

СОВМЕСТНОЕ ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ И УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ ПАТОГЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ *Escherichia coli*

© 2024 г. С.Б. Бибиков*, А.И. Сергеев**, И.И. Барашкова**, #, М.В. Мотякин*, **

*Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, ул. Косыгина, 4, Москва, 119334, Россия

**Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН,
ул. Косыгина, 4, Москва, 119991, Россия

#E-mail: irbarashk@rambler.ru

Поступила в редакцию 08.12.2023 г.

После доработки 08.12.2023 г.

Принята к публикации 20.12.2023 г.

Исследовано совместное влияние электролиза и ультразвука на популяцию бактерий *E. coli* в водном растворе сульфата натрия. Определена кинетика инактивации бактерий при применении этих методов для очистки воды. Показано, что совместное действие ультразвуковой и электрохимической обработки водного раствора значительно увеличивает скорость инактивации бактерий. Высказано предположение, что за гибель бактерий ответственны гидроксильные радикалы, образующиеся в процессе комбинированной обработки. Установлена корреляция между скоростью образования гидроксильных радикалов и скоростью инактивации бактерий.

Ключевые слова: обеззараживание воды, электролиз, *Escherichia coli*, спиновая ловушка, ультразвук, гидроксильный радикал.

DOI: 10.31857/S0006302924020136, EDN: OTXLSM

Вода — важнейший ресурс нашей планеты. Вся жизнедеятельность человека связана с водой. С ростом населения земли и промышленности одновременно происходит рост потребления воды, следовательно, происходит и увеличение количества воды, загрязненной отходами человеческой деятельности. Разработка эффективных и безопасных методов очистки сточных вод для их дальнейшего использования, как в промышленности, так и для персональных потребностей человека, является актуальнейшей проблемой современности.

В настоящее время процесс очистки сточных вод, как правило, является многоступенчатым и включает в себя использование механических (отстаивание, фильтрование), физических (коагулирование, сорбция, флотация), химических (окисление, нейтрализация), биологических (аэробный, анаэробный) и других методов [1–3]. Одним из важных этапов очистки является дезинфекция, которая приводит к уничтожению патогенных микроорганизмов. Наиболее опасные патогены присутствуют в сточной воде, загрязненной фекалиями человека и животных. Индика-

тором патогенного загрязнения воды может служить *Escherichia coli* [4]. Бактерия *E. coli* относится к группе термотолерантных колиформных бактерий, которые способны вызвать серьезные кишечные расстройства и даже приводить к летальному исходу. Данные бактерии живут и размножаются в нижнем отделе пищеварительного тракта человека и теплокровных животных. Именно по *E. coli* проводится проверка качества воды с точки зрения микробного загрязнения и эффективности дезинфекции.

Традиционным методом дезинфекции является использование хлора. Хлор применяется в газообразном виде или образуется при электролизе водных растворов хлорида натрия [1–3]. Хлорирование является одним из самых дешевых и в то же время эффективных методов биологической очистки воды. Однако хлор токсичен и его использование при обработке воды приводит к образованию побочных химических веществ, среди которых хлорсодержащие токсины, мутагенные и канцерогенные вещества [5]. Альтернативой хлорированию являются озонирование, ультрафиолетовая иррадиация, электрохимические процессы, использование ультразвука [6–10]. Выбор метода дезинфекции в значительной степени

Сокращения: RNO — N, N-диметил-4-нитрозоанилин.

зависит от затрат энергии, особенно в тех случаях, когда необходимо обработать большое количество воды.

В последние десятилетия для обеззараживания и стерилизации загрязненной воды предложены различные методы с использованием электричества [10–12]. По сравнению с прямым хлорированием электрохимические методы демонстрируют гораздо более сильную дезинфицирующую способность [13, 14]. Например, показано, что гидроксильные радикалы, образующиеся при электрохимическом воздействии, подавляют жизнедеятельность биологических клеток в сточных водах [15], а их окислительные и бактерицидные свойства намного сильнее, чем у соединений хлора и сравнимы с озоном [13, 16].

Обработка ультразвуком также широко используется для инактивации бактерий [17–19]. Физико-химический механизм, с помощью которого ультразвук убивает микроорганизмы, до конца не изучен. Однако общепризнано, что бактерии могут быть инактивированы путем образования, роста и схлопывания микропузырьков в обработанной ультразвуком жидкости, что приводит к механическим воздействиям и сонохимическим реакциям [20–22].

