

ОЧИСТКА ВОЗДУХА ОТ ФОРМАЛЬДЕГИДА АКТИВНЫМИ ЧАСТИЦАМИ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА

Оценены концентрации основных активных частиц плазмы диэлектрического барьерного разряда, позволяющих разложить молекулы формальдегида в среде воздуха. Исследована зависимость их концентрации от некоторых параметров плазмы. Показано, что степень превращения формальдегида достигает 99% при повышении значения вкладываемой в разряд мощности и, соответственно, увеличении концентрации атомарного кислорода в основном состоянии. Найдено, что главными стабильными продуктами деструкции формальдегида являются CO_2 , CO и H_2O .

Ключевые слова: активные частицы плазмы, формальдегид, очистка, степень превращения, диэлектрический барьерный разряд, летучие органические соединения.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.1.38.44>

Введение

Формальдегид является одним из основных критериальных поллютантов атмосферного воздуха в Российской Федерации и входит в перечень летучих органических соединений (ЛОС). Кроме того, проблема загрязнения атмосферного воздуха городов России формальдегидом обостряется ежегодно (О состоянии ..., 2021).

Одним из перспективных способов разложения и «нейтрализации» ЛОС является применение неравновесной низкотемпературной плазмы (Гущин и др., 2020). Особенно это характерно для реакторов-разрядников с рабочей поверхностью электродов из так называемых вентильных металлов, например, TiO_2 , позволяющей более интенсивно воздействовать на молекулы поллютанта за счёт активных частиц, образованных путём столкновения с высокоэнергетичными электронами и, вероятно, фотокаталитического эффекта. Благодаря этому становится возможным протекание реакций, которые затруднительно осуществить с использованием термических методов или низкоэффективно термokatалитическими методами (Fridman, 2008).

Недостаток информации о концентрациях активных частиц разряда, ответственных за очистку/разложение/«нейтрализацию», в зависимости от параметров низкотемпературной плазмы, препятствует её промышленной имплементации. Выявление закономерностей в работе разряда с точки зрения генерации упомянутых выше частиц позволит оптимизировать энергетические вклады в собственно работу разрядных устройств, повысить надёжность очистки и, соответственно, со-

кратить ущерб окружающей среде и финансовые затраты на природоохранную деятельность (увеличить эколого-экономическую эффективность).

Целью работы являлось выявление и оценка концентраций основных активных частиц, определяющих очистку воздуха от формальдегида, и влияния параметров плазмы на их концентрацию в диэлектрическом барьерном разряде (ДБР).

Материалы и методы исследования

Очистка воздуха от формальдегида осуществлялась на установке, схема и параметры которой описаны ранее (Ефимов и др., 2022). Контроль значений напряжения осуществлялся высоковольтным вольтметром марки В7-47 (2 класс точности). Разряд в ячейке с коаксиальным расположением электродов возбуждался в тот момент, когда концентрация органических соединений на выходе из реактора становилась постоянной, это происходило при наших расходах для всех исследуемых веществ не более, чем через 45 мин. Сила тока во вторичной цепи контролировалась осциллографически (С1-55, 1 класс точности) по падению напряжения на постоянном сопротивлении 10 кОм. Расчёт вкладываемой мощности (W , Вт/см³) и времени контакта аэрозольной смеси (τ_k , с) проводился по формулам (1) и (2):

$$W = \frac{U \times I}{V_p} \quad (1)$$

где: U – приложенное напряжение, В; I – сила тока разряда, А;

$$\tau_k = \frac{L_{p.z.} \times S_{сеч.}}{g} \quad (2)$$

где: $L_{p.z.}$ – длина разрядной зоны, $L_{p.z.} = 17$ см; $S_{сеч.}$ – площадь сечения воздушного зазора между электродами, $S_{сеч.} = 1.45$ см²; g – объёмный расход воздуха, см³/с.

Концентрация электронов в плазме воздуха и кислорода (n_e , см⁻³) оценивалась по выражению (3):

$$n_e = \frac{j}{e \times v_{др.}} \quad (3)$$

где: j – плотность тока (Кл/с м²), e – заряд электрона ($1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл), $v_{др.}$ – дрейфовая скорость электронов в газе (Хаксли и др., 1977), (м²/В·с).

