

**ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ ОКИСЛЕНИИ БЕНЗОЛА И ТОЛУОЛА
ПОД ДЕЙСТВИЕМ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА****А.В. Лещик, А.Н. Очередько, А.Ю. Рябов, Т.В. Петренко, С.В. Кудряшов**

Алена Валерьевна Лещик (ORCID 0009-0002-7079-0522) *, Андрей Николаевич Очередько (ORCID 0000-0001-5629-064X), Андрей Юрьевич Рябов (ORCID 0000-0001-5686-3006), Татьяна Васильевна Петренко (ORCID 0000-0003-3457-3299), Сергей Владимирович Кудряшов (ORCID 0000-0002-6734-2123)

Лаборатория физико-химических методов исследования, Институт химии нефти СО РАН, пр. Академический, 4, Томск, Российская Федерация, 634021

E-mail: ms.leshchik7@yandex.ru*, andrew@ipc.tsc.ru, andrey@ipc.tsc.ru, uvikon@ipc.tsc.ru, ks@ipc.tsc.ru

Представлены результаты по влиянию температуры стенок реактора на прямое одностадийное окисление бензола и толуола в плазмохимическом реакторе с барьерным разрядом. Основными продуктами окисления бензола являются фенолы и двухатомные фенолы, при окислении толуолом в основном образуются крезолы, бензальдегид и бензиловый спирт. Проведенные исследования по влиянию температуры стенок реактора позволили установить основные закономерности окисления бензола и толуола в барьерном разряде. Конверсия бензола при окислении кислородом увеличивается с 0,2 до 0,4% мас., при окислении воздухом изменяется с 0,4 до 0,6% мас. при увеличении температуры стенок реактора. Конверсия толуола при окислении кислородом увеличивается с 1 до 3% мас., при окислении воздухом изменяется от 0,4 до 0,6% мас. при увеличении температуры стенок реактора. Установлено, что при увеличении температуры стенок реактора в экспериментах по окислению бензола воздухом содержание фенола и пирокатехина в смеси практически не изменяется. Увеличение температуры стенок реактора в случае окисления бензола воздухом приводит к снижению содержания гидрохинона в смеси продуктов реакции, а при окислении бензола кислородом – к увеличению содержания гидрохинона. В экспериментах по окислению толуола воздухом в барьерном разряде увеличивается содержание бензилового спирта и крезолов, при этом снижается содержание бензойного альдегида. При окислении толуола в среде воздуха сохраняется тенденция по увеличению содержания бензилового спирта, крезолов и уменьшению содержания бензилового альдегида при увеличении температуры стенок реактора. На основе полученных нами ранее результатов по окислительной конверсии бензола и температурного эффекта в экспериментах по окислению толуола в барьерном разряде продемонстрирована целесообразность использования температуры для управления процессом одностадийного окисления ароматических углеводородов в плазме.

Ключевые слова: плазмохимия, диэлектрический барьерный разряд, прямое окисление толуола, крезолы

Для цитирования:

Лещик А.В., Очередько А.Н., Рябов А.Ю., Петренко Т.В., Кудряшов С.В. Температурный эффект при окислении бензола и толуола под действием барьерного разряда. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 11. С. 18–24. DOI: 10.6060/ivkkt.20236611.10t.

For citation:

Leshchik A.V., Ochered'ko A.N., Ryabov A.Yu., Petrenko T.V., Kudryashov S.V. Effect of temperature on benzene and toluene oxidation in a barrier discharge. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 11. P. 18–24. DOI: 10.6060/ivkkt.20236611.10t.

EFFECT OF TEMPERATURE ON BENZENE AND TOLUENE OXIDATION IN A BARRIER DISCHARGE

A.V. Leshchik, A.N. Ochered'ko, A.Yu. Ryabov, T.V. Petrenko, S.V. Kudryashov

Alena V. Leshchik (ORCID 0009-0002-7079-0522)*, Andrey N. Ochered'ko (ORCID 0000-0001-5629-064X), Andrey Yu. Ryabov (ORCID 0000-0001-5686-3006), Tatyana V. Petrenko (ORCID 0000-0003-3457-3299), Sergey V. Kudryashov (ORCID 0000-0002-6734-2123)

Laboratory of Physicochemical Methods of Analysis, Institute of Petroleum Chemistry, Siberian Branch of the RAS, Akademicheskii ave., 4, Tomsk, 634055, Russia