В настоящей работе рассмотрено совместное действие электрохимической и ультразвуковой (20 кГц) обработки для очистки воды, загрязненной *E. coli*, определены особенности такого комбинированного воздействия на популяцию бактерий *E. coli*, выдвинуто предположение о механизме инактивации бактерий.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Образцы и материалы. В экспериментах использовали деионизированную воду, которую получали с помощью Ultra-Pure Water System, Model D8961 (Barnstead/Thermolyne, США). *E. coli* ATCC® 15144™ приобретена на портале ATCC Genome Portal (США). Начальную бактериальную нагрузку *E. coli* в воде, а также бактериальную популяцию в анализируемых образцах определяли с помощью метода Pour Plate Method for Heterotrophic Plate Count. N,N-Диметил-4-нитрозоанилин (RNO) (Sigma-Aldrich, США) использовали в качестве спиновой ловушки.

Методы исследования. В работе использовали установку с замкнутой циркуляцией воды (рис. 1), которая состояла из насоса, расходомера, пластиковой электрохимической ячейки с 10 электродами, изготовленными из сетки нержавеющей стали и установленными параллельно друг другу. Ультразвуковую обработку проводили с помощью установки Bandelin SONOPULS (Германия) с номинальной мощностью 70 Вт, частотой 20 кГц, диаметр ультразвукового излуча-

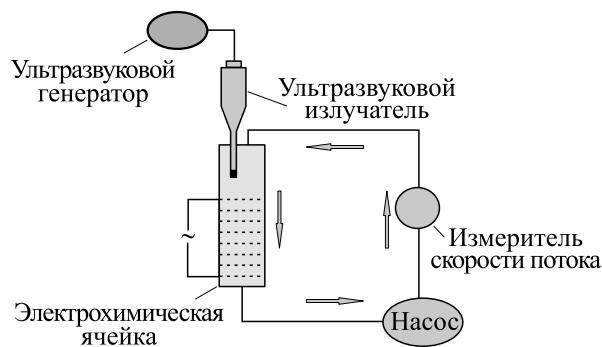


Рис. 1. Устройство для электрохимической и ультразвуковой обработки воды, загрязненной *E. coli*.

теля — 6 мм. Полезную мощность $P_{\text{п}}$, выделяемую в контрольном опыте при облучении раствора воды массой m , определяли по повышению температуры ΔT в термостатических условиях за время Δt :

$$P_{\text{п}} = C \cdot m \cdot \Delta T / \Delta t,$$

где C — теплоемкость воды (4.19 Дж/г°C), $m = 100$ г, $\Delta t = 120$ с. Среднее значение $P_{\text{п}} = 14.1 \pm 0.8$ Вт (4 измерения).

В качестве электролита использовали раствор сульфата натрия (Sigma-Aldrich, США) в воде с концентрацией 0.2%, слабый переменный ток от 0.25 до 0.30 А и начальное напряжение 21 В. Расход воды в системе составлял 0.63 л/с. Перед началом каждого эксперимента лабораторное оборудование дезинфицировали в течение 20 мин струей горячей воды при температуре 80°C. Через открытую крышку электрохимической ячейки отбирали образцы (10 мл) для микробиологического анализа и хранили их при температуре 4°C. Подсчет колоний *E. coli* проводили после 48-часового инкубационного периода при температуре 35°C.

Процесс образования гидроксильных радикалов контролировали по изменению линии спектра поглощения 440 нм при обесцвечивании раствора RNO. Спектры поглощения измеряли с помощью спектрофотометра Cary 60 (Agilent Technologies, США).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненные эксперименты по инактивации бактерий *E. coli* в деионизированной воде показали, что ультразвуковая и электрохимическая обработка, а также их совместное действие являются эффективными методами дезинфекции, приводящими к уменьшению количества колониеобразующих единиц бактерий в воде (рис. 2). Для количественных расчетов использовали кинетическую модель, предложенную в работах [2,

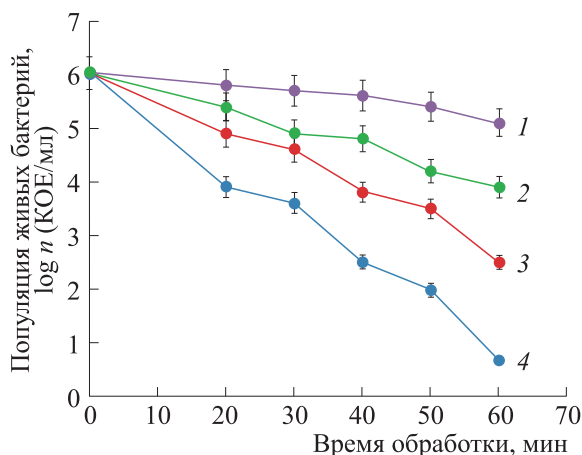


Рис. 2. Влияние времени обработки воды на концентрацию *E. coli* в 0.2%-ном растворе сульфата натрия: кривая 1 — только прокачка, кривая 2 — прокачка с ультразвуковой обработкой, кривая 3 — прокачка с электролизом, кривая 4 — прокачка с электролизом и одновременной ультразвуковой обработкой.

