

Растворимость озона в воде по высоте столба жидкости

Бессонова Ю.Н.¹, Романовский В.И.²

Центральный научно-исследовательский институт комплексного
использования водных ресурсов¹

Белорусский национальный технический университет²

Минск, Беларусь

Обеззараживание воды применяется для устранения из нее болезнетворных и иных микроорганизмов и вирусов, из-за наличия которых вода становится непригодной для питья, хозяйственных нужд или промышленных целей. При этом одним из видов обеззараживания является дезинфекция инженерных сетей и сооружений, которая представляет собой комплекс мероприятий, направленных на уничтожение возбудителей инфекционных заболеваний и разрушение токсинов на объектах внешней среды.

В Республике Беларусь наибольшее распространение получили методы обеззараживания с применением сильных окислителей, таких как хлор, хлорная известь, гипохлорит натрия и кальция, озон, перманганат калия. Также достаточно широкое применение на практике находит физический метод: УФ-обеззараживание воды. Кратко проведем сравнение применяемых дезинфектантов.

Озон более сильный окислитель, чем хлор содержащие дезинфектанты, и, таким образом, эффективнее при обеззараживании воды. В отсутствие бромидов в воде, при дезинфекции не образуются побочных продуктов [1]. В то же время озон более токсичное и коррозионно-активное вещество, но при этом для обеззараживания требуется в десятки раз меньшее время воздействия.

Зарубежный опыт применения методов обеззараживания воды показывает увеличение станций водоподготовки с применением озонирования в качестве одной из ступеней очистки воды.

Так на территории Европы и США действуют более 1200 водопроводных станций [2], применяющих озонирование как составляющую ступень в технологическом процессе очистки воды. Применение технологии озонирования воды за рубежом можно также выразить удельным показателем, характеризующим количество водопроводных станций, на которых применяется

озонирование, на душу населения. Так данный показатель варьируется в достаточно широких пределах: от 0,39 и 0,64 в Японии и США соответственно до 13,8 в Швейцарии.

Низкое значение данного показателя в Японии и США говорит о малом применении озонирования в этих странах и преимущественном использовании хлорирования на станциях водоподготовки [3].

Применение озона в водоподготовке осложнено кроме выше перечисленных недостатков также относительно низкой растворимостью в воде в сравнении с хлорсодержащими веществами. Для увеличения растворимости необходимо применять специальные устройства, увеличивающие время контакта, площадь поверхности контакта, или обеспечивающие интенсивное перемешивание озона с водой.

Как правило, озono-воздушная смесь диспергируется и подается вводу в виде мелких пузырьков. Мелкие размеры пузырьков (0,1–1 мм) способствуют увеличению поверхности контакта озона с обрабатываемой водой, что повышает скорость растворения озона.

Изучение растворимости озона в различных растворах приводится во многих исследованиях.

В водном растворе озон разлагается тем быстрее, чем выше температура раствора, рН и концентрация веществ, подлежащих окислению. Механизм реакции разложения озона довольно сложен, поскольку на скорость деструкции влияет множество факторов: условия перехода озона из газовой фазы в жидкость, соотношение между парциальным давлением газа и его растворимостью в водном растворе, кинетика окисления озонотом находящимися в воде загрязнений и другие.

Таким образом, растворимость озона в воде зависит от температуры, активной реакции среды и ее солевого состава. При понижении температуры и повышении рН растворимость озона возрастает, при этом основные соли снижают его растворимость, а нейтральные повышают [4].