При оценке плотности тока (j) из величины силы тока в качестве площади бралась полная площадь изолированного электрода (68.66 см²) реактора-ячейки с ДБР.

Концентрация озона (N_{O_3} , см⁻³), образующегося в результате возбуждения разряда при очистке газов от формальдегида, определялась методом абсорбционной спектроскопии по поглощению света при $\lambda = 253.7$ нм, приходящуюся на максимум сечения фотопоглощения O_3 ($\sigma = 7.8 \cdot 10^{-18}$ см²) (Sabadił, 1980). Концентрацию озона оценивали по выражению (4):

$$N_{O_3} = \frac{\lg(I_0 / I)}{\sigma \times l} \quad (4)$$

где I_0 – начальная интенсивность света резонансной линии ртутной лампы без возбуждения разряда, отн. ед.; I – тоже самое, но при возбуждении разряда, отн. ед.; σ – сечение фотопоглощения, см²; l – длина кюветы со стёклами из кварца (5.9 см) в случае измерения концентрации O_3 на выходе из реактора, длина разрядника (26.7 см).

Регистрация изменения концентрации формальдегида под действием плазмы барьерного разряда на смесь газов осуществлялась фотометрическим методом на фотоэлектрическом колориметре КФК-2МП по реакции с хромотроповой кислотой ($\lambda = 674$ нм) (Сборник ..., 1985). Отбор проб на анализ проводился пропусканием отходящей от разрядника смеси через два поглотительных сосуда содержащих по 2 мл дистиллированной воды в течение 15 мин после предварительной продувки системы (45 мин), как при возбуждении ДБР, так и без него. Средняя начальная концентрация формальдегида в воздухе в данной серии опытов составляла 100 мг/м³ или $2 \cdot 10^{15}$ см⁻³. Относительная погрешность определения концентрации поллютанта составляла $\pm 15\%$.

Масс-спектрометрические исследования раз-

ложения формальдегида в плазме барьерного разряда и анализ состава газообразных продуктов проводили с помощью омегатронного масс-спектрометра ионно-резонансного типа (датчик РМО-4С, работающий в комплексе с измерительным блоком ИПДО-2А). Диапазон регистрируемых масс составлял от 2 до 250, погрешность определения парциальных давлений не превышала 10%.

Состав газовых продуктов деструкции формальдегида после обработки загрязнённого воздуха в ДБР определялся после предварительной продувки системы газопроводов реакторов в течение 2 ч 45 мин (как в опытах с возбуждением разряда, так и без него). Затем производилось вымораживание газо-воздушной смеси, отходящей из реактора в поглотительном сосуде, помещаемом в сосуд Дьюара с жидким азотом на 5 с. Порция паров вымороженных веществ набиралась в систему масс-спектрометра до давления 100 Па, после этого проводилась запись масс-спектра.

Результаты и их обсуждение

Известно, что наиболее вероятными активными частицами плазмы, способных инициировать разложение органических соединений, являются электроны, атомы и электронно-возбуждённые атомы и молекулы (Лебедев, 1999). Однако, окислительная деструкция органических загрязнителей, в т.ч. и формальдегида (CH_2O), в воздушной плазме происходит под действием, преимущественно, озона (O_3) и атомарного кислорода в основном и возбуждённом состояниях (O^3P , O^1D) (Суровов и др., 2012). При этом, концентрация метастабильного O^1D в условиях плазмы обычно много меньше, чем в основном (Рыбкин, 2000). Кроме того, взаимодействие атомов кислорода с насыщенными углеводородами происходит примерно в 100 раз эффективнее по сравнению с O_3 (Пшежецкий и др., 1978; Moss, 1987; Cook, 1987; Плазменная ..., 1987). Поэтому найденные значения концентрации O^3P в первом приближении можно применять для объяснения наблюдаемых эффектов в процессах взаимодействия ДБР с CH_2O .

Для оценки стационарной концентрации O^3P необходимо было выявить активные частицы, отвечающие за образование и гибель радикалов, и их зависимость от некоторых параметров плазмы реактора с ДБР (от удельной мощности (W), времени контакта газа с плазмой (τ_k)).

Отметим, что в качестве плазмообразующей среды, кроме воздуха, для получения более полного представления о механизмах изучаемых процессов, был использован чистый кислород. Кроме того, опыты с применением чистого кис-

лорода были необходимы для выявления и сопоставления энергетических затрат на создание активных частиц плазмы в ДБР.

