были неисправны в 16% случаев.

В публикациях [23, 24] также затрагиваются причины отключения трансформаторов. Показано, что наиболее частой причиной является короткое замыкание. В [25, 26] основной причина – нарушение изоляции.

Из перечисленных публикаций можно выделить следующее:

в большинстве исследований к наиболее вероятным причинам отказа трансформаторов относятся нарушение изоляции и короткое замыкание. Кроме того, в качестве одного из наиболее уязвимых компонентов часто упоминаются обмотки. Несмотря на это, этот элемент системы очистки обладает достаточно высоким значением показателя наработки на отказ (19 лет, в среднем, учитывая дан-

ные публикаций [16, 17]). Следовательно, наработка трансформатора не может сильно влиять на величину $P_{сист}$.

Таблица 1

Данные об отказе трансформатора по разным причинам [16]

Причина отказа	Число отказов	Процент
Нарушение изоляции	92	26,44
Заводские дефекты	22	6,32
Перегрузка	30	8,62
Скачок напряжения (за исключением грозы)	70	20,11
Ошибки в техническом обслуживании	19	5,46
Грозовое перенапряжение	14	4,02
Влажность	21	6,03
Загрязнение масла	20	5,75
Другие	60	17,24

Таблица 2

Ежегодные данные о выходе из строя компонентов трансформатора [18]

Детали	2010	2011	2012	2013	2014	2015	Итог
Магнитопровод	2	3	3	1	2	3	14
Обмотка	6	7	11	9	10	11	54
Корпус	1	1	2	2	1	2	9
Изоляция	16	25	21	28	25	30	145
Масло	2	4	5	3	5	4	23
Ввод/вывод линии	6	9	8	7	9	10	49
Другие	7	8	10	6	12	11	54
Итог	41	47	50	66	69	75	348

ПРИЧИНЫ ОТКАЗОВ СИСТЕМ ГЕНЕРАЦИИ АКТИВНЫХ ЧАСТИЦ

Газоразрядные устройства нашли широкое применение в промышленности, транспортной и медицинской областях, например, используются люминесцентные лампы для освещения поверхностей, автомобильные свечи зажигания топливно-воздушной смеси, а также озонаторы для лечения и профилактики [27]. Актуальность устройств подтверждается тем, что продолжаются исследования, связанные с изменением физико-химических свойств поверхностей в присутствии плазмы [28, 29]. К сожалению, научные публикации по исследованию надежности газоразрядных устройств не обладают таким количеством статистических данных, как трансформаторы, которые позволяют

определить функцию распределения отказов и соответствующие показатели надежности. Кроме того, как будет указано далее, рассматриваемые устройства преимущественно посвящены замкнутым системам (трудноприменимым для целей очистки отходящих газов и воздуха), при этом некоторые эксперименты проводились при низких значениях давления. Однако явления, происходящие в таких системах, вероятно, качественно можно распространить и на проточные газоразрядные устройства.

Причины отказов люминесцентных ламп (ЛЛ)

Авторы [30] отмечают три основных причины потемнения – снижения эффективности работы ЛЛ (отказа): износ электроразрядного мате-

риала; его окисление и диффузия примесей, возникающих в процессе производства.

В работе [31] приведены результаты испытаний для установления зависимости между падением напряжения на катоде и временем жизни ЛЛ. Из исследования прослеживается обратная корреляция между упомянутыми величинами. В частности, когда напряжение катода выше 18 В, срок службы не превышает 1000 ч. При этом, поверхность эмиттера, нанесенного на катод, значительно чернеет. Считается, что электрод в таком состоянии не способен поддерживать устойчивый дуговой разряд и происходит обратный переход к тлеющему разряду, а значит, прекращение срока службы наступает раньше.

Причины отказов ламп накаливания (ЛН)

Несмотря на то, что ЛН не относятся к газоразрядным устройствам, отказы, которые свойственны таким устройствам, могут предшествовать появлению неисправностей в плазменных реакторах.

В публикации [32] отмечается, что средний срок службы ЛН определяется уменьшением светового потока, вызванным неизбежным отложением испаренного электродного материала (чаще всего из W) на внутренней стенке корпуса (потемнение кварцевой оболочки, и, следовательно, уменьшение коэффициента пропускания), поскольку электроды находятся в непосредственном контакте с плазмой. После потери массы электрода примерно на 5% может произойти поломка лампы. При этом, с увеличением температуры усиливается эффект износа, например, при достижении электродом температуры 3300 К (температура плавления W - 3655 К), срок службы сокращается всего до нескольких ч.

В [33] утверждается, что срок службы ламп накаливания в первую очередь определяется скоростью испарения нити накала. По мере испарения (сублимирования) нить накала становится все тоньше, что увеличивает ее сопротивление и снижает светоотдачу. В качестве наиболее распространенного типа неисправности для ЛН является «тепловой удар», который возникает при включении лампы. Причина отказа заключается в протекании тока со скоростью света в нити накала, заставляющей нить накала колебаться до тех пор, пока она не порвется [34].