Необходимо отметить, что растворение озона в воде при различных значениях рН приводится во многих исследованиях [5–9], однако результаты кинетики распада озона достаточно сильно отличаются за счет различных условий проведения экспериментов. Так установлено [10], что применяемые буферизирующие добавки

(фосфаты, борная кислота и др.) не индифферентны по отношению к озону и продуктам его распада. Они также могут взаимодействовать с гидроксильными радикалами, образующимися в процессе разложения озона в воде. В работе [11] приведен механизм цепной реакции взаимодействия озона с примесями, находящимися в воде. Что касается растворения озона в достаточно кислых средах, то исследования по данной теме свидетельствуют об увеличении реакционной способности озона [12]. Механизм взаимодействия озона с органическими соединениями в присутствии сверхкислот объясняется в предположении образования протонированного озона – интермедиата, обладающего очень сильными электрофильными свойствами [13–14]. Известно, что молекула O_3 в водных растворах реагирует с протонированными формами соединений намного медленнее, чем с депротонированными [15]. Поэтому специфический кислотный катализ реакций с участием озона объясняется в предположении образования именно протонированного озона, который обладает повышенной реакционной способностью по сравнению с обычным озоном [13].

Для определения закономерностей растворения озона по высоте столба жидкости были проведены исследования, в которых использовались два озонатора: каскадный турбоозонатор ВГО с высокочастотным резонансным электроионизационным генератором озона и типовой озонатор фирмы Finnegan-Reztek. В обоих экспериментах использовалась водопроводная вода с температурой 15 °С.

Ниже приведены результаты исследования растворения озона в воде по высоте столба жидкости при использовании турбоозонатора ВГО.

Время насыщения воды озоном дополнительно определялось в зависимости от расхода озона и объема обрабатываемой жидкости. Расход озонсодержащего газа составил 3,3; 6,6; 13,2 л/мин. Объем обрабатываемой воды 0,0157 м³; концентрация озона 2,7 г/м³.

На рисунке 1 представлены данные по насыщению воды озоном при одинаковом расходе его в единицу времени (2,7 г/м³) и различных расходах газовой смеси в течении 10 (рисунок 3.1, а) и 60 минут (рисунок 1, б) обработки.

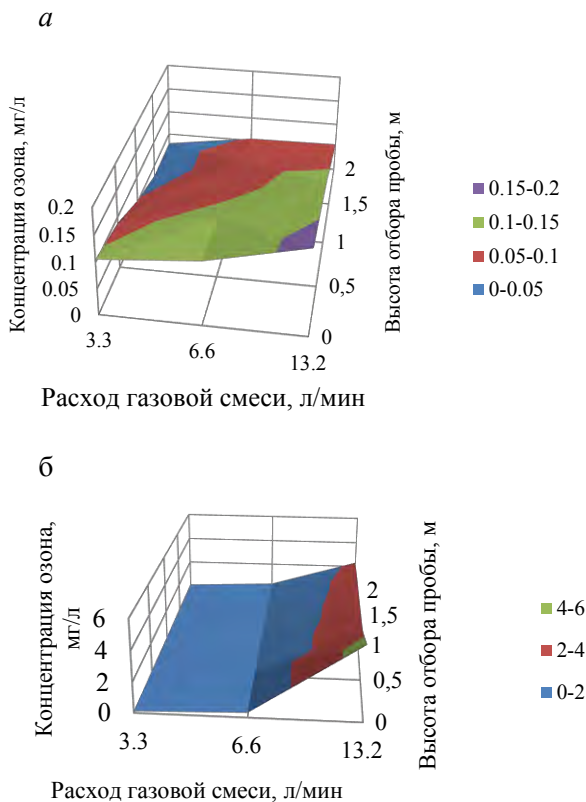


Рис. 1 Концентрация озона в обрабатываемой воде, мг/л, от расхода газовой смеси при концентрации озона $2,7 \text{ г/м}^3$: *a* – времени обработки 10 мин; *б* – времени обработки 60 мин

Из рисунков видно, что максимальное насыщение воды создается при большей концентрации озона в газовой смеси (концентрация озона $2,7 \text{ г/м}^3$, расход газовой смеси $3,3 \text{ л/мин}$) и составляет $4,9 \text{ мг/л}$, что подтверждает известные закономерности.

На рисунке 2 представлены данные по насыщению воды озоном в зависимости от времени обработки.