15, 19, 21]. Согласно этой модели, кинетика инактивации бактерий может быть описана уравнением:

$$\frac{dn}{dt} = -k(n)^x, \quad (1)$$

где t — время обработки, n — текущее количество колониеобразующих бактерий (КОЕ/мл), k — константа инактивации бактерий, x — порядок реакции инактивации бактерий.

Зависимость логарифма количества живых бактерий ($\log n$) в воде, содержащей *E. coli*, от времени обработки (t) представлена на рис. 2. Как видно из рисунка, все экспериментальные значения хорошо описываются линейной зависимостью, что указывает на первый порядок реакции инактивации бактерий. Интегрируя уравнение (1), получаем данную линейную зависимость:

$$\log n = \log n_0 - k \cdot t, \quad (2)$$

где n_0 — начальное количество колониеобразующих единиц бактерий (КОЕ/мл).

Отметим, что константа инактивации бактерий (k , с^{-1}) зависит от множества факторов, таких как величина тока при постоянном объеме обрабатываемой воды и постоянной площади поверхности электродов, частота и мощность ультразвуковой обработки. Определение данных зависимостей предполагается сделать в следующей работе.

Зависимости на рис. 2 позволяют рассчитать константу инактивации k и определить важный параметр процесса дезинфекции — минимальное время t_d , необходимое для полного уничтожения бактерий. Расчетная величина времени t_d соответствует точке пересечения экспериментальной линии с осью времени.

В табл. 1 приведены значения параметров k и t_d , рассчитанные для трех экспериментов, проведенных в одной и той же электрохимической ячейке, при одинаковых параметрах электролиза, одинаковой концентрации сульфата натрия и приблизительно одинаковой начальной концентрации бактерий. Первый эксперимент проводили с применением только ультразвуковой обработки; второй — только с применением электролиза и третий — с применением обоих видов обработки одновременно. Установлено, что при комбинированном воздействии электролиза и ультразвука для полной дезинфекции требуется меньше времени, чем в случае, когда применялась только электрохимическая обработка или только ультразвуковая обработка.

Одним из основных вкладов в наблюдаемый дезинфицирующий эффект, инициируемый электролизом и ультразвуком, может являться образование гидроксильных радикалов и их последующая реакция с бактериями [12, 13, 23]. Образующиеся гидроксильные радикалы способны к окислению клеточных стенок, что приводит к разрыву цитоплазматической мембраны и дальнейшему разрушению клетки. Также возможна их диффузия в клетку с последующим окислени-

Таблица 1. Значения констант инактивации бактерий (k) и время, необходимое для полной дезинфекции воды (t_d)

Способ обработки	$\log n_0$, КОЕ/мл	k , мин^{-1}	t_d , мин
Ультразвук	6.03	0.0355	169.8
Электролиз	6.05	0.0617	98.1
Ультразвук и электролиз	6.01	0.0885	67.9

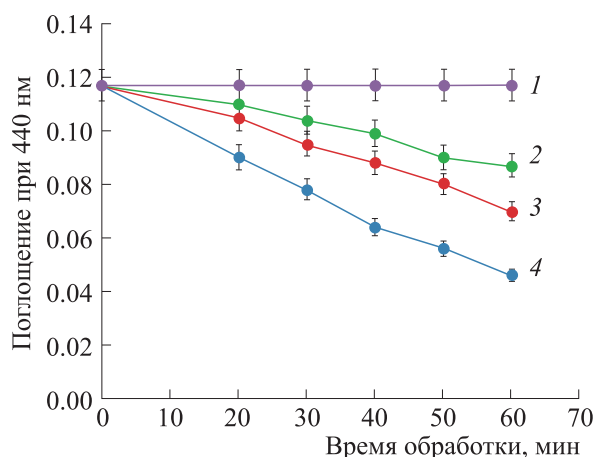
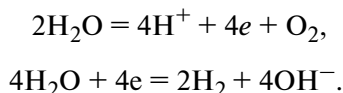


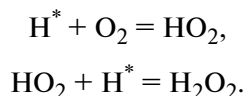
Рис. 3. Интенсивность поглощения в УФ-спектрах, измеренная при длине волны 440 нм, в зависимости от времени: кривая 1 — только прокачка, кривая 2 — прокачка с обработкой ультразвуком, кривая 3 — прокачка с электролизом, кривая 4 — прокачка с электролизом и одновременной ультразвуковой обработкой. Начальная концентрация N,N-диметил-4-нитрозоанилина составляла 1 мг/л ($6.7 \cdot 10^{-6}$ М/л).

