

μ УДК 628.162

**В. И. Романовский<sup>1</sup>, В. В. Лихавицкий<sup>1</sup>, А. Д. Гуринович<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСТВОРИМОСТИ ОЗОНА В ВОДЕ  
ПО ВЫСОТЕ СТОЛБА ЖИДКОСТИ**

В статье представлены закономерности растворения озона в воде по высоте столба жидкости от параметров обработки. Данные исследования являются необходимыми для разработки новых технологий дезинфекции водозаборных скважин и сооружений водоснабжения с использованием озона. Представленные в литературе сведения по растворимости озона в воде не позволяют использовать их для этих целей.

Исследования проводили на двух экспериментальных установках для получения следующих параметров: время обработки, расход газовой смеси, концентрация озона в газовой смеси, высота слоя жидкости.

Результаты исследований для каждой из установок представлены в виде зависимостей концентрации остаточного озона в воде от выбранных параметров обработки и отображены графически. Описано влияние каждого из изменяемого параметра на остаточную концентрацию озона в воде, а также приведены факторы, влияющие на увеличение концентрации растворенного озона в воде по высоте на первых 3 м.

Получены математические модели, позволяющие описать зависимость концентрации озона в воде от заданных параметров: высоты от точки ввода газовой смеси, концентрации озона в газовой смеси, времени обработки, расхода газовой смеси. Проведена проверка значимости полученных уравнений регрессии.

**Ключевые слова:** дезинфекция, обеззараживание, водоснабжение, сооружения, озон, растворимость.

**V. I. Ramanouski<sup>1</sup>, V. V. Likhavitski<sup>1</sup>, A. D. Hurynovich<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Belarusian State Technological University<sup>2</sup>Belarusian National Technical University**INVESTIGATION OF OZONE SOLUBILITY IN WATER  
IN HEIGHT OF THE LIQUID**

The paper presents the dissolution patterns of ozone in the water column height from processing parameters. These studies are necessary to develop new technologies of disinfection of water wells and water supply using ozone. Generally known data of the solubility of ozone in water does not allow to use them for this purpose.

The investigations have been carried out on two experimental apparatuses. The following parameters as time processing, flow of the gas mixture, the concentration of ozone in the gas mixture, the height of the liquid layer have been studied.

Research results for each apparatus are presented in the graphical form of dependences of the concentrations of residual ozone in water from the selected processing parameters. The influence of each variable parameter on residual ozone concentration in the water has been described, and the factors that affect the increase of the concentration of ozone dissolved in water at the height of the first 3 m have also been shown.

Such mathematical models describing the dependence of the concentration of ozone in the water from the set parameters as the height of the insertion point of the gas mixture, the concentration of ozone in the gas mixture, processing time, flow of the gas mixture are presented. The significance of the regression equations has been checked out.

**Key words:** disinfection, water supply, facility, ozone solubility.

**Введение.** В последние годы озон все чаще используется в процессах водоподготовки [1–3]. В первую очередь, это связано со значительным усовершенствованием самих генераторов озона.

В соответствии с рядом нормативных документов [4–6], обеззараживание питьевой воды допускается проводить озоном наряду с хлорированием, ультрафиолетовым облучением, а также другими методами, согласованными

Главным государственным санитарным врачом Республики Беларусь или его заместителями.

Использование озона в водоподготовке является одним из перспективных направлений, например в системах питьевого водоснабжения для обеззараживания воды и дезинфекции трубопроводов [7], а также предложено использование его для дезинфекции водозаборных скважин и сооружений питьевого водоснабжения [8].

Как было отмечено ранее [8], для разработки данных технологий необходимо решить ряд задач, таких как оценка коррозионной устойчивости сталей (материалов обсадных труб скважин, трубопроводов и запорной арматуры) [9], определение эффективности инактивации микроорганизмов, оценка жизненного цикла совместно с анализом стоимости жизненного цикла и как следствие технико-экономическое обоснование использования предлагаемой технологии в сравнении с используемыми в настоящее время хлорсодержащими веществами.

Основным процессом в технологии использования озона в водоподготовке является растворение озона в воде.

Растворение озона в воде описывается законом Генри [10]. Однако в литературе отсутствуют данные по исследованию его растворимости по высоте столба воды, что является основной стадией в рассматриваемых процессах.

