

**Удаление изопропилового спирта электрическим разрядом  
из водного раствора с микропузырьками**

*В. А. Панов, В. Я. Печеркин, Л. М. Василяк, Ю. М. Куликов,  
С. П. Ветчинин, А. С. Савельев*

*Экспериментально исследовано удаление примесей изопропилового спирта с начальной объёмной концентрацией 20 % в ячейке с объёмом рабочей зоны  $8 \times 3 \times 1$  см<sup>3</sup> в водном потоке с мелкодисперсными воздушными пузырьками с расходом раствора 2 м<sup>3</sup>/час квазиобъёмным электрическим разрядом, получаемым с помощью многоэлектродной системы секционированных игольчатых электродов. При переменном напряжении промышленной частоты 50 Гц создание мелкодисперсной фазы с пузырьками воздуха в электроразрядной ячейке повышает эффективность удаления изопропилового спирта из потока воды на 6 %.*

*Ключевые слова:* электрический разряд, секционированный игольчатый электрод, микропузырьки воздуха, водный раствор изопропилового спирта, удаление примесей, вода.

**DOI:** 10.51368/1996-0948-2021-5-32-37

**Введение**

В настоящее время загрязнение атмосферы, гидросферы и литосферы твердыми, жидкими и газообразными отходами промышленной деятельности достигло угрожающих размеров. В связи с этим, одной из актуальных задач является очистка промышленных сточных вод.

Сегодня наиболее распространенными методами очистки промышленных сточных вод являются реагентные, электрохимические, отстаивание, механическая фильтрация и обезвоживание, сорбционные, мембранные методы, метод ионного обмена и выпаривание

[1–4]. Однако все эти методы являются дорогостоящими и могут занимать существенную долю в себестоимости выпускаемой продукции. Поэтому много усилий прилагается, чтобы уменьшить в себестоимости составляющую на очистку сточных вод. Метод электроразрядной плазмы имеет широкие перспективы в решении ряда экологических вопросов, поскольку позволяет создавать высокие концентрации химически активных частиц при низкой температуре среды и в отсутствие химических реагентов, способствующих дополнительному загрязнению окружающей среды [5–7]. Импульсный характер воздействия разряда на обрабатываемую воду позволяет достигать существенно неравновесных условий в каналах разряда, при этом появляется возможность создания технологических процессов, которые не могут быть реализованы в стационарных условиях [8, 9], так как требуют очень больших затрат энергии, высоких температур и т. д.

С точки зрения воздействия на обрабатываемую воду, целесообразно выделить два основных типа электроразрядных процессов. Первый – это барьерный разряд, когда электроды изолированы от обрабатываемой жидкости [10]. В этом случае отсутствует эрозия

---

**Панов Владислав Александрович**, с.н.с., к.ф.-м.н.  
E-mail: panovvladislav@gmail.com

**Печеркин Владимир Яковлевич**, с.н.с., к.ф.-м.н.

**Василяк Леонид Михайлович**, гл.н.с., д.ф.-м.н.  
E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru

**Куликов Юрий Матвеевич**, н.с., к.ф.-м.н.

**Ветчинин Сергей Петрович**, с.н.с., к.ф.-м.н.

**Савельев Андрей Сергеевич**, с.н.с., к.ф.-м.н.

Объединенный институт высоких температур РАН,  
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

*Статья поступила в редакцию 30 сентября 2021 г.*

---

© Панов В. А., Печеркин В. Я., Василяк Л. М.,  
Куликов Ю. М., Ветчинин С. П., Савельев А. С., 2021

электродов и материал электродов не попадает в обрабатываемый разрядом объем. Однако в проводящей воде повышаются потери на нагрев жидкости, увеличивается величина пробойного напряжения и наблюдается контракция разряда, что приводит к уменьшению эффективности обработки. Второй тип разряда реализуется, когда электроды погружены в обрабатываемую жидкость [11]. В этом случае в процессе обработки материал электродов будет попадать в обрабатываемую жидкость, что может приводить к нежелательным дополнительным загрязнениям и требует тщательного подбора материала электродов. Преимуществом данного метода является возможность уменьшать величину пробойного напряжения конфигурацией электродов в проводящей жидкости. Применение игольчатых секционированных электродов позволяет увеличить разрядный объем и, таким образом, оптимизировать эффективность обработки для конкретных условий. Добавление микропузырьков воздуха в проводящую воду может приводить к повышению эффективности технологии обработки электрическим разрядом по следующим причинам. Плазменный метод обработки жидкости связан, как правило, с разложением органических загрязнителей путем термического воздействия. Активность химических реакций разложения связана с тем, насколько развита поверхность раздела фаз жидкость-газ [12, 13]. Таким образом, предварительно барботируя жидкость воздухом, можно получать большое количество пузырьков, что означает большую площадь поверхности фазового раздела, позволяющую существенно повысить эффективность. Также в жидкость вводится большое количество кислорода, способствующего протеканию реакций окисления органических соединений.