Известно (Кайряк и др., 2000), что триплетный кислород в разряде образуется, главным образом, в процессе соударения со свободными электронами по реакции. Другими реакциями образования O^3P (например, реакция диссоциативного прилипания) в нашем случае можно пренебречь (Рыбкин, 2000). Зависимости электронной плотности от мощности, вкладываемой в разряд при различных плазмообразующих средах, приведены на рисунках 1 и 2.

Из этих данных по очистке воздуха от CH_2O следует, что в исследуемых условиях, при диапазоне величины удельной мощности 35–300 мВт/см³, концентрация электронов в пределах погрешности не менялась ($\sim 1,25 \cdot 10^6$ см⁻³). Электронная плотность в атмосфере кислорода изменялась от $1,00 \cdot 10^6$ до $1,50 \cdot 10^6$ см⁻³ в аналогичном диапазоне мощностей.

Особенностью плазмы ДБР является то, что разряд состоит из множества отдельных микро-разрядов. Согласно данным (Самойлович В.Г. и др., 1989), истинная площадь, на которую «стекают» заряженные частицы из отдельных искровых каналов, составляет около 10% площади поверхности электрода. Поэтому в действительности реальная плотность тока, а, следовательно, и концентрация электронов могут быть на порядок величины выше приведённой на рисунке 1, то есть примерно $1,3 \cdot 10^7$ см⁻³. Очевидно, что с учётом даже этой поправки, концентрация электронов, а, следовательно, и ионов (с учётом квазинейтральности плазмы) в плазме ДБР чрезвычайно мала (степень ионизации не превышает 10^{-12}).

Убыль атомов O^3P происходит как в гетерогенных, так и в гомогенных процессах. Роль гетерогенных процессов рекомбинации атомов O^3P в рассматриваемых условиях пренебрежимо мала (0.1%) по сравнению с гомогенными процессами, и определяется, существенно, вероятностью столкновения с поверхностью (Гриневич и др., 1981). За исчезновение частиц в объёме реактора в значительной степени (99.6%) ответственны молекулы O_2 , в меньшей (0.3%) – молекулы O_3 , концентрация которых максимально велика, по сравнению с другими активными частицами (Самойлович и др., 1989; Лунин и др., 1999). В связи с этим, и исследовалось влияние параметров ДБР на концентрацию O_3 .

Результаты экспериментов позволили выявить, что для плазмы, возбуждаемой в среде кислорода и воздуха, в исследуемом диапазоне расходов, концентрация O_3 в зоне разряда не зависит от τ_k

(величина менялась от 5 до 60 с) и от W (величина менялась 0.05 до 0.45 Вт/см³) и составляет $1.8 \cdot 10^{16}$ см⁻³ (в среднем).

На основании изложенного выше оценивалась концентрация атомов O^3P из уравнения (5) (Рыбкин, 2000):

$$\frac{d[O]}{dt} = \Gamma_{обр} - \Gamma_{гиб} \quad (5)$$

где $\Gamma_{обр} = \Gamma_{дис}$; $\Gamma_{гиб}$ – суммарная скорость гибели атомов (скорость образования O_3 в 3-х частичном процессе). Для стационарных условий (6):

$$\frac{d[O]}{dt} = \Gamma_{обр} - \Gamma_{гиб} = 0 \quad (6)$$

то есть $\Gamma_{дис} = \Gamma_{гиб}$ или (7):

$$\Gamma_{дис} = [O] \times [O_2]^2 \times k_1 \quad (7)$$

исходя из (7), концентрация O^3P равна (8), см⁻³:

$$[O] = \frac{\Gamma_{дис}}{([O_2]^2 \times k_1)} = \frac{3,5 \times 10^{17}}{((2,0 \times 10^{19})^2 \times 1,3 \times 10^{-33})} = 6,8 \times 10^4 \quad (8)$$

Отметим, что из этих оценок следует однозначный вывод о том, что в плазме ДБР, возбуждаемой в среде O_2 , степень его диссоциации незначительна, и, по-видимому, не превышает 10^{-50} % (в кислородной плазме тлеющего разряда пониженного давления степень диссоциации достигает 10 и более процентов (Гриневич и др., 1982)).