E-mail: ms.leshchik7@yandex.ru*, andrew@ipc.tsc.ru, andrey@ipc.tsc.ru, uvikon@ipc.tsc.ru, ks@ipc.tsc.ru

The results on the influence of the temperature of the reactor walls on the direct single-stage oxidation of benzene and toluene in a plasma-chemical reactor with a barrier discharge are presented. The main products of benzene oxidation are phenols and dihydric phenols. During oxidation with toluene, cresols, benzaldehyde and benzyl alcohol are mainly formed. The conducted studies on the influence of the temperature of the reactor walls made it possible to establish the dependence on the main parameters of the oxidation of hydrocarbons in a barrier discharge. The conversion of benzene during oxidation with oxygen increases from 0.2 to 0.4% wt., during oxidation with air it changes from 0.4 to 0.6% wt. with an increase in the temperature of the reactor walls. The conversion of toluene during oxidation with oxygen increases from 1 to 3% wt., during oxidation with air it changes from 0.4 to 0.6% wt. with an increase in the temperature of the reactor walls. It has been established that with an increase in the temperature of the reactor walls in experiments on the oxidation of benzene with air, the content of phenol and pyrocatechol in the mixture practically does not change. An increase in the temperature of the reactor walls in the case of benzene oxidation with air leads to a decrease in the hydroquinone content in the mixture of reaction products, and in the case of benzene oxidation with oxygen, to an increase in the hydroquinone content. In experiments on the oxidation of toluene with air in a barrier discharge, the content of benzyl alcohol and cresols increases, while the content of benzoic aldehyde decreases. During the oxidation of toluene in air, the tendency to increase the content of benzyl alcohol, cresols, and decrease the content of benzyl aldehyde with an increase in the temperature of the reactor walls remains. Comparing our previous results on the oxidative conversion of benzene and the temperature effect in experiments on the oxidation of toluene in a barrier discharge, we can conclude that it is expedient to use temperature to control the process of one-stage oxidation of aromatic hydrocarbons in plasma.

Key words: plasma chemistry, dielectric barrier discharge, toluene direct oxidation, cresols

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день существует большая потребность в разработке эффективных и экологически безопасных методов нефтехимического производства, удовлетворяющих принципам рационального природопользования и «зеленой» химии. В частности, современные способы получения фенолов – продуктов крупнотоннажной химии – не всегда экологичны, энергоэффективны и требуют модернизации. Поэтому поиск альтернативных способов получения фенолов различного строения остается актуальным.

Среди альтернативных методов синтеза фенолов можно отметить прямое окисление бензола, толуола каталитическими методами [1-3], плазмо-

химическими методами в присутствии катализаторов [4, 5], а также плазмохимическими методами в плазме барьерного разряда (БР) [6-11]. Плазмохимическое окисление ароматических углеводородов [12-14] имеет ряд преимуществ и является перспективным направлением синтеза органических веществ, поверхностно-активных веществ [15] и полимеров.

В работе приведен сравнительный анализ результатов по влиянию температуры стенок реактора на одностадийную окислительную конверсию бензола и толуола в БР.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Толуол окисляли кислородом и воздухом в плазмохимическом реакторе с БР. Подробная схема

установки представлена в работе [16]. Температуру стенок плазмохимического реактора контролировали термостатом и варьировали от 12 до 40 °С. Объемные скорости потока составили 60 мл/мин для окислительного газа и 0,3 мл/мин для толуола. Время пребывания исходной парогазовой смеси в реакторе 10,5 с. Конверсия толуола приведена за один проход парогазовой смеси через разрядную зону реактора.

Разряд зажигался высоковольтными импульсами напряжения амплитудой не выше 10 кВ, частота повторения импульсов равнялась 400 Гц. Активная мощность разряда рассчитывалась по методике, приведенной в [17], и равнялась 1,8 Вт.

Состав продуктов окисления толуола в барьерном разряде исследовали методом газовой хроматографии (хроматограф Agilent HP 6890 с пламенно-ионизационным детектором).

Расчет величины конверсии бензола (толуола) при обработке в плазмохимическом реакторе по убыли исходного сырья будет не точным, т. к. в открытой проточной двухфазной системе сложно уловить весь непрореагировавший углеводород. Небольшая часть продуктов не идентифицирована. Поэтому конверсию исходного углеводорода, селективность образования продуктов окисления в послереакционной смеси (долю продукта в смеси), оценивали на основе массы идентифицированных продуктов окисления.