Причины отказов свечей зажигания для двигателей внутреннего сгорания

Лин и др. [35] представили результаты исследования эрозии и выхода из строя свечей зажигания после эксплуатации в двигателе, работающем на природном газе, в течение 4386 ч. Показано, что боковые поверхности заземляющего электрода

(рис. 2 (а) и (б)) были покрыты стеклообразной фазой, обогащенной Ca, Zn, P и S. Также наблюдалась оксидная фаза, содержащая Pt и Ni со значительным количеством Ca.

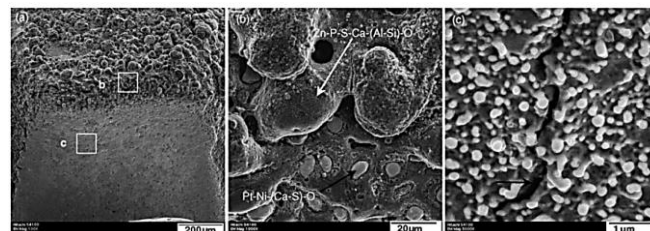


Рис. 2. Микрофотографии бокового электрода из сплава Pt-W, демонстрирующие значительное образование стекловидной фазы, на боковой поверхности электрода (б), а также образование трещин и локализованное плавление на поверхности вставки наконечника из сплава Pt-W (с) [35]

В результате прогрессирующего образования фазы Pt–Ni–O в результате реакции окисления и роста трещин может привести к существенному увеличению электрического сопротивления и, следовательно, напряжению пробоя для продолжения воспламенения [35]. Достижение критической длины, в конечном итоге может привести к пробое диэлектрика и отказу свечи зажигания.

Арун и др. [36] в качестве основных неисправностей, возникающих в свечах зажигания, рассматривают углеродное загрязнение и перегрев.

На рис. 3 представлен поперечный разрез вышедшей из строя свечи зажигания. Выделяются два изолирующих слоя. В составе внутреннего слоя присутствуют Fe, Mn и Ca с меньшим количеством Pt (вероятным источником является используемое топливо, т.к. данные элементы не входят в состав электрода). Внешний слой состоит в основном из углерода [37].

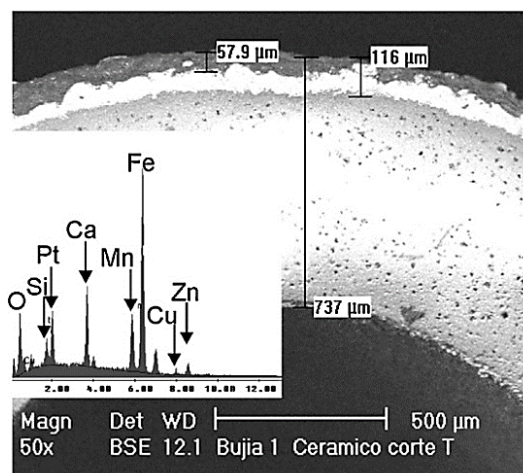


Рис. 3. Профильный вид вышедшей из строя свечи зажигания [37]

Зависимость между скоростью износа электрода свечи зажигания и температурой его поверхности для Pt, Ir, Ag и Ni выявлена Рагером и др. [38]. Показано, что при превышении температуры 500 °С, зависимость приобретает экспоненциальный вид (для Ni и Ag), за исключением Ir и Pt. Кроме того, наблюдается увеличение скорости износа электрода при снижении атомной массы металла.

Причины отказов газоразрядных ламп

Волк и др. [39] исследовали несколько возможных механизмов отказа ламп, используемых в работе рубидиевых атомных часов. Эти механизмы включали тушение возбужденных атомов Rb, реакцию Rb с примесями и взаимодействие Rb со стеклом. Исследования показали, что взаимодействие Rb со стеклом и реакция Rb с примесями являются двумя основными причинами истощения Rb, при этом первое оказывало более значительное влияние.

Венкатарман и др. [40] на основе наблюдений, полученных в ходе различных экспериментов с лампами на основе барьерного разряда (неизолированный электрод из Rb), выявили несколько возможных причин, связанных с колебанием оптической мощности источников: (1) паяные коммутации теряют свою целостность, что приводит к изменению мощности, подаваемой на лампу, и (2) диффузия Rb на внутреннюю поверхность стекла, что приводит к более слабому пропусканию света от Rb-лампы.

Васильев и др. [41, 42] наносили на внутреннюю поверхность кварцевой трубки газоразрядной лампы (дуговой разряд) тонкий слой оксида редкоземельного металла, позволяющего снизить взаимодействие кварцевого стекла с плазмаобразующим газом и значительно увеличить время наработки на отказ.

Ванг и др. [43] подтвердили, что карбонизация поверхности вольфрамовых электродов в газоразрядной лампе при различных температурах демонстрирует общую тенденцию к снижению плотность тока катода.