Далее нами исследовалась трансформация собственно формальдегида. Предполагалось, что и как в случае активных частиц, превращения формальдегида будут определяться параметрами плазмы, плазмообразующей средой, а также начальной концентрацией поллютанта.

Согласно полученным данным, степень очистки/превращения (α) от формальдегида в ДБР не зависела от начальной концентрации ($C_n^{Форм.}$) формальдегида (в диапазоне от 30 до 250 мг/м³) при постоянных W и τ_k . Наблюдалась обратная зависимость α от времени контакта (рис. 3), в сравнении с муравьиной кислотой (Ефимов и др., 2022). Максимальные α соответствовали минимальному времени контакта газа с плазмой и были выше 99%. Падение α с ростом времени контакта очищаемого газа с ДБР, вероятно, связано с обратными процессами синтеза формальдегида из образующихся продуктов распада.

В серии наших экспериментов присутствовала отчетливая тенденция увеличения α с ростом удельной мощности (рис. 5), что очевидно связано с увеличением концентрации активных частиц

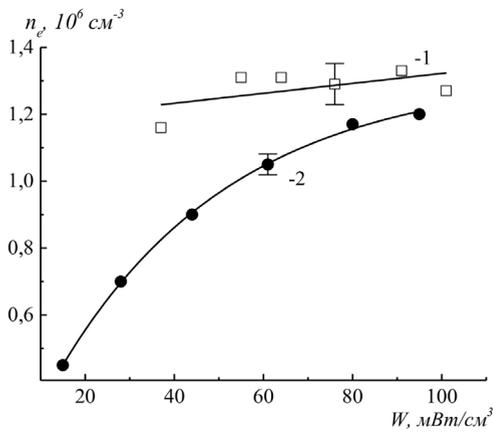


Рис. 1. Зависимость концентрации электронов от удельной мощности разряда.
1 – воздух, 2 – воздух + формальдегид
Fig. 1. The dependence of the electron concentration on the specific discharge power.
1 – air, 2 – air + formaldehyde

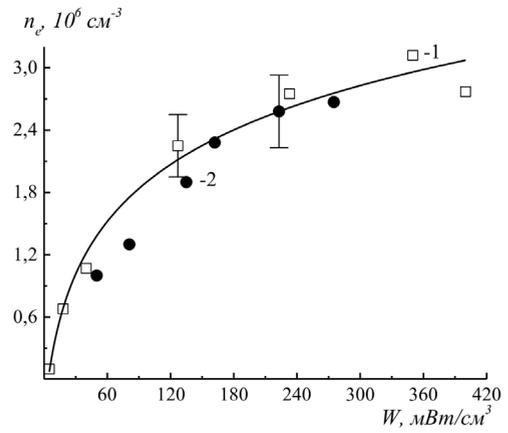


Рис. 2. Зависимость концентрации электронов от удельной мощности разряда.
1 – кислород, 2 – кислород + формальдегид
Fig. 2. The dependence of the electron concentration on the specific discharge power.
1 – oxygen, 2 – oxygen + formaldehyde

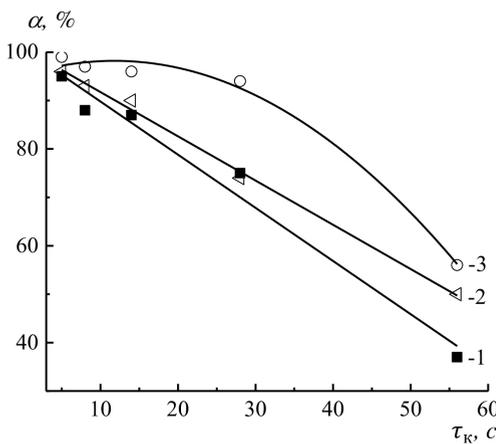


Рис. 3. Степень превращения формальдегида в ДБР, при использовании в качестве газа-носителя воздуха (при различных $W, \text{ мВт/см}^3$):
1 – 74, 2 – 174, 3 – 265
Fig. 3. The degree of conversion of formaldehyde to DBD, when used as an air carrier gas (at various $W, \text{ mW/cm}^3$):
1 – 74, 2 – 174, 3 – 265

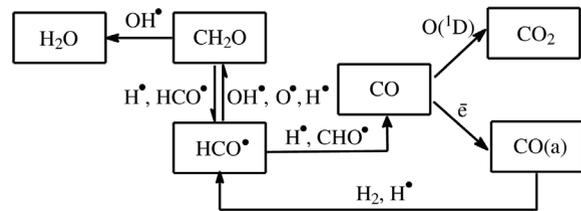


Рис. 4. Возможная схема трансформации CH_2O в плазме ДБР
Fig. 4. Possible scheme of CH_2O transformation in DBD plasma

в плазме, инициирующих разложение формальдегида.