Конверсию бензола (толуола) рассчитывали по формуле:

$$X = \frac{M_{\text{прод}}}{M} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $M_{\text{прод}}$ – масса основных продуктов реакции, мг; M – масса исходного бензола (толуола), мг.

Селективность образования (содержание) продуктов реакции (% мас.) рассчитывали по выражению:

$$S = \frac{M_i}{M_{\text{прод}}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где M_i – масса i -го продукта реакции, мг.

Энергозатраты на превращение углеводородов рассчитывали по методике [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1, 2 приведены экспериментальные зависимости, иллюстрирующие влияние температуры стенок реактора на процесс окисления толуола (кривая 1) кислородом (рис. 1 а) и воздухом (рис. 1 б) в реакторе с барьерным разрядом. Рисунки для наглядности дополнены соответствующими данными по окислению бензола (кривая 2) в БР в идентичных условиях [16].

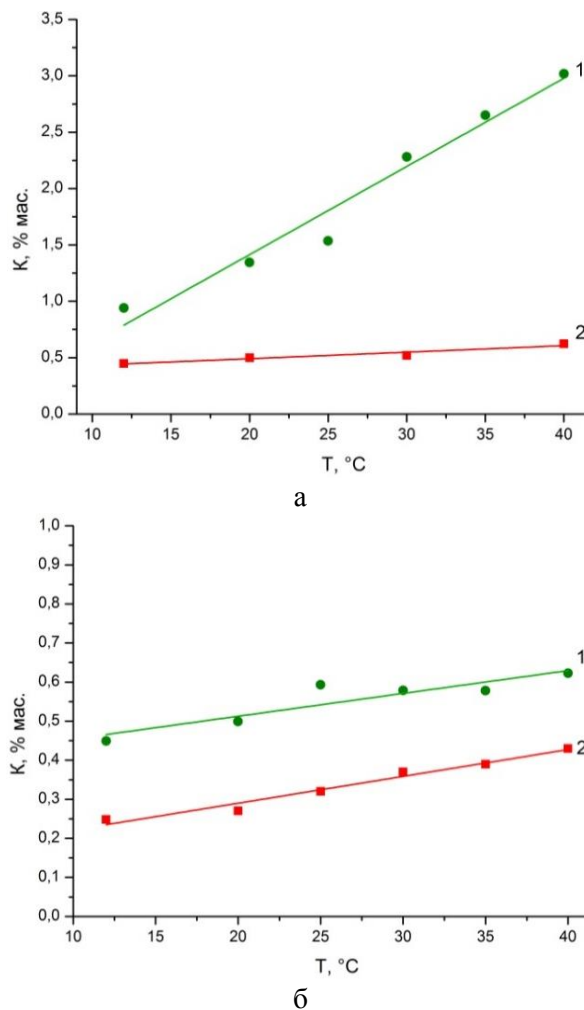


Рис. 1. Конверсия толуола (1) и бензола (2) при различной температуре стенок реактора. а) окисление кислородом б) окисление воздухом

Fig. 1. Conversion of toluene (1) and benzene (2) at different temperatures of the reactor walls: а) oxygen oxidation б) air oxidation

В исследованном температурном диапазоне конверсия толуола при окислении кислородом увеличивается с 1 до 3% мас. (рис. 1), что сопровождается снижением энергозатрат на его превращение с 14 до 6 кВт·ч/кг (рис. 2). При окислении воздухом конверсия толуола ниже, чем в случае кислорода, а ее увеличение с ростом температуры стенок реактора выражено менее заметно (с 0,4 до 0,6% мас.), энергозатраты при этом снижаются с 17 до 9,5 кВт·ч/кг.

Конверсия бензола при окислении кислородом [16] тоже увеличивается с 0,2 до 0,4% мас., что соответствует энергозатратам 45 и 27 кВт·ч/кг. В случае воздуха [16] в указанном интервале температур конверсия бензола возрастает с 0,4 до 0,5% мас. (рис. 1), что соответствует энергозатратам 28 и 23 кВт·ч/кг (рис. 2).

Среди продуктов окисления толуола идентифицированы в основном бензойный альдегид (кривая 1), бензиловый спирт (кривая 3) и различные крезолы (кривая 2). Зависимость селективности их образования от температуры стенок реактора приведена на рис. 3, 4.