ем ферментов, нарушению синтеза белка и повреждению органелл. Отметим, что возможные реакции гидроксильных радикалов с микроорганизмами мало изучены.

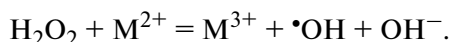
Механизм образования радикала $\cdot\text{OH}$ при электролизе водных растворов был рассмотрен в работе [24]. Общепринятыми схемами анодного окисления и катодного восстановления являются следующие:



Образование атомарного водорода (H^*) происходит на одной из промежуточных стадий в процессе катодного восстановления и может инициировать следующую последовательность реакций:

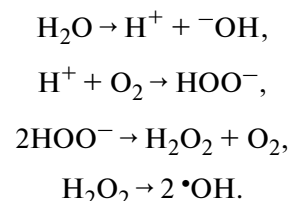


В присутствии металлических (М) электродов перекись водорода расщепляется на гидроксильные радикалы в соответствии с известной реакцией Фентона:



Механизм образования радикала $\cdot\text{OH}$ при ультразвуковом облучении водных растворов был рассмотрен в работах [23, 25]. При прохождении ультразвуковой волны в воде образуются зоны сжатия и разрежения, что является причиной образования пузырьков воздуха, которые увеличиваются с каждым прохождением волны. Последующее схлопывание пузырьков — явление кавитации — характеризуется значительным повыше-

нием температуры и давления (~ 5000 К, ~ 100 МПа). Такой эффект приводит к термической диссоциации водных паров с образованием $\cdot\text{OH}$ и H^+ . В данных работах была предложена следующая схема образования гидроксильного радикала:

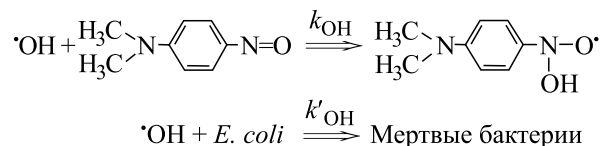


Для обнаружения гидроксильных радикалов в наших экспериментальных условиях в качестве спиновой ловушки использовали N,N-диметил-4-нитрозоанилин [26]. Выбор данного соединения обусловлен тем, что реакция RNO с гидроксильными радикалами очень избирательна и имеет высокую скорость.

Спектры поглощения RNO в водном растворе сульфата натрия, загрязненном *E. coli*, были измерены в трех различных условиях: во время ультразвуковой обработки, во время электролиза и во время обоих видов воздействия одновременно. Все три типа спектров имеют максимум поглощения при 440 нм. Изменение интенсивности поглощения в спектрах УФ от времени каждой обработки воды показано на рис. 3. Как видно из рисунка, наибольшие изменения происходят при совместном действии ультразвука и электролиза. Отметим, что эти зависимости коррелируют с зависимостями уменьшения количества колониеобразующих бактерий, представленных на рис. 2, что подтверждает, на наш взгляд, предположение об определяющей роли гидроксильных радикалов в инактивации бактерий.

Интересно оценить константу скорости реакции гидроксильного радикала с бактериями *E. coli*. Если пренебречь возможностью протекания других реакций с участием гидроксильных

радикалов и рассматривать их взаимодействие только с RNO и с бактериями, то количественный расход гидроксильных радикалов можно представить следующими схемами:



Кинетическая модель, предложенная для описания двух конкурентных реакций с участием гидроксильных радикалов, выглядит следующим образом [27]:

$$1/G_t = 1/G_o \{1 + (k'_{\text{OH}} [B]) / (k_{\text{OH}} [\text{RNO}])\}, \quad (3)$$

где G_t — скорость обесцвечивания RNO в присутствии бактерий, G_o — скорость обесцвечивания RNO в отсутствие бактерий, $[B]$ — концентрация бактерий в воде, $[\text{RNO}]$ — концентрация RNO в воде, k'_{OH} и k_{OH} — константы скорости соответствующих реакций.