Образование формальдегида может, предположительно, происходить по схеме (рис. 4), которая отличается от предложенной Д. Сторхом и М. Кюхнером (Storch et al., 1993), поскольку в ней отсутствует в качестве промежуточного продукта муравьиная кислота, которая может образовываться в ДБР из CH_2O (Storch et al., 1993), путём взаимодействия последнего с OH^\bullet .

Зависимости степени превращения CH_2O в плазме кислорода оказались аналогичным, при-

ведённым на рисунке 5. Поскольку плазменной конденсации/полимеризации (образования многоатомных молекул (олигомеров) в виде капель жидкости, твёрдых плёнок или порошков) при воздействии плазмы ДБР на формальдегид в исследуемых плазмообразующих средах (воздух, кислород) не регистрировалось, зная концентрацию CH_2O на выходе из зоны ДБР, можно предположить, что формальдегид в плазме преимущественно разлагается (с образованием каких-либо фрагментов) как через стадию окисления до муравьиной кислоты, так и без (время «жизни»

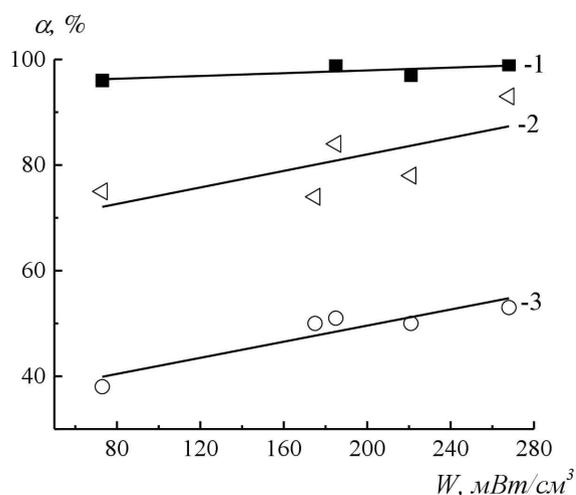


Рис. 5. Степень превращения формальдегида в плазме барьерного разряда при использовании в качестве газа-носителя воздуха (при различных τ_k , с):

1 – 4.9, 2 – 28.4, 3 – 57.3

Fig. 5. The degree of transformation of formaldehyde in a barrier discharge plasma, when used as a carrier gas of air (at various τ_k , s):

1 – 4.9, 2 – 28.4, 3 – 57.3

НСООН пренебрежимо мало). Причём данные масс-спектрального анализа показали, что основными, стабильными и менее токсичными, чем CH_2O , продуктами трансформации формальдегида в плазме ДБР являются CO_2 , CO , H_2O и, вероятно, CH_4 и H_2 .

Таким образом, для скорейшего применения исследуемого способа очистки воздуха необходимы дальнейшие исследования работы реактора с ДБР в присутствии электродов из других материалов (например, других «вентильных» металлов – для определения синергетического эффекта и его изменения), оценка влияния паров воды, и, соответственно, гидроксильных радикалов на деструкцию формальдегида. Кроме этого, в дальнейшем возможна оценка характерных времён «жизни» O^3P по отношению к O_3 , CH_2O и НСООН , а также для подбор условий для выявления максимальных и наиболее экологически эффективных степеней очистки воздуха от формальдегида в присутствии указанных металлов. В этих исследованиях в качестве дополнительного параметра следует рассмотреть частоту напряжения, поскольку её увеличение, предположительно, может позволить изменить/отклонить функцию распределения электронов по скоростям и увеличить долю высокоэнергетичных электронов (Gou et al., 2019).