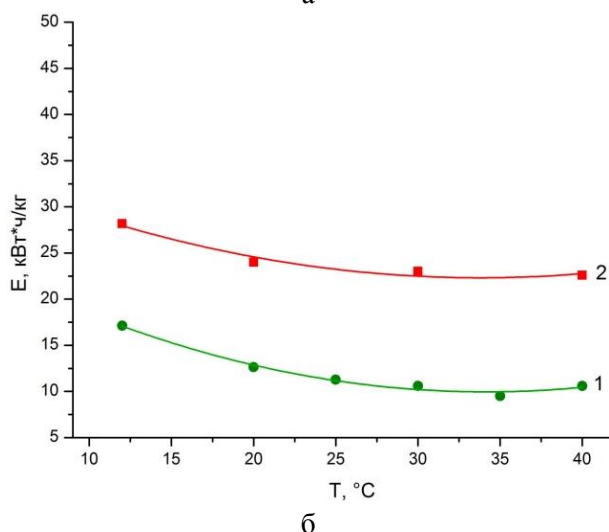
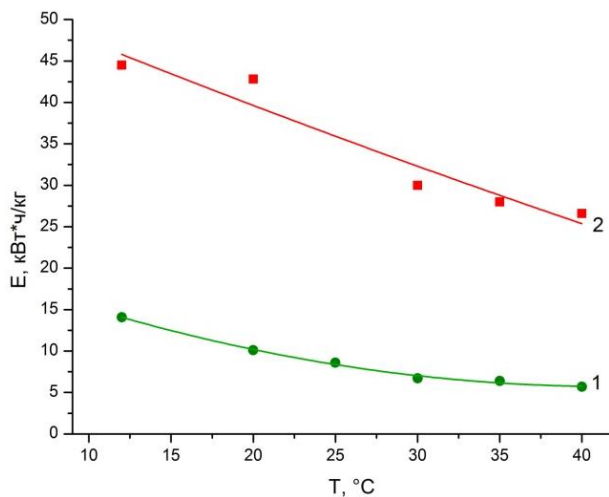


Рис. 2. Энергозатраты на превращение толуола (1) и бензола (2) при различной температуре стенок реактора а) окисление кислородом б) окисление воздухом
Fig. 2. Energy consumption for the conversion of toluene (1) and benzene (2) at different temperatures of the reactor walls: а) oxygen oxidation б) air oxidation

При увеличении температуры стенок реактора в экспериментах по окислению толуола воздухом увеличивается содержание бензинового спирта (с 15,9 до 19,5% мас.) и крезолов (с 30 до 37% мас.), при этом снижается содержание бензойного альдегида с 41 до 30,6% мас.

При окислении толуола в среде воздуха при увеличении температуры стенок реактора тенденции по увеличению содержания бензинового

спирта (с 10,9 до 15% мас.), крезолов (с 28 до 44% мас.) и уменьшению содержания бензинового альдегида (с 24,5 до 19% мас.) сохраняются.

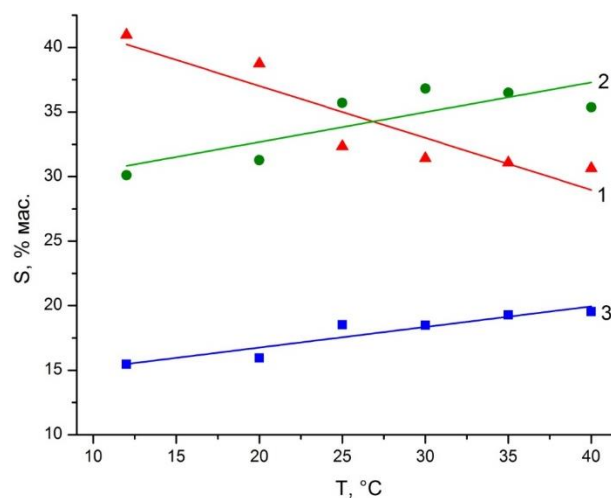


Рис. 3. Селективность образования продуктов окисления толуола воздухом в БР при различной температуре стенок реактора: бензойный альдегид (1), различные крезолы (2), бензиловый спирт (3)

Fig. 3. Selectivity of formation of toluene oxidation products with air in BR at different temperatures of the reactor walls: benzoic aldehyde (1), various cresols (2), benzyl alcohol (3)

