

## К вопросу о разработке установки, совмещающей процесс озонирования с сорбционной доочисткой окисленных сточных вод

*Н.П. Букалова, Г.Э Букалов.*

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

**Аннотация:** В статье рассматриваются результаты разработки установки, позволяющей обеспечить процесс очистки многокомпонентных сточных вод, содержащих органические примеси фенольного ряда на основе комбинированного метода в одном аппарате, последовательно совмещающего процесс озонирования с сорбционной доочисткой окисленных сточных вод, обеспечивающего непрерывность процесса и позволяющего повторное использование остаточного озона, что в значительной степени увеличивает степень очистки сточных вод и исключает необходимость деструкции озона. Достижимая при этом степень очистки, позволяет направлять очищенные сточные воды в оборотное водоснабжение.

**Ключевые слова:** многокомпонентные сточные воды, очистка сточных вод от органических соединений фенольного ряда, озонирование, сорбция, адсорбция, окислительно-сорбционная колонна.

В настоящее время сточные воды лакокрасочных, кабельных, коксохимических предприятий являются мощным источником загрязнения водных объектов.

Изучение результатов исследования [1, 2] позволяет сделать вывод о том, что исследование процесса очистки многокомпонентных сточных вод на основе комбинированного метода в одном аппарате, обеспечивающим непрерывность процесса, весьма актуально, так как имеет ряд существенных достоинств по сравнению с традиционными методами очистки многокомпонентных сточных вод [3, 4], а опыт его применения практически отсутствует. Новизна поставленной задачи и недостаточность имеющихся сведений о комбинированном процессе определили характер и объем экспериментальных исследований. Возникла необходимость разработки аппарата, обеспечивающего процесс очистки сточных вод, содержащих смеси органических соединений фенольного ряда, последовательно

---

совмещающего процесс озонирования с сорбционной доочисткой окисленных сточных вод, обеспечивающего непрерывность проведения процесса. Достижимая при этом степень очистки позволяет направлять очищенные сточные воды в оборотное водоснабжение.

Известно, что наиболее полное растворение газообразного озона в сточной воде является одной из основных задач техники озонирования, так как только в растворенной форме озон способен воздействовать на загрязнения [5, 6].

Наилучшие условия, обеспечивающие максимальное развитие поверхностей контакта фаз, участвующих в реакции, обеспечиваются применением диспергирующих устройств, с пористыми материалами и прямоточным подводом сточной воды и озоносодержащего газа, что следует из общего уравнения массопередачи, которое показывает, что количество адсорбированного газа прямо пропорционально поверхности и продолжительности контакта фаз [7].

Анализ литературы по адсорбции растворенных органических соединений углеродными сорбентами [8, 9] показал, что наибольшее распространение для очистки сточных вод от растворенных органических соединений получили аппараты с неподвижным слоем сорбента, работающие по принципу фильтра.

Однако, фильтр-аппарат периодического действия, недостатком которого является снижение степени очистки сточной воды по мере срабатывания сорбента, требует необходимость периодической остановки и разборки фильтра для регенерации насадки.

Наиболее оптимально адсорбция растворимых органических соединений при непрерывном проведении процесса происходит в аппаратах с так называемым «кипящим» слоем сорбента, когда псевдооживление осуществляется восходящим потоком сточной жидкости с одновременным

---

подводом газо-воздушной смеси, то есть при наличии трехфазного псевдооживленного слоя [10, 11]. Взаимодействие фаз, участвующих в реакции, в данных аппаратах происходит очень интенсивно и характеризуется большой скоростью обновления поверхности раздела фаз. Кроме адсорбционной функции [12], сорбент в таких аппаратах выполняет роль насадки, циркулирующей в рабочем объеме, обеспечивает диспергирование жидкости и газа, способствует турбулизации газожидкостной системы и созданию порозности слоя, достаточной для обеспечения большой скорости газа без наступления «захлебывания». Интенсивное движение сорбента способствует равномерному его срабатыванию.

На основании данных исследований была разработана конструкция аппарата для очистки многокомпонентных сточных вод, содержащих органические вещества, на основе комбинированного метода, сочетающего озонирование с сорбционной доочисткой окисленных сточных вод в одном аппарате при непрерывном проведении процесса очистки.

Установка работала в непрерывном режиме. Удельный расход озона на мг окисленного вещества снижался в 10 раз по сравнению с озонированием, традиционно применяемым в отдельности, при этом расход сорбента составлял 8,3г/дм<sup>3</sup>.

За счет повторного использования остаточного озона эффективность работы установки повышалась на 10%, кроме того, это не требовало специальных установок для деструкции озона, что в значительной степени снижало стоимость очистки 1м<sup>3</sup> сточных вод.

Испытания, проведенные на полупромышленной установке, показали, что степень очистки сточных вод, имеющих сложный многокомпонентный состав по органическим соединениям в перерасчете на фенол, составила 99,95-99,98%, по ХПК – 93-95%, что соответствовало требованиям,

---

предъявляемым к сточным водам, направляемым в оборотное водоснабжение.