В настоящее время уже создан ряд устройств, использующих электрический разряд для очистки воды. Однако общей для многих из них проблемой является низкая степень очистки вследствие контракции разряда и уменьшения полезной области обработки [5]. Таким образом, целесообразен поиск новых способов повышения эффективности электро-разрядной очистки воды.

Целью настоящей работы являлось исследование удаления изопропилового спирта из воды с микропузырьками воздуха квазиобъемным электрическим разрядом, полу-

чаемым с помощью игольчатых секционированных электродов.

### Экспериментальная установка

Схема установки приведена на рис. 1.

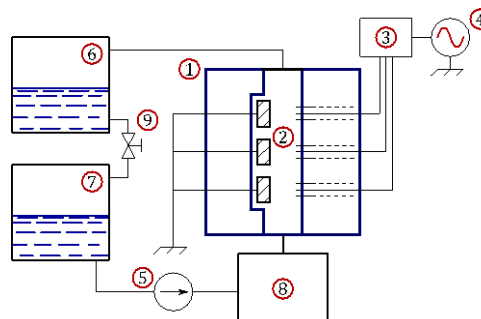


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – разрядная ячейка; 2 – система секционированных электродов (три заземленные пластины слева и ряды игольчатых электродов справа); 3 – токоограничительный блок; 4 – высоковольтный источник питания; 5 – насос; 6 – бак приема обработанной жидкости; 7 – бак подачи исходной жидкости; 8 – барботажный блок; 9 – кран для режима циклической обработки.

В примененной многоэлектродной плазмохимической ячейке реализуется квазиобъемный разряд с помощью секционированной системы игольчатых электродов (см. рис. 2), увеличивая тем самым рабочую область обработки воды в ячейке. Игольчатый электрод представляет из себя стержень диаметром 1 мм с заостренным рабочим концом, который находится под высоким потенциалом. Заземленный электрод выполнен в виде пластины со скругленными углами. Такая конструкция ячейки позволяет снизить пробойное напряжение вследствие перекрытия соседних ионизационных зон с соседних электродов и сделать распределение тока в ячейке более равномерным. Это приводит к уменьшению эрозии электродов и повышению эффективности энергозатрат в окружающую жидкость.

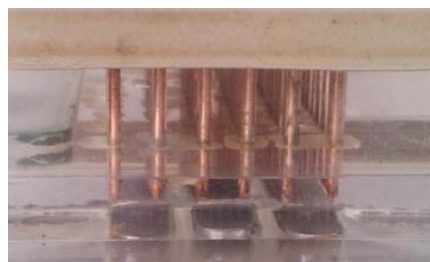


Рис. 2. Фотография системы секционированных электродов. В верхней части рисунка – ряды игольчатых электродов, в нижней – три пластинчатых электрода.

Из рис. 1 видно, что обработка раствора изопропилового спирта в воде с микропузырьками воздуха происходит в разрядной ячейке (1), выполненной из оргстекла. Рабочая зона образована системой секционированных электродов (2), состоящей из трех секций (см. рис. 2). Каждая секция содержит 26 игольчатых электродов под высоким потенциалом и отдельную заземленную пластину. Общий размер рабочей зоны составляет  $8 \times 3 \times 1 \text{ см}^3$ . Ток через отдельный игольчатый электрод ограничивается индивидуальным балластным резистором, установленным в токоограничительном блоке (3). Напряжение переменного тока промышленной частоты подавалось от источника (4). Амплитуда исходного напряжения регулировалась в диапазоне от 1 до 10 кВ.