Заключение

Представленные результаты показывают, что основными активными частицами, ответственными за окислительную деструкцию формальдегида, являются атомы кислорода в основном состоянии (O^3P), электроны и молекулы O_3 (оценённые концентрации частиц порядка 10^{11} см^{-3} , 10^6 см^{-3} и 10^{16} см^{-3} , соответственно). Параметры плазмы практически не изменяют концентрации выше перечисленных активных частиц, как в атмосфере воздуха, так и кислорода. Степень превращения формальдегида зависит от времени контакта и мощности, вкладываемой в разряд.

Список литературы

1. Гриневиц В.И., Максимов А.И. Травление полимеров в низкотемпературной плазме // Применение низкотемпературной плазмы в химии / Под ред. Л.С. Полака. М.: Наука, 1981. С. 135–169.
2. Гриневиц В.И., Максимов А.И., Рыбкин В.В. Концентрации электронов, $\text{O}_2(b^1\Sigma_g^+)$ и O^3P в кислородном разряде пониженного давления // Журнал физической химии. 1982. Т. 61, № 5. С. 1279–1280.
3. Гушин А.А., Гриневиц В.И., Козлов А.А., Извекова Т.В., Квиткова Е.Ю., Рыбкин В.В. Кинетические закономерности деструкции 1,4-дихлорбензола в диэлектрическом барьерном разряде атмосферного давления в кислороде // Химия высоких энергий. 2020. Т. 54, № 1. С. 73–77. doi 10.31857/S0023119320010064.
4. Ефимов А.Е., Бубнов А.Г. Надёжность очистки воздуха от паров муравьиной кислоты в реакторе с диэлектрическим барьерным разрядом // Российский журнал прикладной экологии. 2022. № 3. С. 43–49. doi: 10.24852/2411-7374.2022.3.44.50.
5. Кайряк С.В., Гриневиц В.И., Костров В.В. Окисление бензола в плазме барьерного разряда // Известия высших учебных заведений. Сер.: Химия и химическая технология. 2000. Т. 43, № 6. С. 68–72.
6. Лебедев Ю.А. Введение в плазмохимию // Тезисы докл. электронной Школы плазмохимии для молодых учёных России и стран СНГ. Иваново [Электронный ресурс] URL: \https://www.isuct.ru/conf/plasma/LECTIONS/Lebedev_lection.html.
7. Лунин В.В., Попович С.Н., Ткаченко С.Н. Физическая химия озона. М.: Изд-во МГУ, 1998. 480 с.
8. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ им. М.В. Ломоносова. 2021. 864 с.
9. Плазменная технология в производстве СБИС / Под ред. Н. Айнспрука, Д. Брауна. М.: Мир, 1987. 470 с.
10. Пшежецкий С.Я., Дмитриев М.Т. Радиационные физико-химические процессы в воздушной среде. М.: Атомиздат, 1978. 184 с.
11. Рыбкин В.В. Физическая химия процессов в системе неравновесная плазма кислорода – полимер. Дисс. ... докт. хим. наук. Иваново, 2000. 286 с.
12. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. М.: Изд-во МГУ, 1989. 176 с.
13. Сборник временных отраслевых методик для определения загрязнения веществ в атмосферном воздухе в районах размещения предприятий нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Ч. I и II. М.: Госкомитет СССР по гидрометеорологии и здравоохранению, 1985. 351 с.

14. Суоров А.М., Бубнов А.Г. Экоаналитический контроль процесса очистки воздуха от формальдегида в диэлектрическом барьерном разряде // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2012. Т. 2, № 2. С. 87–94.

15. Хаксли Л., Кромптон Р. Диффузия и дрейф электронов в газах. М.: Мир. 1977. 672 с.

16. Cook J.M. Downstream plasma etching and stripping // Solid state technology. 1987. Vol. 30, №4. P. 147–151.

17. Gou Y., Zhang H., E J.L. Влияние изменения частоты на диэлектрический барьерный разряд в смеси гелия с кислородом при переходе от множественных к одиночному пробою на полупериоде // Физика плазмы. 2019. Т. 45, № 11. С. 1041–1047. doi: 10.1134/S0367292119100056.

18. Moss S.J. Polymer degradation in reactive gas plasmas // Polymer degradation and stability 1987. Vol. 17, iss. 3. P. 205–222.