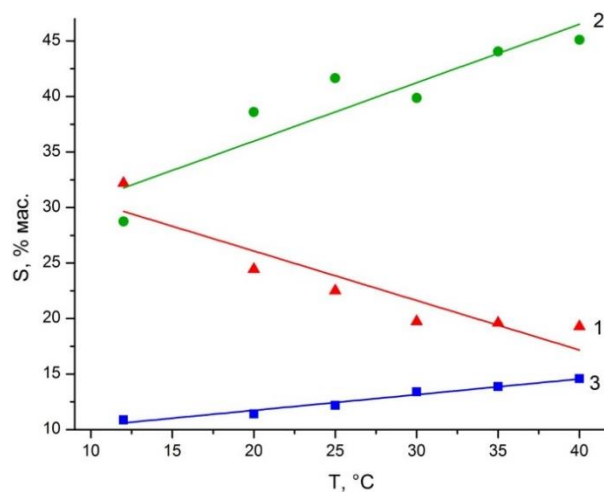


Рис. 4. Селективность образования продуктов окисления толуола кислородом в БР при различной температуре стенок реактора: бензойный альдегид (1), различные крезолы (2), бензиловый спирт (3)

Fig. 4. Selectivity of formation of toluene oxidation products with oxygen in BR at different temperatures of the reactor walls: benzoic aldehyde (1), various cresols (2), benzyl alcohol (3)

При окислении бензола как кислородом, так и воздухом в БР [16] основным продуктом окисления является фенол. Селективность его образования достигает 72,8 и 77,3% мас. в случае кислорода и воздуха, соответственно. Также обнаружены двухатомные фенолы, в основном – гидрохинон, селективность его образования составляет 3,3

и 2,5% мас. для экспериментов по окислению бензола кислородом и воздухом, соответственно. При этом температурный эффект практически слабо выражен [16] (на примере окисления бензола воздухом): селективность образования фенола с ростом температуры падает незначительно (с ~80 до ~75% мас.), конверсия слабо растет с 0,4 до 0,5% мас.

Из данных о протекании реакций в низкотемпературной плазме известно [17], что инициирование химических превращений при этом происходит при воздействии электронов разряда на молекулы исходной смеси. Затем частицы, образовавшиеся на стадии разрядного инициирования реакции, участвуют в дальнейших химических превращениях с образованием стабильных продуктов. На основе сведений о развитии и протекании физико-химических процессов в низкотемпературной плазме разрядов атмосферного давления, в том числе БР, о поведении углеводородов различных классов в плазме различных разрядов ранее была предложена вероятная схема прямого окисления бензола кислородом в фенол в БР в условиях эффективного вывода продуктов реакции из разрядной зоны реактора [16]. Подобная схема, по-видимому, лежит в основе механизма окисления толуола.

Основным каналом образования частиц на стадии разрядного инициирования реакции будет диссоциация молекул кислорода и бензола (толуола) из электронно-возбужденных состояний.

Под действием БР молекулы кислорода диссоциируют преимущественно с образованием атомарного кислорода в основном состоянии $O(^3P)$ [17-19]. Присоединение образовавшегося атомарного кислорода к углеродному атому двойной связи молекулы бензола (толуола) приводит к образованию фенола (крезолов) [11, 19-21]. Как следует из данных работы [19], нельзя исключать образование фенола из бензола и по радикально-цепному механизму через гидроперекисный радикал при взаимодействии молекулярного кислорода и фенильного радикала, образовавшегося на стадии инициирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wang B., Wang N., Sun Y., Xiao H., Fu M., Li Sh., Liang H., Qiao Zh., Ye D. Dielectric barrier discharge plasma modified Pt/CeO₂ catalysts for toluene oxidation: Effect of discharge time. *Appl. Surf. Sci.* 2023. V. 614. P. 156162. DOI: 10.1016/j.apsusc.2022.156162.
2. Артемьев Ю.М., Артемьева М.А., Лисогурская О.Ф. Фотокаталитическое окисление толуола на оксиде ниобия (V). *Журн. приклад. химии.* 1995. Т. 68. № 6. С. 956-961.

В случае толуола, вероятно, кроме указанных стадий, становится существенным параллельный процесс с окислением боковой метильной группы по гидроперекисному механизму, подобному механизму классического окисления газообразных углеводородов [18, 21]. В результате этого процесса образуются бензальдегид и бензиловый спирт (рис. 3, 4).