Проток обрабатываемой жидкости через разрядную ячейку (1) обеспечивается насосом (5) с возможностью регулировки расхода в пределах  $0,1\text{--}10 \text{ м}^3/\text{час}$ . Для обеспечения режимов однократной и циклической обработки применяются два отдельных бака (6) и (7). Для обработки жидкости в режиме с микропузырьками используется барботажный блок (8). Диспергирующим элементом является пористая мембрана, изготовленная из титановых шариков методом спекания. Жидкость подается вдоль поверхности мембраны для предотвращения роста крупных пузырей. Для дополнительного уменьшения размеров пузырьков в рабочей зоне применяется дополнительный блок с кольцами Рашига. Диаметр пузырьков в рабочей зоне составляет  $50\text{--}400 \text{ мкм}$ .

### Методика эксперимента

Исследование эффективности обработки проводилось в режимах однократной и циклической обработки жидкости. Раствор воды с изопропиловым спиртом готовился заранее в баке (6) в объеме, достаточном для проведения экспериментов во всех режимах. Начальная массовая концентрация спирта в растворе составляла 20 %. Для приготовления раствора использовалась вода с электропроводностью  $300 \text{ мкСм/см}$ . В режиме однократной обработки раствор из бака (7) подавался насосом (5) в разрядную ячейку (1) и после обработки собирался в баке (6). В циклическом режиме после обработки в ячейке (1) весь объем обработанной жидкости собирался в баке (6), затем пе-

ренаправлялся в бак (7) с помощью крана (9), после чего начинался следующий цикл обработки. Содержание изопропилового спирта в воде определялось хроматографическим методом на оборудовании МетаХром «Кристаллюкс-4000М» с колонкой DB-1.

### Результаты и обсуждение

Эксперименты проводились при напряжении переменного тока промышленной частоты 50 Гц на разрядной ячейке с напряжением 2 кВ и суммарном разрядном токе через все игольчатые электроды 1,5 А. Расход жидкости составлял  $2 \text{ м}^3/\text{час}$ .

На рис. 3 показана ячейка со светящимся разрядом в процессе обработки. На рис. 4 приведена осциллограмма напряжения на разрядном промежутке, образованном пластинчатым электродом и одним из игольчатых электродов. Средний ток, проходящий через единичный электрод, был равен 0,02 А. Общий ток, потребляемый разрядной ячейкой, составлял 1,5 А при общем количестве игольчатых электродов 78 штук, что говорит о квазиравномерном распределении тока по всем электродам.



Рис. 3. Фотография разрядной ячейки в режиме обработки.

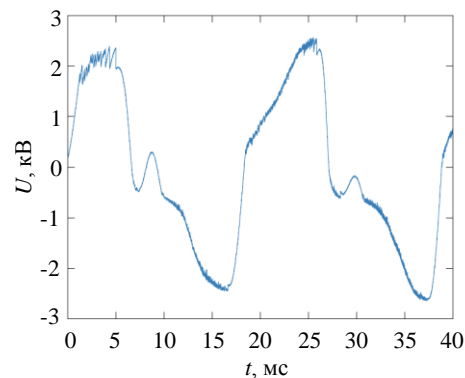


Рис. 4. Осциллограмма напряжения на разрядном промежутке между единичным игольчатым электродом пластинчатым электродом одной секции в режиме обработки раствора с пузырьками.

Исследования проводились в трех режимах.

1. В режиме однократной обработки раствора без добавления пузырьков была достигнута остаточная концентрация изопропилового спирта 19 %. В этом режиме в ячейке наблюдалось слабое свечение, локализованное вблизи острий игольчатых электродов. Визуальный характерный размер области свечения сопоставим с диаметром игольчатых электродов. Характерный объем рабочей области более чем на порядок превышает объем, занимаемый разрядными плазменными каналами. Невысокая степень очистки в таком режиме может объясняться малой площадью контакта «плазма-жидкость», а также значительным объемом зоны без разряда, через которую раствор проходит, не контактируя с плазмой. Ток в рабочей зоне в основном является током проводимости через сам раствор и обеспечивает диссипацию основной части энергии, приводя к нагреву раствора.