Авторами [44] были проведены эксперименты по определению факторов, влияющих на скорость удаления газа из разряда («очистка»). Для эксперимента использовалось несколько вакуумированных кварцевых разрядных трубок, заполненные смесью гелия и неона (17 % Ne) до давления около 2 торр и возбуждаемые с помощью ВЧ-источников питания с переменной мощностью до 200 Вт на частоте 27 МГц. Результаты экспериментов в присутствии электродов площадью 0,3 и 15 см² по-

казали, что наименьшая «очистка» происходит, когда (а) температура стенки (т.е. мощность разряда) мала и (б) площадь электрода велика.

В работе [44] представлены и результаты эксперимента по «очистке» с использованием разрядной трубки, идентичной кварцевой, но полностью изготовленной из стекла (Pyrex). Очистка с помощью этой трубки была действительно очень быстрой (примерно в 10³ раза быстрее, чем для трубки из SiO₂ (кварц) в аналогичных условиях).

Факторы и закономерности, влияющие на надежность газоразрядных реакторов

Известно, что в плазменно-химических реакторах, например, с диэлектрическим барьерным разрядом (ДБР), при обработке паров органических соединений возможно образование конденсированной фазы на поверхности электрода, контактирующего с плазмой [45–52]. Как и в случае автомобильных свечей зажигания, такой слой способен привести к повышению напряжения пробоя воздушного промежутка и, соответственно, предотвратить взаимодействие окислительной среды с веществом. Поэтому, в силу малого количества публикаций о причинах неисправности газоразрядных устройств [53], данный раздел будет посвящен закономерностям образования полимерных пленок, поскольку последние могут дать косвенное представление о надежности упомянутых реакторов.

Так, одним из элементов исследования Масинса [54] было выявление влияния содержания гексаметилдисилоксана (ГМДС) и вкладываемой мощности в разряд на скорость образования пленки в присутствии N₂O ([N₂O]/[ГМДС]=24). Выявлено, что при увеличении концентрации ГМДС от 4 ppm до 44 ppm (мощность разряда = 0,5 Вт/см²) максимальная скорость роста увеличивается почти линейно с наклоном 0,2 нм/мин на единицу концентрации ГМДС (ppm). А при изменении мощности (концентрация ГМДС = 4 ppm) от 0,2 до 20 Вт/см² скорость оседания увеличивалась также линейно и достигала 36 нм/мин.

Сонненфелд и др. [55] определили зависимость толщины конденсированной фазы на основе ГМДС (3,6% в атмосфере Ar) в ферроэлектрическом барьерном разряде от температуры подложки. Показано, что расчетная толщина пленки уменьшается с ростом температуры.

Де Гейтер и др. [56] исследовали влияние концентрации мономеров метилметаакрилата (ММА) и мощности разряда на толщину плазмо-полимеризованных пленок ММА (пленок ППММА). Показано, что скорость осаждения незначительно

снижается с 2,17 до 0,89 нм/с при уменьшении концентрации мономера с 9,4 до 5,7 ppm. При увеличении мощности разряда с 26,8 до 36 Вт наблюдается увеличение скорости осаждения с 1,65 до 2,17 нм/с. Однако при дальнейшем увеличении мощности разряда до 50,8 Вт скорость осаждения существенно снижается до 1,01 нм/с [54]. Как и в случае ГМДС [54], толщина пленок ППММА линейно увеличивается со временем осаждения.

Морент и др. [57] также исследовали влияние мощности на скорость полимеризации мономера акриловой кислоты. Наблюдается линейное увеличение толщины пленки с увеличением времени осаждения. Однако при увеличении мощности разряда скорость полимеризации уменьшается.

Ван Дейнс [58] выявили линейную зависимость между толщиной конденсированного слоя этанола в атмосфере азота и временем воздействия плазмы. Определенные скорости осаждения равнялись 35 нм/мин и 59 нм/мин при мощности разряда 2,1 Вт и 6,3 Вт соответственно.

Битар и др. [59] сообщают, что при более высоких вкладываемых мощностях фрагментация увеличивается, что приводит к более устойчивым структурам. В этом исследовании также показано, что существует максимум мощности, при которой скорость осаждения достигает наибольшего значения и далее уменьшается. Этот эффект был классифицирован и назван как область достаточной и дефицита концентрации мономера (рис. 4).