Контактная реакционная колонна имела пять зон: зону диспергирования, обеспечивающую интенсивное смешение сточной жидкости с озоно – воздушной смесью; центральную зону, где происходил процесс окисления органических соединений озоносодержащим газом; зону разделения, обеспечивающую разделение газожидкостной эмульсии с целью повторного использования остаточного озона; среднюю зону, где в режиме «кипящего слоя», обеспечивающего максимальный массоперенос, осуществлялся процесс сорбционной доочистки окисленных сточных вод; верхнюю зону для повторного разделения очищенной сточной воды с отработанным газом.

Центральная зона представляла собой вертикальный цилиндрический канал и выполняла роль реакционной окислительной зоны, в которой происходил процесс озонирования.

Зона разделения находилась в нижней части цилиндрического канала и служила для разделения системы газ-жидкость. Центральный канал был выполнен с коническим днищем и круглыми отверстиями, расположенными в два ряда. В зоне разделения при прохождении газо-жидкостной эмульсии верхних окон происходила сепарация, то есть отделение пузырьков газа от жидкости и газ выходил в верхние окна, так как его удельный вес значительно меньше удельного веса жидкости, а жидкость, имеющая большую плотность, массу, а соответственно кинетическую энергию, продолжала свое движение по каналу вниз. Выйдя в верхние окна, озоно-воздушная смесь, устремлялась вверх в среднюю зону, а сточная жидкость, потеряв энергию сжатого газа, резко теряла скорость, ударялась о коническое днище и выходила через нижние окна.

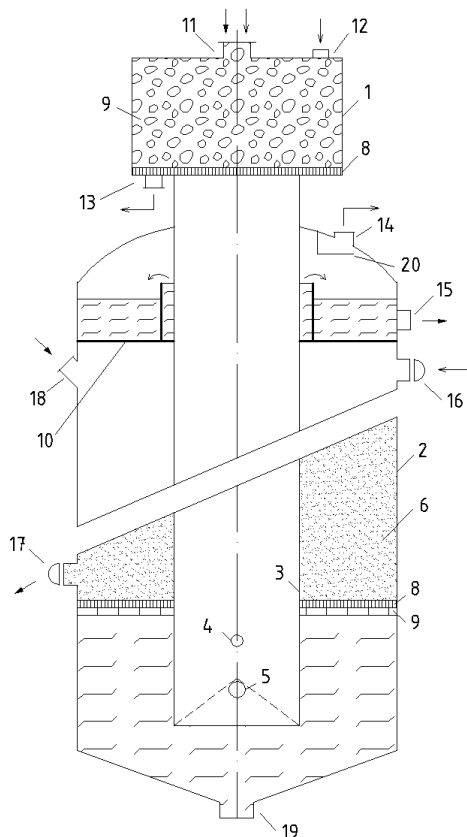


Рис.1. – Окислительно-сорбционная колонна с «кипящим» слоем сорбента:  
1-диспергатор, 2-окислительно-сорбционная колонна, 3-центральный канал,  
4-окна выхода озono-воздушной смеси, 5-окна выхода окисленной сточной  
воды, 6-сорбент, 7-решетка, 8-сетка, 9-пористая гранулированная  
керамическая насадка, 10-глухая тарелка со стаканом, 11-штуцер подачи  
сточной воды и озono-воздушной смеси в диспергатор, 12-штуцер подачи  
пара, 13-штуцер отвода осадка, 14-штуцер отвода воздушной смеси, 15-  
штуцер отвода очищенной воды, 16-люк подачи сорбента, 17-люк выгрузки  
сорбента, 19-штуцер отвода осадка, 20-отбойник.

Окислительно – сорбционная колонна рис.1 работала следующим образом: из диспергатора 1 сточная жидкость, насыщенная озono-воздушной смесью через сетку 8, препятствующую попаданию частиц сорбента 9 в центральную зону, направлялась в центральный окислительный канал 3, где происходил процесс окисления органических соединений озонem. В нижней

части канала происходила сепарация: озono-воздушная смесь и частично очищенная сточная жидкость выходили из канала соответственно через окна 4 и 5, пройдя через решетку 7 и сетку 8 устремлялись вверх на насадку, работающую в «кипящем» слое, роль которой выполнял сорбент, загруженный через люк 16. Псевдооживление сорбента создавалось восходящим потоком озono-воздушной смеси при одновременном поступлении сточной жидкости. Происходило повторное взаимодействие газа с жидкостью, характеризующееся большой скоростью обновления поверхности раздела фаз. Кроме этого, создавалась возможность высокого массообмена сточной жидкости с сорбентом, что позволяло достичь максимальной степени сорбционной доочистки предварительно окисленных сточных вод.

Очищенная сточная жидкость через стакан, выполненный жестко с глухой тарелкой 10, поднималась в верхнюю зону колонны и отводилась через штуцер 15, а остаточная озono-воздушная смесь через штуцер 14. При необходимости замены сорбента, его удаляли через люк 17. Колонна работала в непрерывном режиме, отключение колонны предусматривалось только для замены сорбента.