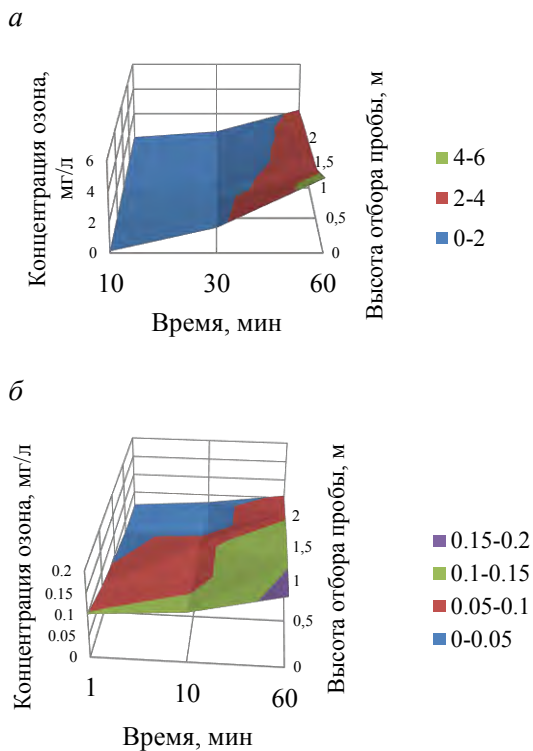


Рис. 2 Концентрация озона в обрабатываемой воде, мг/л, от времени обработки при концентрации озона $2,7 \text{ г/м}^3$: *a* – расход газовой смеси – $3,3 \text{ л/мин}$; *б* – расход газовой смеси – $13,3 \text{ л/мин}$

Далее представлены результаты исследования по растворимости озона в воде с использованием озонатора фирмы Finnegan-Reztek. Исследования проводили со статическим слоем воды и с постоянным расходом.

Результаты исследования растворимости озона со статическим слоем воды представлены ниже. Условия проведения эксперимента: расход озонсодержащего газа 700 л/час . Объем обрабатываемой воды $0,2826 \text{ м}^3$.