19. Fridman A. Plasma Chemistry. Cambridge University Press, 2008. 978 p. doi: 10.1017/CBO9780511546075.

20. Sabadil H., Bachmann P., Kastelewicz H. Reaktionskinetik der Ozonbildung in der Sauerstoffglimmentladung // Beitr. Plasmaphys. 1980. Bd. 20. № 4. P. 283–295.

21. Storch D.M., Kushner M.J. Destruction mechanisms for formaldehyde in atmospheric pressure low temperature plasmas // Journal of applied physics. 1993. Vol. 73, № 1. P. 51–55. doi: 10.1063/1.353828.

References

1. Grinevich V.I., Maksimov A.I. Travenie polimerov v nizkoterperaturnoj plazme [Etching of polymers in low-temperature plasma] // Primenenie nizkoterperaturnoj plazmy v himii [Application of low-temperature plasma in chemistry] / ed. L.S. Polak. Moscow: Nauka, 1981. P. 135–169.

2. Grinevich V.I., Maksimov A.I., Rybkin V.V. Koncentracii elektronov, $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ i $O(^3P)$ v kislorodnom razryade ponizhennogo davleniya [Concentrations of electrons, $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ and $O(^3P)$ in a low-pressure oxygen discharge] // Zhurnal fizicheskoy himii [Journal of physical chemistry]. 1982. Vol. 61, No 5. P. 1279–1280.

3. Gushchin A.A., Grinevich V.I., Kozlov A.A., Izvekova T.V., Kvitkova E.U., Rybkin V.V. Kinetic regularities of the destruction of 1,4-dichlorobenzene in an atmospheric pressure dielectric barrier discharge in oxygen // High energy chemistry. 2020. Vol. 54, No 1. P. 73–77. doi: 10.31857/S0023119320010064.

4. Efimov A.E., Bubnov A.G. Nadyozhnost ochistki vozduha ot parov murav'inoj kisloty v reaktore s dielektricheskim barernym razryadom [Reliability of air treatment from formic acid vapor in a reactor with a dielectric barrier discharge] // Rossijskij zhurnal prikladnoj ekologii [Russian Journal of Applied Ecology]. 2022. No 3. P. 43–49. doi: 10.24852/2411-7374.2022.3.44.50.

5. Kajryak S.V., Grinevich V.I., Kostrov V.V. Okislenie benzola v plazme bar'ernogo razryada [Oxidation of benzene in barrier discharge plasma] // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Ser.: Himiya i himicheskaya tekhnologiya [News of higher educational institutions. Series: Chemistry and chemical technology]. 2000. Vol. 43, No 6. P. 68–72.

6. Lebedev Yu.A. Vvedenie v plazmohimiyu [Introduction to plasma chemistry] // Tezisy dokl. elektronnoj Shkoly plazmohimii dlya molodyh uchyonyh Rossii i stran SNG [Abstracts of the electronic School of plasma chemistry for young scientists in Russia and the CIS]. [Electronic resource]. https://www.isuct.ru/conf/plasma/LECTIONS/Lebedev_lecture.html.

7. Lunin V.V., Popovich S.N., Tkachenko S.N. Fizicheskay ahimiya ozona [Physical chemistry of ozone]. Moscow: Moscow State University, 1998. 480 p.

8. O sostoyanii i ob ohrane okruzhayushchej sredy Rossijskoj

Federacii v 2020 godu [On the state and environmental protection of the Russian Federation in 2020]. Gosudarstvennyj doklad. Moscow, 2021. 864 p.

9. Plazmennaya tekhnologiya v proizvodstve SBIS [Plasma processing for VLSI] / ed. N. Ajnspruk, D. Braun. Moscow: Mir, 1987. 470 p.

10. Pshhezheckij S.Ya., Dmitriev M.T. Radiacionnye fiziko-himicheskie processy v vozduшной srede [Radiation physical and chemical processes in the air]. Moscow: Atomizdat, 1978, 184 p.

11. Rybkin V.V. Fizicheskaya himiya processov v sisteme neravnovesnaya plazma kisloroda-polimer [Physical chemistry of processes in the nonequilibrium oxygen-polymer plasma system]: DSc (Dr. of Chem) thesis. Ivanovo, 2000. 286 p.

12. Samojlovich V.G., Gibalov V.I., Kozlov K.V. Fizicheskaya himiya bar'ernogo razryada [Physical chemistry of barrier discharge]. Moscow: Moscow State University, 1989. 176 p.