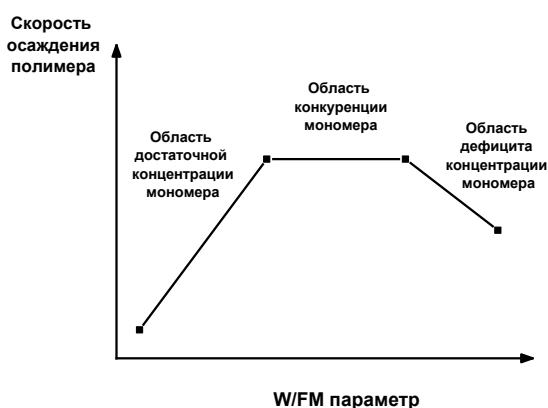


Рис. 4. Схематическое изображение областей плазменной полимеризации. W — мощность разряда [Дж/с], F — скорость потока мономера [моль/с] и M — молекулярную массу мономера [кг/моль]; [57]

Хейз и др. [60] отмечают, что входная энергия, необходимая для фрагментации молекулы-предшественника, также зависит от функциональности и конфигурации связи. Например, аромати-

ческие молекулы имеют тенденцию полимеризоваться при более низкой мощности и частоте и обладают более высокими скоростями роста по сравнению с ненасыщенными углеводородами, такими как акриловая кислота, акриламид, акрилоилхлорид и метилметакрилат, для полимеризации которых требуется более высокая энергия.

Рассмотренные публикации позволяют сделать следующие выводы:

а) поскольку в плазменно-химических устройствах очистки воздуха, в частности ДБР, нейтральная компонента плазмы и электроды обладают температурой не выше 350 – 450 К, то нагрев и сублимацию неизолированных электродов, а, следовательно, и явление «очистки», можно рассматривать как маловероятное событие, с точки зрения отказа устройства; подобное явление может оказаться определяющим для показателя долговечности;

б) с другой стороны, загрязнение поверхности электрода(-ов) может привести к повышению сопротивления разрядного пространства и тем самым привести к отказу элемента (реактора-ячейки) при очистке воздуха от ЛОС; соответственно, изменение параметров очистки (вкладываемая мощность, начальная концентрация, и, вероятно, материал подложки) позволит найти оптимальное значение скорости образования конденсированной фазы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1) в сравнении с системами питания и подачи воздуха, однозначно определить средние значения показатели надежности систем генерации активных частиц из-за отсутствия какой-либо выборки достаточно тяжело, а использование единичных оценок может привести к большим ошибкам при вычислении эффективности систем очистки воздуха; таким образом необходимо проведение большего количества исследований в области надежности рассматриваемых систем, в частности, с варьированием параметров очистки;

2) на основе уже существующих публикаций систему генерации активных частиц можно рассматривать как наиболее уязвимый элемент системы очистки воздуха; соответственно, выявленные причины отказов могут быть учтены при совершенствовании газоразрядных устройств, например, путем моделирования надежности плазменно-химических реакторов.

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

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

ЛИТЕРАТУРА

1. ИТС 47-2017. Системы обработки (обращения) со сточными водами и отходящими газами в химической промышленности. М.: Бюро НДТ. 2017. 114 с.
2. Куленцан А.Л., Марчук Н.А., Башикинов М.Ю., Пузанов А.М., Ширяев М.Ю. Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва). 2024. Т. LXVIII. № 2. С. 112-120. DOI: 10.6060/rcj.2024682.15.
3. Wan Y., Fan X., Zhu T. Chem. Engin. J. 2011. V. 171. N 1. P. 314–319. DOI: 10.1016/j.cej.2011.04.011.
4. Трушкин А.Н., Грушин М.Е., Кочетов И.В., Трушкин Н.И., Акишев Ю.С. Физика плазмы. 2013. Т. 39. № 2. С. 193–209. DOI: 10.7868/S0367292113020029.
5. Манукян А.С., Рыбкин В.В. Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва). 2020. Т. LXIV. № 2. С. 26-29. DOI: 10.6060/rcj.2020642.4.
6. Гумеров А. М. Математическое моделирование химических технологических процессов: учеб. пособие для вузов по направлениям «Хим. Технология» и «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в хим. технологии, нефтехимии и биотехнологии». СПб. [и др.]: Лань. 2014. 176 с.
7. Острейковский В.А. Теория надёжности. М.: Высшая школа. 2003. 463 с.
8. Ефимов А.Е., Бубнов А.Г. Росс. журн. прик. экол. 2023. № 1. С. 38–44. DOI: 10.24852/2411-7374.2023.1.38.44.
9. Кондратьев В.Н. Константы скорости газозафазных реакций. М.: Наука. 1970. 351 с.
10. Акишев Ю.С. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2019. Т. 62. Вып. 8. С. 26–60. DOI: 10.6060/ivkkt.20196208.5908.
11. Лецик А.В., Очередыко А.Н., Рябов А.Ю., Петренко Т.В., Кудряшов С.В. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2023. Т. 66. Вып. 11. С. 18–24. DOI: 10.6060/ivkkt.20236611.10t.
12. Гуцин А.А., Гриневич В.И., Квиткова Е.Ю., Гусев Г.И., Шутов Д.А., Иванов А.Н., Манукян А.С., Рыбкин В.В. Изв. вузов. Химия и хим. Технология. 2023. Т. 66. Вып. 7. С. 120–131. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6835j.
13. Смирнов С.А., Титов В.А., Рыбкин В.В. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2012. Т. 55. Вып. 4. С. 12–20.
14. Боннет В. В. Вестник ИРГСКХА. 2017. № 81–2. С. 100–105.
15. Малкин П. Электроэнерг. Перед. и распре. 2016. Т. 3. № 36. С. 76–79.
16. William H., Bartley P.E. Analysis of transformer failures. 36th Annual Conference of International Association of Engineering Insurers–Stockholm. 2003.
17. C57.100-1999, IEEE standard test procedure for thermal evaluation of liquid-immersed distribution and power transformers. Power. 1999.
18. Singh. J., Singh S. Engineer. Fail. Anal. 2019. V. 99. P. 180–191. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.02.014.
19. Kumar A., Singh S.K., Husain Z. Adv. Environ. Agric. Sci. 2015. P. 265–700.
20. Rizk F.A.M., Trinh G.N. High Voltage Engineering. CRC Press. 2014. 763 p.
21. Singh. J., Singh S. Int. J. Engin. Res. & Tech. 2016. V 4. P. 1–5.
22. Jagers J. N., Khosa J., De Klerk P. J., Gaunt C. T. Transformer reliability and condition assessment in a south african utility. International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana. 2007. T6-442.
23. Rexhepi V. Energy Procedia. 2017. V. 141. P. 418–422. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.11.053.
24. Vahidi F., Tenbohlen S. Statistical failure analysis of European substation transformers. ETG-Fachbericht-Diagnostik elektrischer Betriebsmittel. 2014. 5 p.
25. Murugan R., Ramasamy R. Engin. Fail. Anal. 2015. V. 55. P. 182–192. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.06.002.