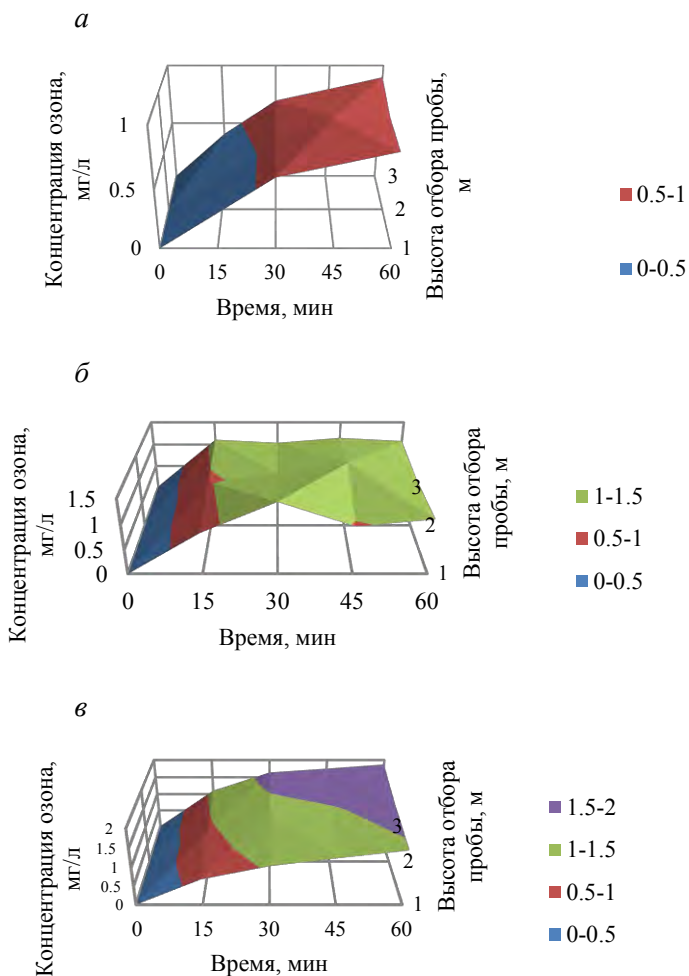


Рис. 4 Концентрация растворенного озона в мг/л в статическом слое воды по высоте столба жидкости при различной исходной концентрации его в газовой смеси: *a* – концентрация озона в газовой смеси 35 г/м^3 ; *б* – концентрация озона в газовой смеси 45 г/м^3 ; *в* – концентрация озона в газовой смеси 55 г/м^3

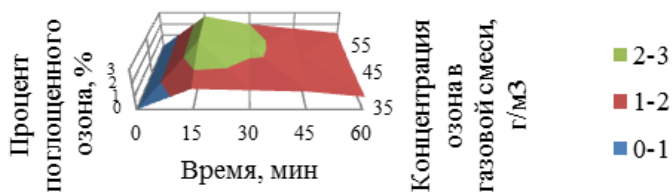


Рис. 5 Поглощение озона в воде в % при различной исходной концентрации его в газовой смеси

Результаты исследования растворимости озона с постоянным расходом воды 12 л/мин представлены ниже.

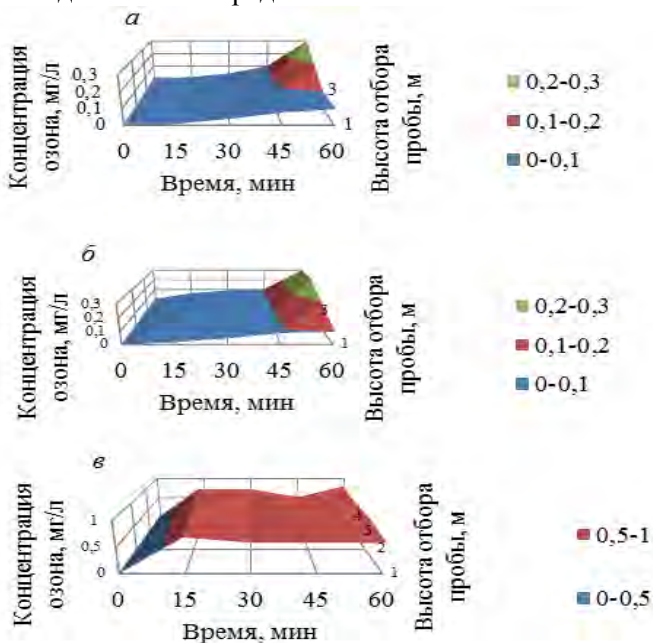


Рис. 6 Концентрация растворенного озона в мг/л в воде при постоянном расходе 12 л/мин по высоте столба жидкости при различной исходной концентрации его в газовой смеси: а – концентрация озона в газовой смеси 15 г/м³; б – концентрация озона в газовой смеси 20 г/м³; в – концентрация озона в газовой смеси 35 г/м³

Ниже на рисунке 7 представлены данные по деструкции озона от времени.

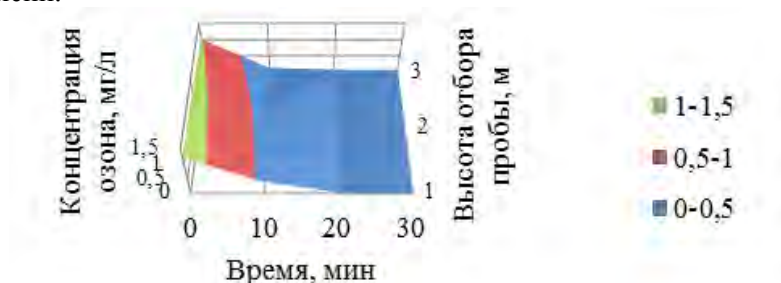


Рис. 7 Деструкция растворенного озона в воде по высоте столба жидкости

Низкий процент поглощения озона в экспериментальных условиях можно объяснить рядом причин, например недостаточной поверхностью массопередачи, создаваемой диспергатором или низким давлением газовой смеси. Основываясь на графиках насыщения озоном воды, а также динамики его разложения можно отметить, что время обработки водозаборной скважины должно составлять до 30 минут. Тем не менее, в каждом конкретном случае время обработки будет зависеть от характеристик скважины, уровня загрязнения, параметров используемого генератора озона.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Battino R. Oxygen and Ozone / Battino R. // IUPAC Solubility Data Series. – 1981. – Vol. 7. – P. 40–55.