ВЫВОДЫ

Проведены исследования по влиянию температуры стенок реактора на процесс окисления толуола кислородом и воздухом в барьерном разряде. Основными продуктами окисления толуола являются бензиловый спирт, бензальдегид и крезолы. Показано, что конверсия толуола при окислении кислородом с ростом температуры стенок реактора увеличивается с 1 до 3% мас., при окислении воздухом – с 0,4 до 0,6% мас. В случае как кислорода, так и воздуха рост температуры стенок реактора сопровождается повышением селективности образования бензинового спирта и крезолов и снижением селективности образования бензальдегида.

Продемонстрирована целесообразность контроля температуры для управления процессом одностадийного окисления ароматических углеводородов в плазме.

БЛАГОДАРНОСТЬ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект FWRN-2021-0003.

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

This work was supported by funding from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No FWRN-2021-0003).

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

REFERENCES

1. Wang B., Wang N., Sun Y., Xiao H., Fu M., Li Sh., Liang H., Qiao Zh., Ye D. Dielectric barrier discharge plasma modified Pt/CeO₂ catalysts for toluene oxidation: Effect of discharge time. *Appl. Surf. Sci.* 2023. V. 614. P. 156162. DOI: 10.1016/j.apsusc.2022.156162.
2. Artemyev Yu.M., Artemyeva M.A., Lisogurskaya O.F. Photocatalytic oxidation of toluene on niobium (V) oxide. *Zhurn. Prikl. Khim.* 1995. V. 68. N 6. P. 956-961 (in Russian).