REFERENCES

1. ITD 47-2017. Treatment (handling) systems for wastewater and exhaust gases in the chemical industry. M.: Byuro NDT. 2017. 114 p (in Russian).
2. Kulentsan A.L., Marchuk N.A., Bashkinov M.Y., Puzanov A.M., Shiryayev M.Y. Ros. Khim. Zh. 2024. V. 68. N 2. P. 112-120. DOI: 10.6060/rcj.2024682.15.
3. Wan Y., Fan X., Zhu T. Chem. Engin. J. 2011. V. 171. N 1. P. 314–319. DOI: 10.1016/j.cej.2011.04.011.
4. Trushkin A.N., Grushin M.E., Kochetov I.V., Trushkin N.I., Akishev Yu.S. Fizika Plazmy. 2013. V. 39. N 2. P. 193–209. (in Russian) DOI: 10.7868/S0367292113020029.
5. Manukyan A. S., Rybkin V.V. Ros. Khim. Zh. 2020. V. 64. N 2. P. 26-29. DOI: 10.6060/rcj.2020642.4.
6. Gumerov A. M. Mathematical modeling of chemical technological processes: ucheb. posobie dlya vuzov po napravleniyam «Him. Tekhnologiya» i «Energo- i resursosberegayushchie processy v him. tekhnologii, neftekhimii i biotekhnologii». SPb. [i dr.]: Lan'. 2014. 176 p (in Russian).
7. Ostrejkovskij V.A. Reliability theory. M.: Vysshaya shkola. 2003. 463 p (in Russian).
8. Efimov A.E., Bubnov A.G. Russ. J. Appl. Ecol. N 1. 2023. P. 38–44 (in Russian). DOI: 10.24852/2411-7374.2023.1.38.44.
9. Kondrat'ev V.N. Rate constants for gas-phase reactions. M.: Nauka, 1970. 351 p (in Russian).
10. Akishev Yu.S. ChemChemTech. [Izv. Vyssh. Ucheb. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2019. V. 62. N 8. P. 26–60 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20196208.5908.
11. Leshchik A.V., Ochered'ko A.N., Ryabov A.Yu., Petrenko T.V., Kudryashov S.V. ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2023. V. 66. N 11. P. 18–24. DOI: 10.6060/ivkkt.20236611.10t (in Russia).
12. Guschin A.A., Grinevich V.I., Kvitkova E.Yu., Gusev G.I., Shutov D.A., Ivanov A.N., Manukyan A.S., Rybkin V.V. ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2023. V. 66. N 7. P. 120–131. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607. 6835j.
13. Smirnov S.A., Titov V.A., Rybkin V.V. ChemChemTech. [Izv. Vyssh. Ucheb. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2012. V. 55. N 4. P. 12–20 (in Russian).
14. Bonnet V. V. Vestnik IrGSKHA. 2017. № 81–2. P. 100–105 (in Russian).
15. Malkin P. Elektroenerg. Pred. i raspred. 2016. V. 3. N 36. P. 76–79.
16. William H., Bartley P.E. Analysis of transformer failures. 36th Annual Conference of International Association of Engineering Insurers–Stockholm. 2003.
17. C57.100-1999, IEEE standard test procedure for thermal evaluation of liquid-immersed distribution and power transformers. Power. 1999.
18. Singh. J., Singh S. Engineer. Fail. Anal. 2019. V. 99. P. 180–191. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.02.014.
19. Kumar A., Singh S.K., Husain Z. Adv. Environ. Agric. Sci. 2015. P. 265–700.
20. Rizk F.A.M., Trinh G.N. High Voltage Engineering. CRC Press. 2014. 763 p.
21. Singh. J., Singh S. Int. J. Engin. Res. & Tech. 2016. V 4. P. 1–5.
22. Jagers J. N., Khosa J., De Klerk P. J., Gaunt C. T. Transformer reliability and condition assessment in a south african utility. International Symposium on High Voltage Engineering, Ljubljana. 2007. T6-442.
23. Rexhepi V. Energy Procedia. 2017. V. 141. P. 418–422. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.11.053.