2 Sonntag Clemens Chemistry of Ozone in Water and Wastewater Treatment: From Basic Principles to Application / Sonntag Clemens, Urs von Gunten. – London: IWA Publishing, 2012. – P. 287

3 Sedlak David L. The Chlorine Dilemma / Sedlak David L., Urs von Gunten // Science : the Int. J. – 2011. – Vol. 331, № 6013. – P. 42–43.

4 Disinfection Profiling and Benchmarking Guidance Manual EPA 815-R-99-013. – Published 08.1999. – USA: United States Environmental Protection Agency, 1999. – P. 28

5 Gurol M. D. Kinetic of. Ozone Decomposition: a Dynamic Approach / Gurol M. D. , Singer P. C. // Environ. Sci. and Technol. – 1982. – Vol. 16, № 7. – P. 377 – 383.

6 Б.Г. Ершов Кинетические закономерности разложения озона в воде / Б.Г. Ершов и [др.] // Химия и технология воды – 2009. – Т. 31, № 6. – 665–676 с.

7 Staehell J. Decomposition of Ozone in Water in the Presence of Organic Solutes Acting as Promoters and Inhibitors of Radical Chain Reactions / Staehell J., Hoigne J. // Environ. Sci. Technol. – 1985. – Vol. 19. – P. 1206–1213.

8 Леванов А. В. Растворимость и кинетика гибели озона в водных растворах фосфорной и соляной кислоты / Леванов А. В. и [др.] // Вест. Моск. Университета. Серия 2 Химия. – 2002. – Т.3 – №5. – 286–287 с.

9 Olah G.A. Oxyfunctionalization of hydrocarbons. 3. Superacid catalyzed oxygenation of alkanes with ozone involving protonated ozone, O_3H^+ / G.A. Olah, N. Yoneda, D.G. Parker // J. Am. Chem. Soc. – 1976. – Vol. 98. – P. 5261–5268.

10 Yoneda N. Oxyfunctionalization of Hydrocarbons, 7^{1a} Oxygenation of 2,2-Dimethylpropane and 2,2,3,3-Tetramethylbutane with Ozone or Hydrogen Peroxide in Superacid Media / Yoneda N., Olah G.A. // J.Am.Chem.Soc. – 1977. – Vol. 99. – P. 3113–3119.

11 Yoneda N. Superacid catalyzed oxygenation of aliphatic ethers with ozone / Yoneda N. [et al.] // Chem. Lett. – 1984. – Vol. 9. – P. 1617–1618.

12 Jacquesy, J.-C. Functionalisation of nonactivated bonds in superacidic media / J.-C. Jacquesy, M.-P. Jouannetaud, A. Martin // Bull. Soc. Chim. Fr. – 1997. – Vol. 134. – P. 425–438.

13 Hoigné J. Rate constants of reactions of ozone with organic and inorganic compounds in water. II: dissociating organic compounds / Hoigne J., Bader H. // Water Research. – 1983. – Vol. 17. – P. 185–194.

14 Разумовский, С.Д. Озон и его реакции с органическими соединениями (кинетика и механизм) / С.Д. Разумовский, Г.Е. Заиков. М.: Наука, 1974. – 322 с.

15 Hoffman S. The urban ozone monitoring by the DOAS technique application / S. Hoffman, W. Sulkowski, K. Krzyzanowski // Molecule Structure – 1995 – Vol. 348, – P. 187–190.