2. В режиме однократной обработки раствора с пузырьками была достигнута остаточная концентрация изопропилового спирта 13 %. Добавление пузырьков заметно меняет картину обработки. Яркость свечения значительно возрастает, а области свечения более не локализованы у острий и наблюдаются во всем объеме разрядной зоны (рис. 3). На осциллограммах появляются характерные для пробоя газовых пузырьков всплески напряжения вблизи максимумов (рис. 4). Действующее значение напряжения возрастает, что объясняется снижением эффективного значения электропроводности раствора с пузырьками, т. к. сопоставимая часть объема занята неэлектропроводной газовой фазой. Энергия в рабочей зоне выделяется как в виде нагрева токами проводимости раствора, так и в плазменной области, внутри которой она расходуется, в том числе, на образование химически активных радикалов (радикалы гидроксильной группы, озон, атомарный кислород и др.) и излучение. Взаимодействие плазмы с обрабатываемым раствором происходит на границе контакта «плазма-жидкость», в парах раствора внутри переходной области от плазмы в жидкость, а также посредством ультрафиолетового излучения, проникающего в объем обрабатываемой жидкости.

3. В режиме циклической обработки раствора с пузырьками была достигнута остаточная концентрация изопропилового спирта 4 % после трёх циклов. Процесс обработки практически не отличается по своим характеристикам от однократной обработки с пузырьками. Незначительно снижается видимая яркость свечения. Это может быть связано со снижением концентрации спирта в растворе, что замедляет механизм развития пробоя.

Проведенные эксперименты показали, что удаление изопропилового спирта из водного раствора проходит более эффективно в присутствии воздушных пузырьков в разрядной зоне. Инициация пробоя в такой газожидкостной системе может происходить как в газовой, так и в жидкой фазе. Место инициации определяется не только величиной приложенного напряжения, но и расположением газовых включений в конкретный момент времени. В отсутствие пузырьков на поверхности электродов развитие разряда происходит по тепловому механизму [9, 14, 15]. К образованию плазменного канала приводит тепловая неустойчивость, развивающаяся в парогазовой области, которая возникает у поверхности благодаря протеканию значительных токов проводимости. Пузырьки, расположенные на поверхности электродов, могут выступать в качестве центров ионизации [15]. Пузырьки, расположенные в объеме жидкости, также участвуют в развитии пробоя: разрядный канал развивается, в том числе, через близлежащие пузырьки, ионизируя их. Таким образом, газовые пузырьки повышают вероятность образования плазменного канала, что приводит к увеличению как объема плазмы, так и площади её контакта с жидкостью. Это в совокупности повышает наработку химически активных радикалов, по сравнению с обычным раствором.

## Заключение

Предложенная конструкция из игольчатых высоковольтных электродов позволила получить объемный разряд в рабочем объеме. Эффективность очистки воды без воздушных пузырьков относительно низка, массовая концентрация изопропилового спирта уменьши-

лась всего на 1 % при начальной концентрации 20 %. При создании воздушных пузырьков в рабочей зоне разрядной ячейки эффективность очистки повышается на 6 % по сравнению с обработкой без пузырьков, т. е. удаляется 7 % при исходной массовой концентрации 20 % изопропилового спирта в воде. Следовательно, эффективность очистки возросла существенно – в 7 раз. Дальнейшее увеличение степени очистки возможно путем увеличения среднего тока разряда и энергозатрат разряда, уменьшения размеров пузырьков и увеличения их объемной концентрации.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-01091.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каратаев О. Р., Шамсутдинова З. Р., Хафизов И. И. // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. № 22. С. 21.
2. Инженерно-экологический справочник Т. 2. – Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой. 2003.

3. Kulagin V. A., Ivchenko O. A., Kulagina L. V. // J. Sib. Fed. Univ. Eng. Technol. 2017. Vol. 10. № 1. P. 24.
4. Shemer H., Sagiv A., Hohenberg M., Maor A. Z. // Desalination. 2018. Vol. 431. P. 80.
5. Akiyama H., Sakugawa T., Namihira T., Takaki K., Minamitani Y., Shimomura N. // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2007. Vol. 14. № 5. P. 1051.
6. Huang Y., Yan H., Wang B., Zhang X., Liu Z., Yan K. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2014. Vol. 47. № 25. P. 255204.
7. Locke B., Sato M., Sunka P., Hoffmann M. R., Chang J. S. // Indust. Eng. Chem. Res. 2006. Vol. 45. P. 882.
8. Ham H.-C., Yoh J. J. // Appl. Phys. Lett. 2021. Vol. 118. P. 1039056.
9. Panov V. A., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Pecherkin V. Ya., Son E. E. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. Vol. 49. P. 385202.
10. Яворовский Н. А., Корнев Я. И., Преис С. В., Пельцман С. С., Хаскельбер М. Б. // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 809. № 2. С. 108.
11. Яворовский Н. А., Соколов В. Д., Сколубович Ю. Л., Лу И. С. // Водоснабжение и санитарная техника. 2000. № 1. С. 12.
12. Flannigan D. J., Suslick K. S. // Nature. 2005. Vol. 434. P. 52.
13. Huang Y., Zhang L., Yan H., Zhu X., Liu Z., Yan K. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2015. Vol. 43. № 9. P. 3256.
14. Панов В. А., Печеркин В. Я., Василяк Л. М., Ветчинин С. П. // Прикладная физика. 2020. № 6. С. 5.
15. Panov V. A., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Pecherkin V. Ya., Son E. E. // Plasma Sources Sci. Technol. 2019. Vol. 28. P. 085019.