В литературе присутствуют данные по растворимости озона в воде в зависимости от температуры по данным Хорватса [11], а также справочнику растворимости В. Б. Когана [12], в котором используется коэффициент Бунзена. Названные источники позволяют прогнозировать теоретическую равновесную концентрацию озона на различных глубинах. Данные закономерности дают прямую линию, которая на определенной высоте будет пересекаться в точке с нулевой концентрацией. Однако на растворение озона в природной воде влияет множество факторов, таких как наличие окисляемых веществ, концентрация озона в газовой смеси, давление, размер пузырьков газа, создаваемых аэратором, и ряд других.

Цель данной работы – определение закономерностей растворимости озона в воде по высоте столба жидкости от параметров обработки.

**Основная часть.** Для определения растворимости озона в воде по высоте столба жидкости были собраны две экспериментальные установки, схема которых предложена на рис. 1.

Установка представляет собой пластиковую трубу: первая имеет диаметр 0,1 м и высоту 2 м, вторая – диаметр 0,3 м и высоту 5 м. В трубе сделаны отверстия для отбора проб с шагом 0,5 м.

Для генерации озона при проведении исследований в первой установке использовался экспериментальный озонатор фирмы ООО «РовалантСпецСервис» [13], а во второй установке – озонатор фирмы Finnegan-Reztek (США). Для определения массового содержания озона в газовой фазе использовали анализатор озона ВМТ 961 фирмы Ozone Systems & Technology International (США). Определение концентрации озона в водопроводной воде проводили по ГОСТ 18301–72 «Вода питьевая. Методы определения содержания остаточного озона» [14]. Чувствительность метода – 0,05 мг О<sub>3</sub>/л.

В ходе эксперимента использовались следующие параметры обработки воды:

– для первой установки концентрация озона в газовой смеси – 2,7 г/м<sup>3</sup>; время обработки – 1; 10; 30; 60 мин; расход газовой смеси – 3,3; 6,6; 13,2 л/ч;

– для второй установки концентрация озона в газовой смеси – 35; 45; 55 г/м<sup>3</sup>; время обработки – 15; 30; 45; 60 мин; расход газовой смеси – 700 л/ч.

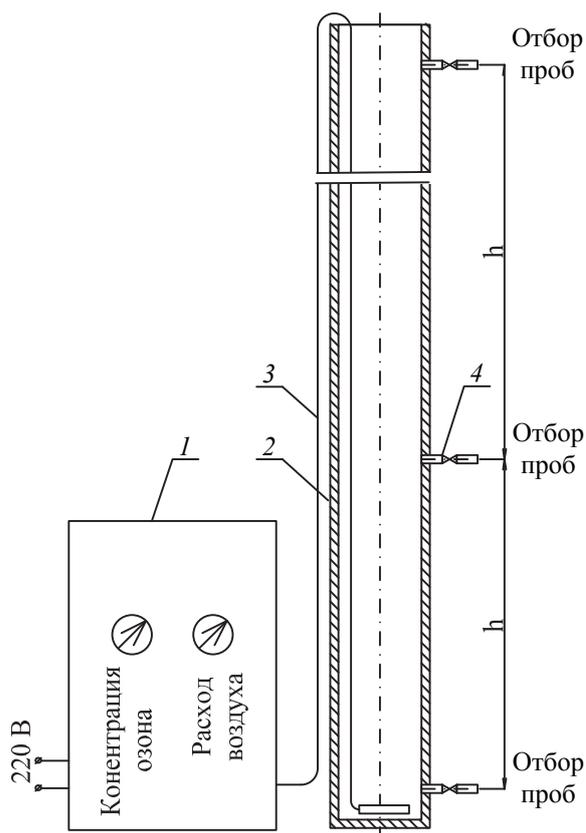


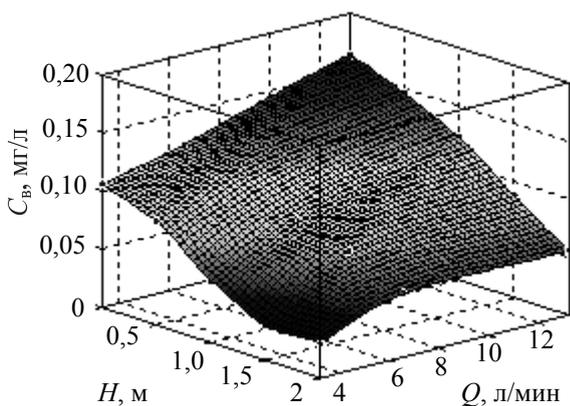
Рис. 1. Схема установки для определения растворимости озона по высоте столба жидкости:

1 – озонатор; 2 – труба; 3 – газоход; 4 – штуцер отбора проб

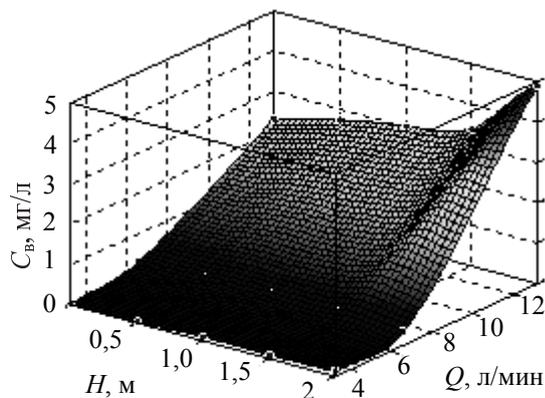
При проведении испытаний на экспериментальном стенде по первому варианту

были получены результаты, предложенные на рис. 2 и 3.

Из данных, представленных на рис. 2, следует, что при времени обработки воды в течение 10 мин увеличение расхода подаваемой газовой смеси более 6,6 л/мин не приводит к значительному увеличению концентрации растворенного озона в воде, однако при времени обработки 60 мин увеличение расхода более 6,6 л/мин приводит к увеличению остаточной концентрации озона в воде. Следует также учесть период полураспада озона, который зависит от ряда параметров [15, 16] и составляет 10–20 мин.



а



б

Рис. 2. Концентрация растворенного озона в воде по высоте столба жидкости от расхода газовой смеси:  
а – время обработки 10 мин;  
б – время обработки 60 мин

На рис. 3 представлена концентрация растворенного озона в воде по высоте столба жидкости от времени обработки.

Из приведенных выше закономерностей видно, что увеличение расхода газа приводит к увеличению поглощению озона вследствие значительного возрастания поверхности массообмена.

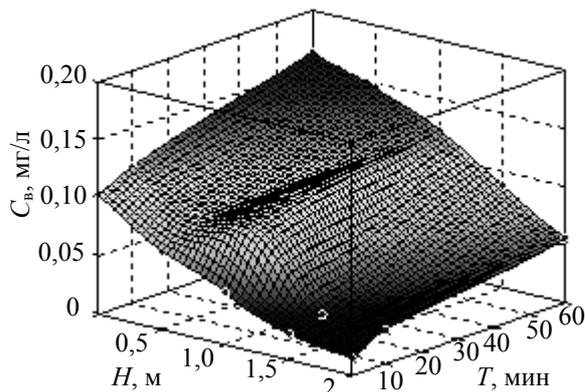
По результатам проведенных экспериментальных исследований было составлено уравнение регрессии. При условии эксперимента модель имеет вид

$$C_{\text{в}} = -1,26425 + 0,07103 \cdot C_{\text{г}} - 0,29158 \cdot H - 0,01035 \cdot T + 0,00745 \times \\ \times C_{\text{г}} \cdot H + 0,00059 \cdot C_{\text{г}} \cdot T + 0,00107 \times \\ \times H \cdot T - 0,00084 \cdot C_{\text{г}}^2 + 0,00033 \cdot H^2, \quad (1)$$

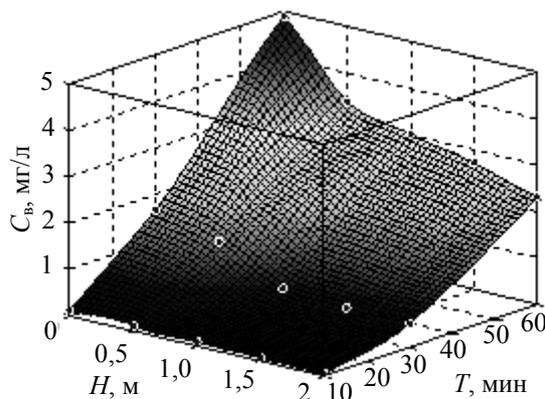
где  $C_{\text{в}}$  – концентрация остаточного озона в воде, мг/л;  $C_{\text{г}}$  – концентрация озона в газовой смеси, г/м<sup>3</sup>;  $H$  – высота, м;  $T$  – время, мин.

Корень квадратный из средней квадратической ошибки равен 0,2753, а значение уточненного  $R$ -квадрат равно 0,7418. Эти показатели свидетельствуют о хорошем приближении исходных данных с параметрической моделью. Коэффициент корреляции модели высокий и составляет 0,8.