3. **Xu N., Fu W., He C.** Benzene removal using non-thermal plasma with CuO/AC catalyst: reaction condition optimization and decomposition mechanism. *Plasma Chem. Plasma Process.* 2014. V. 34. N 6. P. 1387–1402. DOI: 10.1007/s11090-014-9580-y.
4. **Kim H.H., Teramoto Y., Ogata A., Takagi H., Nanba T.** Plasma Catalysis for Environmental Treatment and Energy Applications. *Plasma Chem. Plasma Process.* 2016. V. 36. P. 45–72. DOI: 10.1007/s11090-015-9652-7.
5. **Teramoto Y., Kim H.H., Negishi N., Ogata A.** The Role of Ozone in the Reaction Mechanism of a Bare Zeolite-Plasma Hybrid System. *Catalysts.* 2015. V. 5. N 2. P. 838-850. DOI: 10.3390/catal5020838.
6. **Sekiguchi H., Ando M., Kojima H.** Study of hydroxylation of benzene and toluene using a micro-DBD plasma reactor. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2005. V. 38. N 11. P. 1722. DOI: 10.1088/0022-3727/38/11/013.
7. **Ascenzi D., Franceschi P., Guella G., Tosi P.** Phenol production in benzene/air plasmas at atmospheric pressure. Role of radical and ionic routes. *J. Phys. Chem. A.* 2006. V. 110. N 25. P. 7841–7847. DOI: 10.1021/jp062406p.
8. **Dey G.R., Sharma A., Pushpa K.K., Das T.N.** Variable products in dielectric-barrier discharge assisted benzene oxidation. *J. Hazard. Mater.* 2010. V. 178. N 1–3. P. 693–698. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.01.143.
9. **Lee D.W., Lee J.H., Chun B.H., Lee K.Y.** The Characteristics of direct hydroxylation of benzene to phenol with molecular oxygen enhanced by pulse DC corona at atmospheric pressure. *Plasma Chem. Plasma Process.* 2003. V. 23. N 3. P. 519–539. DOI: 10.1023/A:1023287016525.
10. **Liu, Y.J., Jiang X.Z., Wang L.** One-step hydroxylation of benzene to phenol induced by glow discharge plasma in an aqueous solution. *Plasma Chem. Plasma Process.* 2007. V. 27. N 4. P. 496–503. DOI: 10.1007/s11090-007-9059-1.
11. **Najafpoor A.A., Jafari, A.J., Hosseinzadeh A., Jazani R.K., Bargozin H.** Optimization of non-thermal plasma efficiency in the simultaneous elimination of benzene, toluene, ethyl-benzene, and xylene from polluted airstreams using response surface methodology. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2018. V. 25. N 1. P. 233–241. DOI: 10.1007/s11356-017-0373-8.
12. **Li J., Bai S.P., Shi X.C., Han S.L., Zhu X.M., Chen W.C., Pu Y.K.** Effects of temperature on benzene oxidation in dielectric barrier discharges. *Plasma Chem. Plasma Process.* 2008. V. 28. N 1. P. 39–48. DOI: 10.1007/s11090-007-9115-x.
13. **Franceschi P., Guella G., Scarduelli G., Tosi P., Dilecce G., Benedictis S.D.** Chemical processes in the atmospheric pressure plasma treatment of benzene. *Plasma Process. Polym.* 2007. V. 4. N 5. P. 548–555. DOI: 10.1002/ppap.200700004.
14. **Ogata A., Shintani N., Yamanouchi K., Mizuno K., Kushiyama S., Yamamoto T.** Effect of water vapor on benzene decomposition using a nonthermal-discharge plasma reactor. *Plasma Chem. Plasma Process.* 2000. V. 20. N 4. P. 453–467. DOI: 10.1023/A:1007075721610.
15. **Шутов Д.А., Иванов А.Н., Рыбкин В.В., Манукян А.С.** Сравнительное изучение электрофизических характеристик тлеющего разряда над водными растворами анионоактивных и катионоактивных поверхностно-активных веществ. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2020. Т. 63. Вып. 2. С. 91–98. DOI: 10.6060/ivkkt.20206302.6194.
16. **Очередыко А.Н., Кудряшов С.В., Рябов А.Ю., Лещик А.В.** Прямое окисление бензола в фенол в реакторе с барьерным разрядом. *Химия высоких энергий.* Т. 56. №. 4. С. 300–304. DOI: 10.31857/S002311932204012X.
3. **Xu N., Fu W., He C.** Benzene removal using non-thermal plasma with CuO/AC catalyst: reaction condition optimization and decomposition mechanism. *Plasma Chem. Plasma Process.* 2014. V. 34. N 6. P. 1387–1402. DOI: 10.1007/s11090-014-9580-y.
4. **Kim H.H., Teramoto Y., Ogata A., Takagi H., Nanba T.** Plasma Catalysis for Environmental Treatment and Energy Applications. *Plasma Chem. Plasma Process.* 2016. V. 36. P. 45–72. DOI: 10.1007/s11090-015-9652-7.
5. **Teramoto Y., Kim H.H., Negishi N., Ogata A.** The Role of Ozone in the Reaction Mechanism of a Bare Zeolite-Plasma Hybrid System. *Catalysts.* 2015. V. 5. N 2. P. 838-850. DOI: 10.3390/catal5020838.
6. **Sekiguchi H., Ando M., Kojima H.** Study of hydroxylation of benzene and toluene using a micro-DBD plasma reactor. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2005. V. 38. N 11. P. 1722. DOI: 10.1088/0022-3727/38/11/013.
7. **Ascenzi D., Franceschi P., Guella G., Tosi P.** Phenol production in benzene/air plasmas at atmospheric pressure. Role of radical and ionic routes. *J. Phys. Chem. A.* 2006. V. 110. N 25. P. 7841–7847. DOI: 10.1021/jp062406p.
8. **Dey G.R., Sharma A., Pushpa K.K., Das T.N.** Variable products in dielectric-barrier discharge assisted benzene oxidation. *J. Hazard. Mater.* 2010. V. 178. N 1–3. P. 693–698. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.01.143.
9. **Lee D.W., Lee J.H., Chun B.H., Lee K.Y.** The Characteristics of direct hydroxylation of benzene to phenol with molecular oxygen enhanced by pulse DC corona at atmospheric pressure. *Plasma Chem. Plasma Process.* 2003. V. 23. N 3. P. 519–539. DOI: 10.1023/A:1023287016525.
10. **Liu, Y.J., Jiang X.Z., Wang L.** One-step hydroxylation of benzene to phenol induced by glow discharge plasma in an aqueous solution. *Plasma Chem. Plasma Process.* 2007. V. 27. N 4. P. 496–503. DOI: 10.1007/s11090-007-9059-1.
11. **Najafpoor A.A., Jafari, A.J., Hosseinzadeh A., Jazani R.K., Bargozin H.** Optimization of non-thermal plasma efficiency in the simultaneous elimination of benzene, toluene, ethyl-benzene, and xylene from polluted airstreams using response surface methodology. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2018. V. 25. N 1. P. 233–241. DOI: 10.1007/s11356-017-0373-8.
12. **Li J., Bai S.P., Shi X.C., Han S.L., Zhu X.M., Chen W.C., Pu Y.K.** Effects of temperature on benzene oxidation in dielectric barrier discharges. *Plasma Chem. Plasma Process.* 2008. V. 28. N 1. P. 39–48. DOI: 10.1007/s11090-007-9115-x.
13. **Franceschi P., Guella G., Scarduelli G., Tosi P., Dilecce G., Benedictis S.D.** Chemical processes in the atmospheric pressure plasma treatment of benzene. *Plasma Process. Polym.* 2007. V. 4. N 5. P. 548–555. DOI: 10.1002/ppap.200700004.
14. **Ogata A., Shintani N., Yamanouchi K., Mizuno K., Kushiyama S., Yamamoto T.** Effect of water vapor on benzene decomposition using a nonthermal-discharge plasma reactor. *Plasma Chem. Plasma Process.* 2000. V. 20. N 4. P. 453–467. DOI: 10.1023/A:1007075721610.
15. **Shutov D.A., Ivanov A.N., Rybkin V.V., Manukyan A.S.** Comparative study of the electrical and physical parameters of glow discharge under water solutions of anionic and cationic surfactants. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2020. V. 63. N 2. P. 91–98 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20206302.6194.
16. **Ochered'ko A.N., Kudryashov S.V., Ryabov A.Yu., Leshchik A.V.** Direct Oxidation of Benzene to Phenol in a Dielectric-Barrier Discharge Reactor. *High Energy Chem.* V. 56. N 4. P. 284–288. DOI: 10.1134/S0018143922040129.