Автоматизация установки обеспечивала ее работу в непрерывном режиме; при изменении концентрации органических соединений в исходной сточной воде посылался сигнал на управляющее устройство для смены режима работы установки.

Предложена установка, позволяющая сочетать процесс озонирования с сорбционной доочисткой с целью повышения эффективности очистки сточных вод от органических загрязнений фенольного ряда, а также повышения коэффициента использования озона за счет повторного применения остаточного озона в основном аппарате.

## Литература

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. 10 изд. стереотип., доработ. – М.: ООО ТИД «Альянс», 2004. – 753с.
2. Вакуленко В.Ф., Ткачев В.А. Доочистка биологически очищенных сточных вод методами адсорбции и окисления // Химия и технология воды. 2016. №3. С.426-438.
3. Федотов А.А., Григорьев В.С., Свитцов А.А. Технология очистки сточных вод с применением адсорбентов // Химия и технология воды. 2018, №5, С.564-572.
4. Гриневич В.И., Гушин А.А., Пластинина Н.А. Деструкция фенола и синтетических поверхностно-активных веществ под действием озона // Известия высших учебных заведений. Сер. «Химия и химическая технология». 2008, № 6, С. 86–90.
5. Константинова М. Л., Разумовский С. Д., Зайков Г. Е. Кинетика и механизм реакции озона с фенолом в щелочной среде. // Известия АН СССР, Серия Химическая, 1991, № 2, С. 320-324.
6. Лунин В.В., Попович М. П., Ткаченко С. Н. Физическая химия озона. М.: Изд-во МГУ, 1998. 480 с.
7. Разумовский С. Д., Зайков Г. Е. Озон и его реакции с органическими соединениями. М.: Наука, 1974, С. 13-19.
8. Vilve M., Тбгопеп Т., Мика Sillanpaa M. Ozonation for the Degradation of Organic Compounds from Nuclear Laundry Water // Ozone Set Eng., 2008, V. 30, № 4, pp. 256-262.
9. Vanhulle E. et al. Decolorization, Cytotoxicity, and Genotoxicity Reduction During a Combined Ozonation/Fungal Treatment of Dye-Contaminated Wastewater // Environ. Sci. Tech., 2008, V. 42, № 2, pp. 584-589.

10. Wang L. K., Yuan P.-C., Hung Y.-T. Halogenation and disinfection. Physicochemical Treatment Processes, Humana Press., pp. 271-314.

11. Лаптев А.Г., Бородай Е.Н. Математическая модель адсорбции при очистке сточных вод ТЭС от нефтепродуктов // Инженерный вестник Дона, 2010, №4/ URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2010/261](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2010/261).

12. Кудрявцев П.Г., Кудрявцев Н.П. Очистка сточных вод с использованием матрично-изолированных нанокпозиционных флокулянтов-коагулянтов // Инженерный вестник Дона, 2018, №3/ URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_266\\_Kudryavtsev.pdf\\_7bdc6f7bfc.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_266_Kudryavtsev.pdf_7bdc6f7bfc.pdf)

### References

1. Kasatkin A.G. Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii. [Basic processes and apparatuses of chemical technology]. Moscow, 2004, 753p.

2. Vakulenko V.F., Tkachev V.A. Khimiya i tekhnologiya vody. 2016. №3. pp. 426-438.

3. Fedotov A.A., Grigor'ev V.S., Svittsov A.A. Khimiya i tekhnologiya vody. 2018. №5. pp. 564-572.

4. Grinevich V.I., Gushchin A.A., Plastinina N.A. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Ser. «Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya». 2008. №6. pp. 86–90.

5. Konstantinova M. L., Razumovskiy S. D., Zaykov G. E. Izvestiya AN SSSR, Seriya Khimicheskaya. 1991. №2. pp. 320-324.

6. Lunin V.V., Popovich M. P., Tkachenko S. N. Fizicheskaya khimiya ozona [Ozone Physical Chemistry]. Moscow, 1998, 480 p.

7. Razumovskiy S. D., Zaikov G. E. Ozon i ego reaktsii s organicheskimi soedineniyami [Ozone and its reactions with organic compounds]. Moscow, 1994, pp. 13-19.

8. Vilve M, Тбгопеп Т, Мика Sillanpaa M. Ozone Set Eng., 2008, V. 30, № 4, pp. 256-262.





9. Vanhulle E. et al. Decolorization, Cytotoxicity, and Genotoxicity Reduction During a Combined Ozonation/Fungal Treatment of Dye-Contaminated Wastewater II Environ. Sci. Tech., 2008, V. 42, № 2, pp. 584-589.

10. Wang L. K., Yuan P.-C., Hung Y.-T. Halogenation and disinfection. Physicochemical Treatment Processes, Humana Press. 2005. pp. 271-314.

11. Laptev A.G., Boroday E.N. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2010, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2010/261](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2010/261).

12. Kudryavtsev P.G., Kudryavtsev N.P. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №3. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_266\\_Kudryavtsev.pdf\\_7bdc6f7bfc.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_266_Kudryavtsev.pdf_7bdc6f7bfc.pdf)