Близкие к нулю значения RSME означают хорошее приближение исходных данных с параметрической моделью.



а



б

Рис. 3. Концентрация растворенного озона в воде по высоте столба жидкости от времени обработки:  
а – расход газовой смеси 3,3 л/мин;  
б – расход газовой смеси 13,2 л/мин

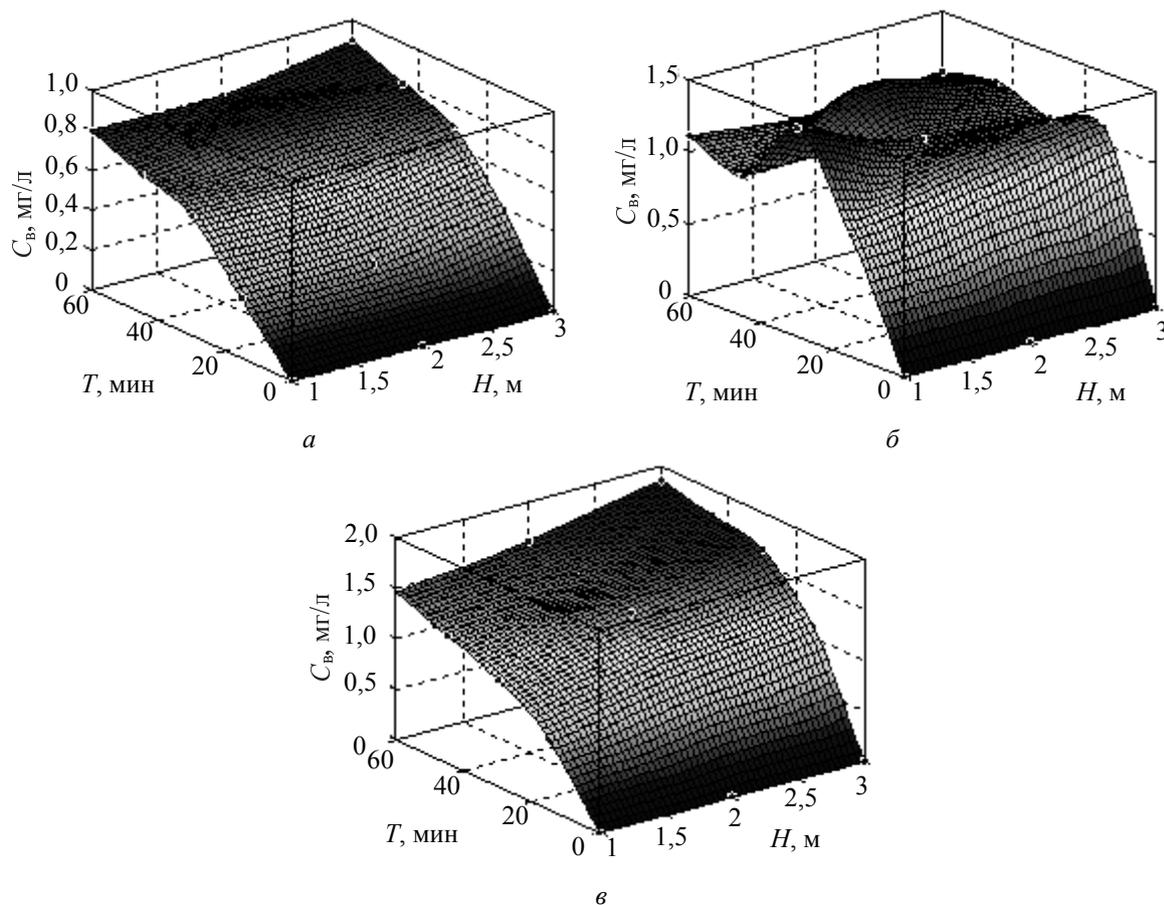


Рис. 4. Концентрация растворенного озона в воде по высоте столба жидкости при различной исходной концентрации его в газовой смеси:  
 а – концентрация озона в газовой смеси 35 г/м<sup>3</sup>; б – концентрация озона в газовой смеси 45 г/м<sup>3</sup>;  
 в – концентрация озона в газовой смеси 55 г/м<sup>3</sup>

При проведении испытаний на экспериментальном стенде по второму варианту были получены результаты, представленные на рис. 4.

По результатам проведенных экспериментальных исследований было составлено уравнение регрессии. При условии эксперимента модель имеет вид

$$C_{\text{в}} = -0,7823 + 0,1474 \cdot Q + 0,2129 \cdot H + 0,0197 \cdot T - 0,0466 \cdot Q \cdot H - 0,0042 \cdot H \cdot T, \quad (2)$$

где  $Q$  – расход газовой смеси, л/мин.