13. Sbornik vremennyh otraslevykh metodik dlya opredeleniya zagryazneniya veshchestv v atmosfernom vozduhu v rajonah razmeshcheniya predpriyatij neftepererabatyvayushchej i neftekhimicheskoy promyshlennosti [Collection of temporary industry techniques for determining the pollution of substances in the atmospheric air in the areas of the oil refining and petrochemical industry]. Part I, II. Moscow, 1985. 351 p.

14. Suorovov A.M., Bubnov A.G. Ekoanaliticheskij kontrol processa ochistki vozduha ot formal'degida v dielektricheskom bar'ernom razryade [Ecoanalytical control of the air purification process from formaldehyde in a dielectric barrier discharge] // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie [Modern high technologies. Regional Application]. 2012. Vol. 2, No 2. P. 87–94.

15. Haksli L., Krompton R. Diffuziya i drejf elektronov v gazah [Diffusion and drift of electrons in gases]. Moscow: Mir, 1977. 672 p.

16. Cook J.M. Downstream plasma etching and stripping // Solid State Technology. 1987. Vol. 306 No 4. P. 147–151.

17. Gou Y., Zhang H., E J. L. Vliyanie izmeneniya chastoty na dielektricheskij bar'ernyj razryad v smesi geliya s kislorodom pri perekhode ot mnozhestvennyh k odinochnomu proboyu na poluperiode [The effect of frequency changes on the dielectric barrier discharge in a mixture of helium and oxygen during the transition from multiple to single breakdown at half-life] // Fizika plazmy [Plasma Physics]. 2019. Vol. 45, No 11. P. 1041–1047. doi: 10.1134/S0367292119100056.

18. Moss S.J. Polymer degradation in reactive gas plasmas // Polymer degradation and stability 1987. Vol. 17, iss. 3. P. 205–222.

19. Fridman A. Plasma Chemistry. Cambridge University Press, 2008. 978 p. doi: 10.1017/CBO9780511546075.

20. Sabadil H., Bachmann P., Kastelewicz H. Reaktionskinetik der Ozonbildung in der Sauerstoffglimmentladung // Beitr. Plasmaphys. 1980. Bd. 20. No 4. P. 283–295.

21. Storch D.M., Kushner M.J. Destruction mechanisms for formaldehyde in atmospheric pressure low temperature plasmas // Journal of applied physics. 1993. Vol. 73, No 1. P. 51–55. doi: 10.1063/1.353828.

Efimov A.E., Bubnov A.G. Air purification from formaldehyde by active barrier discharge particles.

The main active plasma particles concentrations of the dielectric barrier discharge, which allow the formaldehyde molecules decomposition in the air,

have been identified and evaluated. The dependence of their concentration on some plasma parameters is investigated. It is shown that the degree of conversion of formaldehyde reaches 99% with an increase in the value of the power invested in the discharge, and, accordingly, an increase in the concentration of atomic oxygen in the ground state. It is found that the main stable products of formaldehyde degradation are CO₂, CO and H₂O.

Keywords: active plasma particles; formaldehyde; cleaning; degree of transformation; dielectric barrier discharge; volatile organic compounds.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 21.11.2022

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 28.12.2022

Принята к публикации / Accepted for publication: 17.01.2023

Информация об авторах

Ефимов Артём Евгеньевич, аспирант, Ивановский государственный химико-технологический университет, Россия, 153000, г. Иваново, пр. Шереметевский, 7, E-mail: artem.efimov.1995@list.ru.

Бубнов Андрей Германович, доктор химических наук, доцент, профессор кафедры промышленной экологии, Ивановский государственный химико-технологический университет, Россия, 153000, г. Иваново, пр. Шереметевский, 7, E-mail: bubag@mail.ru.

Information about authors

Artyom E. Efimov, Post-Graduate Student, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, 7, Sheremetevsky av., Ivanovo, 153000, Russia, E-mail: artem.efimov.1995@list.ru.

Andrey G. Bubnov, D.Sci. in Chemistry, Associate Professor, Professor of Industrial Ecology department, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, 7, Sheremetevsky av., Ivanovo, 153000, Russia, E-mail: bubag@mail.ru.