26. Murugan R., Ramasamy R. Engin. Fail. Anal. 2019. V. 96. P. 274–288. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2018.10.011.
27. Малков А.Б., Винник Ю.С., Якимов С.В., Сергеева Е.Ю., Шестакова Л.А., Теплякова. Совр. Пробл. Науки и образ. 2015. № 2–1. С. 76.
28. Ефремов А.М., Бетелин В.Б., Kwon K.-H. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2023. Т. 66. Вып. 6. С. 37–45. DOI: 10.6060/ivkkt.20236606.6786.
29. Шикова Т.Г., Смирнов С.А., Артюхов А.И. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2020. Т. 63. Вып. 11. С. 27–34. DOI: 10.6060/ivkkt.20206311.6245.
30. Chiao C. H., Wang, W. Y. Microelectr. Rel. 2002. V. 42. N 1. P. 127–134. DOI: 10.1016/S0026-2714(01)00243-8.
31. Misono K. J. Light & Visual Envir. 1992. V. 16. N 2. P. 53–60. DOI: 10.2150/jlve.16.2_5.
32. Zhang J.Y., Boyd I. W. Appl. Surf. Sci. 2000. V. 168. N 1–4. P. 296–299. DOI: 10.1016/S0169-4332(00)00628-0.
33. Kykta M. AIP Advan. 2022. V. 12. N 10. 105116. DOI: 10.1063/5.0101992.
34. Radharamanan R., Juang J.N. Reliability analysis on incandescent lamps: a case study. International conference of industry, engineering and management systems. 2011. P. 155.
35. Lin H.T., Brady M.P., Richards R.K., Layton D.M. Wear. 2005. V. 259. N 7–12. P. 1063–1067. DOI: 10.1016/j.wear.2005.01.042.
36. Arun J., Kumar S.P., Venkatesh M., Giridharan A.S. Int. J. Engin. Res. Develop. 2013. V. 9. N 2. P. 13–21.
37. Ortiz A., Romero J. L., Cueva I., Jacobo V. H., Schouwenaars R. Case Stud. Engin. Fail. Anal. 2013. V. 2. N 1. P. 67–71.
38. Javan, S., Hosseini S. V., Alaviyoun S. Int. J. Auto. Eng. 2012. P. 21–29.
39. Quan S., Kvam P.H. Qual. and Rel. Eng. Int. 2011. V. 27. N 6. P. 781–793.
40. Venkatraman V., Pétremand Y., de Rooij N., Shea H. Reliability characteristics of microfabricated Rb mini-lamps for optical pumping in miniature atomic clocks and magnetometers. In reliability, packaging, testing, and characterization of MOEMS/MEMS and nanodevices XII. 2013. V. 8614. P. 27–33.
41. Vasil'ev A.I., Vasilyak L.M., Kostyuchenko S.V., Kudryavtsev N.N., Kuzmenko M.E., Pecherkin V.Y. Tech. Phys. Lett. 2006. N 32. P. 42–44. DOI: 10.1134/S1063785006010147.
42. Vasil'ev A.I., Vasilyak L.M., Kostyuchenko S.V., Kudryavtsev N.N., Kuzmenko M.E., Pecherkin V.Y. Surf. Engin. Appl. Electrochem. 2007. N 43. P. 49–52. DOI: 10.3103/S1068375507010085.
43. Wang L., Yu Y., Dong J., Zhang Y., Liu S., Li C. Mathematical Problems in Engineering. V. 2022. 6 P. DOI: 10.1155/2022/1324593.
44. Turner R., Baird K. M., Taylor M. J., Van Der Hoeven C. J. Rev. Sci. Instrum. 1964. V. 35. N 8. P. 996–1001. DOI: 10.1063/1.1718973.
45. Бубнов А.Г., Гриневич В.И., Александрова С.Н., Костров В.В. Химия высоких энергий. 1997. Т. 31. № 4. С. 264–267.
46. Гуцин А.А., Гриневич В.И., Козлов А.А., Извекова Т.В., Квиткова Е.Ю., Рыбкин В.В. Химия высоких энергий. 2020. Т. 54. № 1. С. 73–77.
47. Кайряк С.В., Гриневич В.И., Костров В.В. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2000. Т. 43. № 6. С. 68–72.
48. Kudryashov S. V., Ochered'ko A., Ryabov A. Yu., Shchyogoleva G. S. Plasma Chem. and Plasma Proc. 2011. V. 31. P. 649–661. DOI: 10.1007/s11090-011-9318-z.
49. Kudryashov S.V., Ryabov A.Yu., Shchyogoleva G.S. J. Phys. D. Appl. Phys. 2016. V. 49. Art. 025205. DOI: 10.1088/0022-3727/49/2/025205.