Данная модель является наилучшей, несмотря на высокое значение квадратного корня из средней квадратичной ошибки = 0,7972 и низкое значение уточненного  $R$ -квадрат = 0,4412, которые свидетельствуют о среднем приближении исходных данных с параметрической моделью. Коэффициент корреляции модели также средний и составляет 0,6.

Из полученных данных видно, что при высоте слоя воды до 3 м в большинстве случаев

наблюдается увеличение концентрации растворенного озона в воде по высоте, что не согласуется с теоретическими представлениями о растворимости. Так, в нижнем слое концентрация озона в газовом пузырьке большая, благодаря чему, согласно закону Генри [10], его массоперенос в воду должен быть наибольшим.

При поднятии пузырьков вверх (в связи с массопереносом его в воду) должно происходить снижение концентрации озона в пузырьках, следовательно, должно наблюдаться и снижение растворимости его в воде. Однако, как следует из экспериментальных данных, в большинстве случаев наблюдается увеличение концентрации растворенного озона в воде.

**Заключение.** Результаты работы позволяют сделать ряд выводов.

Показано, что на высоте до 3 м от источника подачи озона в воду происходит увеличение его концентрации. На описанный эффект влияют следующие факторы:

– скорость массопереноса озона из газовой фазы пузырька в жидкую;

– различное распределение пузырьков газа по размеру, следствием чего является неравномерное их всплытие и распределение по высоте;  
– турбулентное перемешивание слоя воды из-за большого количества пузырьков или в случае их большого размера.

Получены математические модели, позволяющие описать зависимость концентрации озона в воде от заданных параметров: высоты от точки ввода газовой смеси, концентрации озона в газовой смеси, времени обработки, расхода газовой смеси.

### Литература

1. Italian Regulation. ACCORDO tra Ministro della Salute, le Regioni e le Province Autonome di Trento e Bolzano, sugli aspetti igienico sanitari concernenti la costruzione, la manutenzione e la vigilanza delle piscine ad uso natatorio. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, del. 3.3.2003, n. 51.
2. Rossi G., Comuzzi C., Barbone F., Goi D. Experimental tests for ozone disinfection treatment in a small backyard swimming-pool. J. waste water treatment analysis 1:105, vol. 1, issue 2, p. 126.
3. Tripathi S., Tripathi D. M., Tripathi B. D. Removal of organic content and color from secondary treated wastewater in reference with toxic potential of ozone during ozonation. Hydrol current, res. 2, p. 111.
4. Санитарно-эпидемиологические требования к системам централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения: СанПиН № 69. Введ. 16.09.2014. Минск: Министерство здравоохранения Республики Беларусь, 2014. 20 с.
5. Водоснабжение питьевое. Общие положения и требования: СНБ 4.01.01-03. Введ. 30.12.2003. Минск: Министерство архитектуры и строительства, 2004. 29 с.
6. Сооружения водоподготовки. Обеззараживание воды. Правила проектирования: ТКП 45-4.01-181-2009. Введ. 29.12.2010. Минск: Госстандарт, 2010. 32 с.
7. Christopher R. Schulz, Stephen R. Lohman. Method and apparatus for ozone disinfection of water supply pipelines. Patent US, no. 20050249631, 2005.
8. Ramanouski V. I., Hurynovich A. D., Chaika Y. N., Wawzhenyuk P. Ozone disinfection of water intake wells and pipelines of drinking water supply systems // Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances. 2013. No. 3. Pp. 51–56.
9. Романовский В. И., Чайка Ю. Н. Коррозионная устойчивость углеродистых сталей к дезинфицирующим растворам // Труды БГТУ. 2014. № 3: Химия и технология неорганич. в-в. С. 47–50.
10. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1973. 754 с.
11. Punmia B. C., Kr. Jain Arun, Jain Ashok. Water Supply Engineering. New Delhi: Laxmi Publication (P) Ltd., 1995. 584 p.
12. Коган В. Б., Фридман В. Н., Кофаров В. В. Справочник по растворимости. М.: Химия, 1961. 961 с.
13. Дмитриев С. М., Кондратьев М. П. Генератор озона: пат. Респ. Беларусь. № 2003040115; заявл. 04.01.03; опубл. 30.06.05. Бюл. № 2. С. 54.
14. Вода питьевая. Методы определения содержания остаточного озона: ГОСТ 18301–72. Введ. 01.01.74. Москва: Госстандарт, 1974. 4 с.
15. Лунин В. В., Попович М. П., Ткаченко С. Н. Физическая химия озона. М.: Изд-во МГУ, 1998. 480 с.
16. Драгинский, В. Л., Алексеева, Л. П., Самойлович В. Г. Озонирование в процессах очистки воды. М.: ДеЛи принт, 2007. 400 с.