PACS: 52.80.–s

## Removal of isopropyl alcohol by electrical discharge from an aqueous solution with microbubbles

*V. A. Panov, V. Ya. Pecherkin, L. M. Vasilyak, Yu. M. Kulikov, S. P. Vetchinin, and A. S. Saveliev*

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences  
Bd. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia  
E-mail: panovvladislav@gmail.com, vasilyak@ihed.ras.ru

*Received September 30, 2021*

*The removal of isopropyl alcohol impurities with an initial volume concentration of 20 % in a cell with a working area volume of  $8 \times 3 \times 1 \text{ cm}^3$  in a water flow with fine air bubbles with a solution flow rate of  $2 \text{ m}^3/\text{h}$  by a quasi-volume electric discharge obtained using a multi-electrode system of sectioned needle electrodes has been experimentally investigated. At an alternating voltage of an industrial frequency of 50 Hz, the creation of a finely dispersed phase with air bubbles in an electric discharge cell increases the efficiency of isopropyl alcohol removal from the water flow by 6 %.*

*Keywords:* electric discharge, sectioned needle electrode, air microbubbles, isopropyl alcohol aqueous solution, removal of impurities, water.

**DOI:** 10.51368/1996-0948-2021-5-32-37

## REFERENCES

1. O. R. Karataev, Z. R. Shamsutdinova, and I. I. Hafizov, *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* **18**, 21 (2015) [in Russian].
2. *Engineering-Ecological Handbook, Vol. 2* (Kaluga: Izd-vo N. Bochkarevoj, 2003) [in Russian].
3. V. A. Kulagin, O. A. Ivchenko, and L. V. Kulagina, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. Technol.* **10**, 24 (2017).
4. H. Shemer, A. Sagiv, M. Hohenberg, and A. Z. Maor, *Desalination* **431**, 80 (2018).
5. H. Akiyama, T. Sakugawa, T. Namihira, K. Takaki, Y. Minamitani, and N. Shimomura, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **14**, 1051 (2007).
6. Y. Huang, H. Yan, B. Wang, X. Zhang, Z. Liu, and K. Yan, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **47**, 255204 (2014).
7. B. Locke, M. Sato, P. Sunka, M. R. Hoffmann, and J. S. Chang, *Indust. Eng. Chem. Res.* **45**, 882 (2006).
8. H.-C. Ham and J. J. Yoh, *Appl. Phys. Lett.* **118**, 1039056 (2021).
9. V. A. Panov, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, V. Ya. Pecherkin, and E. E. Son, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49**, 385202 (2016).
10. N. A. Yavorovskij, Ya. I. Kornev, S. V. Prejs, S. S. Pel'cman, and M. B. Haskel'ber, *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University* **809**, 108 (2006) [in Russian].
11. N. A. Yavorovskij, V. D. Sokolov, Yu. L. Skolubovich, and I. S. Li, *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* **1**, 12 (2000) [in Russian].
12. D. J. Flannigan and K. S. Suslick, *Nature* **434**, 52 (2005).
13. Y. Huang, L. Zhang, H. Yan, X. Zhu, Z. Liu, and K. Yan, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **43**, 3256 (2015).
14. V. A. Panov, V. Ya. Pecherkin, L. M. Vasilyak, and S. P. Vetchinin, *Applied Physics*, No. 6, 5 (2020) [in Russian].
15. V. A. Panov, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, V. Ya. Pecherkin, and E. E. Son, *Plasma Sources Sci. Technol.* **28**, 085019 (2019).