17. **Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В.** Физическая химия барьерного разряда. М.: МГУ. 1989. 174 с.
18. **Cvetanovic R.J.** Evaluated chemical kinetic data for the reactions of atomic oxygen O(³P) with unsaturated hydrocarbons. *J. Phys. Chem. Ref. Data.* 1987. V. 16. P. 261–326. DOI: 10.1063/1.555783.
19. **Nguyen T. L., Peeters J., Vereecken L.** Theoretical reinvestigation of the O(³P)+C₆H₆ reaction: quantum chemical and statistical rate calculations. *J. Phys. Chem. A.* 2007. V. 111. N 19. P. 3836–3849. DOI: 10.1021/jp0660886.
20. **Parker J.K., Davis S.R.** Photochemical reactions of oxygen atoms with toluene, m -xylene, p -xylene, and mesitylene: an infrared matrix isolation investigation. *J. Phys. Chem. A.* 2000. V. 104. N 17. P. 4108–4114. DOI: 10.1021/jp992832t.
21. **Kogelschatz U.** Dielectric-barrier discharges: their history, discharge physics, and industrial applications. *Plasma Chem. Plasma Process.* 2003. V. 23. N 1. P. 1–46. DOI:10.1023/A:1022470901385.
17. **Samoilovich V.G., Gibalov V.I., Kozlov K.V.** Physical chemistry of a barrier discharge. М.: MGU. 1989. 174 p. (in Russian).
18. **Cvetanovic R.J.** Evaluated chemical kinetic data for the reactions of atomic oxygen O(³P) with unsaturated hydrocarbons. *J. Phys. Chem. Ref. Data.* 1987. V. 16. P. 261–326. DOI: 10.1063/1.555783.
19. **Nguyen T. L., Peeters J., Vereecken L.** Theoretical reinvestigation of the O(³P)+C₆H₆ reaction: quantum chemical and statistical rate calculations. *J. Phys. Chem. A.* 2007. V. 111. N 19. P. 3836–3849. DOI: 10.1021/jp0660886.
20. **Parker J.K., Davis S.R.** Photochemical reactions of oxygen atoms with toluene, m -xylene, p -xylene, and mesitylene: an infrared matrix isolation investigation. *J. Phys. Chem. A.* 2000. V. 104. N 17. P. 4108–4114. DOI: 10.1021/jp992832t.
21. **Kogelschatz U.** Dielectric-barrier discharges: their history, discharge physics, and industrial applications. *Plasma Chem. Plasma Process.* 2003. V. 23. N 1. P. 1–46. DOI:10.1023/A:1022470901385.

Поступила в редакцию 07.07.2023

Принята к опубликованию 05.09.2023

Received 07.07.2023

Accepted 05.09.2023