### References

1. Italian Regulation. ACCORDO tra Ministro della Salute, le Regioni e le Province Autonome di Trento e Bolzano, sugli aspetti igienico sanitari concernenti la costruzione, la manutenzione e la vigilanza delle piscine ad uso natatorio. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, del. 3.3.2003, n. 51.
2. Rossi G., Comuzzi C., Barbone F., Goi D. Experimental tests for ozone disinfection treatment in a small backyard swimming-pool. J. waste water treatment analysis 1:105, vol. 1, issue 2, p. 126.
3. Tripathi S., Tripathi D. M., Tripathi B. D. removal of organic content and color from secondary treated wastewater in reference with toxic potential of ozone during ozonation. Hydrol current, res. 2, p. 111.
4. SanPiN no. 69. Sanitary requirements for centralized drinking water supply. Minsk, Ministry of Health of the Republic of Belarus Publ., 2014. 20 p. (In Russian).
5. SNB 4.01.01-03. Drinking water supply. General provisions and requirements. Minsk, Ministry of Architecture and Construction Publ., 2004. 29 p. (In Russian).

6. ТКР 45-4.01-181-2009. Water treatment facilities. Disinfection of water. Design rules. Minsk, Gosstandart Publ., 2010. 32 p. (In Russian).
7. Christopher R. Schulz, Stephen R. Lohman. Method and apparatus for ozone disinfection of water supply pipelines. Patent US, no. 20050249631, 2005.
8. Ramanouski V. I., Hurynovich A. D., Chaika Y. N., Wawzhenyuk P. Ozone disinfection of water intake wells and pipelines of drinking water supply systems. Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances, 2013, no. 3, pp. 51–56.
9. Ramanouski V. I., Chaika Y. N. Corrosion resistance of carbon steel to disinfectant solutions. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 3, pp. 47–50 (in Russian).
10. Kasatkin A. G. *Osnovnie protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii* [Basic processes and devices of chemical technology]. Moscow, Chemistry Publ., 1973. 754 p.
11. Punmia B. C., Kr. Jain Arun, Jain Ashok. Water Supply Engineering. New Delhi, Laxmi Publication (P) Ltd., 1995. 584 p.
12. Kogan V. B., Fridman V. N., Kofarov V. V. *Spravochnik po rastvorimosti* [Handbook of solubility]. Moscow, Chemistry Publ., 1961. 961 p.
13. Dmitriev C. M., Kondrat'ev M. P. *Generator ozona* [Ozone generator]. Patent BY, no. 2003040115, 2005.
14. GOST 18301–72. Drinking water. Methods of determination of ozone residual content. Moscow, Gosstandart, 1974. 4 p. (In Russian).
15. Lunin V. V., Popovich M. P., Tkachenko S. N. *Fizicheskaiia khimia ozona* [Physical chemistry of ozone]. Moscow, MSU Publ., 1998. 480 p.
16. Draginski V. L., Alekseeva L. P., Samoilovich V. G. *Ozonirovanie v protsessah ochistki vody* [Ozonation in processes of water purification]. Moscow: DeLi print Publ., 2007. 400 p.

#### Информация об авторах

**Романовский Валентин Иванович** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры промышленной экологии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: V.Romanovski@yandex.ru

**Лихавицкий Виталий Викторович** – ассистент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: likh@tut.by

**Гуринович Анатолий Дмитриевич** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры экономики строительства. Белорусский национальный технический университет (220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, Республика Беларусь). E-mail: Gurik@bk.ru

#### Information about the authors

**Ramanouski Valiantsin Ivanavich** – Ph. D. Engineering, senior lecturer, Department of Industrial Ecology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: V.Romanovski@yandex.ru

**Likhavitski Vitaliy Viktorovich** – assistant, Department of Automation of Production Process and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: likh@tut.by

**Hurynovich Anatoliy Dmitrievich** – D. Sc. Engineering, professor, professor, Department of Construction Economics. Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosty Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Gurik@bk.ru

Поступила 20.02.2015