24. Vahidi F., Tenbohlen S. Statistical failure analysis of European substation transformers. ETG-Fachbericht-Diagnostik elektrischer Betriebsmittel. 2014. 5 p.
25. Murugan R., Ramasamy R. Engin. Fail. Anal. 2015. V. 55. P. 182–192. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.06.002.
26. Murugan R., Ramasamy R. Engin. Fail. Anal. 2019. V. 96. P. 274–288. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2018.10.011.
27. Malkov A.B., Vinnik YU.S., Yakimov S.V., Sergeeva E.YU., Shestakova L.A., Teplyakova O.V. Sovr. Probl. nauki i obraz. 2015. № 2–1. P. 76 (in Russian).
28. Efremov A.M., Betelin V.B., Kwon K.-H. ChemChemTech. [Izv. Vyssh. Ucheb. Zaved. Khim. Khim. Teknol.]. 2023. V. 66. N 6. P. 37–45. DOI: 10.6060/ivkkt.20236606.6786.
29. Shikova T.G., Smirnov S.A., Artyuhov A.I. ChemChemTech. [Izv. Vyssh. Ucheb. Zaved. Khim. Khim. Teknol.]. 2020. V. 63. N 11. P. 27–34. DOI: 10.6060/ivkkt.20206311.6245.
30. Chiao C. H., Wang, W. Y. Microelectr. Rel. 2002. V. 42. N 1. P. 127–134. DOI: 10.1016/S0026-2714(01)00243-8.
31. Misono K. J. Light & Visual Envir. 1992. V. 16. N 2. P. 53–60. DOI: 10.2150/jlve.16.2_5.
32. Zhang J.Y., Boyd I. W. Appl. Surf. Sci. 2000. V. 168. N 1–4. P. 296–299. DOI: 10.1016/S0169-4332(00)00628-0.
33. Kykta M. AIP Advan. 2022. V. 12. N 10. 105116. DOI: 10.1063/5.0101992.
34. Radharamanan R., Juang J.N. Reliability analysis on incandescent lamps: a case study. International conference of industry, engineering and management systems. 2011. P. 155.
35. Lin H.T., Brady M.P., Richards R.K., Layton D.M. Wear. 2005. V. 259. N 7–12. P. 1063–1067. DOI: 10.1016/j.wear.2005.01.042.
36. Arun J., Kumar S.P., Venkatesh M., Giridharan A.S. Int. J. Engin. Res. Develop. 2013. V. 9. N 2. P. 13–21.
37. Ortiz A., Romero J. L., Cueva I., Jacobo V. H., Schouwenaars R. Case Stud. Engin. Fail. Anal. 2013. V. 2. N 1. P. 67–71.
38. Javan, S., Hosseini S. V., Alaviyoun S. Int. J. Auto. Eng. 2012. P. 21–29.
39. Quan S., Kvam P.H. Qual. and Rel. Eng. Int. 2011. V. 27. N 6. P. 781–793.
40. Venkatraman V., Pétremand Y., de Rooij N., Shea H. Reliability characteristics of microfabricated Rb mini-lamps for optical pumping in miniature atomic clocks and magnetometers. In reliability, packaging, testing, and characterization of MOEMS/MEMS and nanodevices XII. 2013. V. 8614. P. 27–33.
41. Vasil'ev A.I., Vasilyak L.M., Kostyuchenko S.V., Kudryavtsev N.N., Kuzmenko M.E., Pecherkin V.Y. Tech. Phys. Lett. 2006. N 32. P. 42–44. DOI: 10.1134/S1063785006010147.
42. Vasil'ev A.I., Vasilyak L.M., Kostyuchenko S.V., Kudryavtsev N.N., Kuzmenko M.E., Pecherkin V.Y. Surf. Engin. Appl. Electrochem. 2007. N 43. P. 49–52. DOI: 10.3103/S1068375507010085.
43. Wang L., Yu Y., Dong J., Zhang Y., Liu S., Li C. Mathematical Problems in Engineering. V. 2022. 6 P. DOI: 10.1155/2022/1324593.
44. Turner R., Baird K. M., Taylor M. J., Van Der Hoeven C. J. Rev. Sci. Instrum. 1964. V. 35. N 8. P. 996–1001. DOI: 10.1063/1.1718973.
45. Bubnov A.G., Grinevich V.I., Aleksandorva S.N., Kostrov V.V. Him. Vys. Energ. 1997. V. 31. № 4. P. 264–267 (in Russian).
46. Gushchin A.A., Grinevich V.I., Kozlov A.A., Izvekova T.V., Kvitkova E. Yu., Rybkin V.V. Himiya vysokih energij. 2020. V. 54. N 1. P. 73–77 (in Russian).
47. Kayryak S.V., Grinevich V.I., Kostrov V.V. ChemChemTech. [Izv. Vyssh. Ucheb. Zaved. Khim. Khim. Teknol.]. 2000. V. 43. N 6. P. 68–72 (in Russian).

50. Holzer F. Chem. Engin. J. 2018. V. 334. P. 1988–1995.
51. Zhang H. Chem. Engin. J. 2014. V. 256. P. 107–118.
52. Бубнов А.Г., Гриневич В.И., Костров В.В. Хим. Выс. Энерг. 1991. Т. 25. N 4. С. 365–369.
53. Ефимов А.Е., Бубнов А.Г. Росс. журн. прикл. экол. 2022. № 3. С 43–49. DOI: 10.24852/2411-7374.2022.3.44.50.
54. Massines F., N. Gherardi N., Fornelli A., Martin S. Surf. Coat. Tech. 2005. V. 200. N 5–6. P. 1855–1861. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.08.010.
55. Sonnenfeld, A., Tun, T.M., Zajíčková, L. Kozlov K.V., Wagner H.E., Behnke J.F., Hippler R. Plasmas and Polymers. 2001. V. 6. P. 237–266. DOI: 10.1023/A:1014414016164.
56. De Geyter N., Morent R., S. Van Vlierberghe S., Dubruel P., Leys C., Gengembre L., Schacht E., Payen E. Progr. Org. Coat. 2009. V. 64. N 2–3. P. 230–237. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2008.07.029.
57. Morent R., De Geyter N., Van Vlierberghe S., Beaurain A., Dubruel P., Payen E. Progr. Org. Coat. 2011. V. 70. N 4. P. 336–341. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2010.09.031.
58. Van Deynse A., Leys C., Morent R., De Geyter N. Plasma Chem. Plasma Process. 2019. V. 39. P. 1317–1342. DOI: 10.1007/s11090-019-10007-8.
59. Bitar R., Cools P., De Geyter N., Morent R. Appl. Surf. Sci. 2018. V. 448. P. 168–185.
60. Heyse P., Dams R., Paulussen S., Houthoofd K., Janssen K., Jacobs P.A., Sels B.F. Plasma Process Polym. 2007. V 4. N 2. P. 145–157.
48. Kudryashov S. V., Ochered'ko A., Ryabov A. Yu., Shchyogoleva G. S. Plasma Chem. and Plasma Proc. 2011. V. 31. P. 649–661. DOI: 10.1007/s11090-011-9318-z.
49. Kudryashov S.V., Ryabov A.Yu., Shchyogoleva G.S. J. Phys. D. Appl. Phys. 2016. V. 49. Art. 025205. DOI: 10.1088/0022-3727/49/2/025205.
50. Holzer F. Chem. Engin. J. 2018. V. 334. P. 1988–1995.
51. Zhang H. Chem. Engin. J. 2014. V. 256. P. 107–118.
52. Bubnov A. G. Grinevich V.I., Kostrov V.V. Him. Vys. Energ. 1991. V. 25. N 4. P. 365–369 (in Russian).
53. Efimov A.E. Bubnov A.G. Russ. J. Appl. Ecol. 2022. N 3. P. 43–49 (in Russian). DOI: 10.24852/2411-7374.2022.3.44.50.
54. Massines F., N. Gherardi N., Fornelli A., Martin S. Surf. Coat. Tech. 2005. V. 200. N 5–6. P. 1855–1861. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2005.08.010.
55. Sonnenfeld, A., Tun, T.M., Zajíčková, L. Kozlov K.V., Wagner H.E., Behnke J.F., Hippler R. Plasmas and Polymers. 2001. V. 6. P. 237–266. DOI: 10.1023/A:1014414016164.
56. De Geyter N., Morent R., S. Van Vlierberghe S., Dubruel P., Leys C., Gengembre L., Schacht E., Payen E. Progr. Org. Coat. 2009. V. 64. N 2–3. P. 230–237. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2008.07.029.
57. Morent R., De Geyter N., Van Vlierberghe S., Beaurain A., Dubruel P., Payen E. Progr. Org. Coat. 2011. V. 70. N 4. P. 336–341. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2010.09.031.
58. Van Deynse A., Leys C., Morent R., De Geyter N. Plasma Chem. Plasma Process. 2019. V. 39. P. 1317–1342. DOI: 10.1007/s11090-019-10007-8.
59. Bitar R., Cools P., De Geyter N., Morent R. Appl. Surf. Sci. 2018. V. 448. P. 168–185.
60. Heyse P., Dams R., Paulussen S., Houthoofd K., Janssen K., Jacobs P.A., Sels B.F. Plasma Process Polym. 2007. V 4. N 2. P. 145–157.

Поступила в редакцию (Received) 12.02.2024

Принята к опубликованию (Accepted) 18.04.2024