Согласно уравнению (3), график $1/G_t$ в зависимости от $[B]/[\text{RNO}]$ должен давать прямую линию с наклоном $1/G_o \cdot (k'_{\text{OH}}/k_{\text{OH}})$, из которого можно рассчитать константу скорости реакции гидроксильных радикалов с бактериями. Концентрацию RNO измеряли после 40 мин электрохимической обработки в четырех экспериментах с различными концентрациями бактерий. Для *E. coli* были выбраны следующие концентрации: $1.1 \cdot 10^6$, $1.64 \cdot 10^6$, $2.1 \cdot 10^6$ и $7.9 \cdot 10^6$ КОЕ/мл. Таким образом, константа скорости реакции инактивации бактерий оказалась равна $5.92 \cdot 10^6 \text{ КОЕ}^{-1} \text{ с}^{-1}$ (принимая во внимание, что $k_{\text{OH}} = 1.2 \cdot 10^{10} \text{ М}^{-1} \text{ с}^{-1}$ [27]). Отметим, что данная оценка приближенная, но дает представление о скорости реакции гидроксильного радикала с бактерией.

ВЫВОДЫ

Таким образом, электрохимическая дезинфекция без использования хлора является одним из наиболее перспективных методов обеззараживания воды, загрязненной бактериями *E. coli*. Обработка ультразвуком (20 кГц) в процессе электролиза увеличивает эффект дезинфекции. Образование гидроксильных радикалов, которое было экспериментально подтверждено при использовании N,N-диметил-4-нитрозоанилина в качестве спиновой ловушки, очевидно, вносит значительный вклад в совместное дезинфицирующее действие электрохимической и ультразвуковой обработки. Предложенный метод дезинфекции

сточных вод является безопасным, дешевым и эффективным.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая статья не содержит описания каких-либо исследований с участием людей или животных в качестве объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Spellman F. R. *Handbook of water and wastewater treatment plant operations* (CRC Press, Boca Raton, 2013).
2. Sperling M. V. *Biological waste treatment series. V. 2. Basic principles of wastewater treatment* (IWA Publishing, London, 2007).
3. Ahuja S. Overview of advances in water purification techniques. In *Advances in water purification technique*, ed. by S. Ahuja (Elsevier Press, 2019), pp. 1–15.
4. Edberg S. C., Rice E. W., Karlin R. J. and Allen M. J. *Escherichia coli*: the best biological drinking water indicator for public health protection. *J. Appl. Microbiol.*, **88**, 106–116 (2000). DOI: 10.1111/j.1365-2672.2000.tb05338.x
5. *Carcinogens from water disinfection*, Ed. by S. Sciacca, G. O. Conti, M. Fiore, R. Fallico, and M. Ferrante (Nova Science Publishers, NY, 2011).
6. Al-Holy M. A. and Rasco B. A. The bactericidal activity of acidic electrolyzed oxidizing water against *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella* Typhimurium, and *Listeria monocytogenes* on raw fish, chicken and beef surfaces. *Food Control*, **54**, 317–321 (2015). DOI: 10.1016/j.foodcont.2015.02.017
7. Wolf Y., Oster S., Shuliakovich A., Brückner I., Dolny R., Linnemann V., Pinnekamp J., Hollert H. and Schiwy S. Improvement of wastewater and water quality via a full-scale ozonation plant? — A comprehensive analysis of the endocrine potential using effect-

- based methods. *Sci. Total Environ.*, **803** (12) 149756 (2021). DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149756
8. Brisbin R., Zhou J., Bond T., Voss L., Simon A. J., Baxter R., and Chang A. S. P. Plasmonics-Enhanced UV Photocatalytic Water Purification. *J. Phys. Chem. C*, **125**, 9730–9735 (2021). DOI: 10.1021/acs.jpcc.1c00613
 9. Wang J., Wang Z., Vieira C. L. Z., Wolfson J. M., Pingtian G., and Huang S. Review on the treatment of organic pollutants in water by ultrasonic technology. *Ultrason. Sonochem.*, **55**, 273–278 (2019). DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.01.017
 10. Swanckaert B., Geltmeyer J., Rabaey K., De Buysser K., and Bonin L. A review on ion-exchange nanofiber membranes: properties, structure and application in electrochemical (waste)water treatment. *Separation and Purification Technology*, **287**, 120529 (2022). DOI: 10.1016/j.seppur.2022.120529
 11. Chaplin B. P. The prospect of electrochemical technologies advancing worldwide water treatment. *Acc. Chem. Res.*, **52** (3), 596–604 (2019). DOI: 10.1021/acs.accounts.8b00611
 12. Mousset E., Trelu C., Olvera-Vargas H., Pechaud Y., Fourcade F. and Oturan M. A. Electrochemical technologies coupled with biological treatments. *Curr. Opin. Electrochem.*, **26**, 100668 (2020). DOI: 10.1016/j.coelec.2020.100668
 13. Li X. Y., Diao H. F., Fan F. X. J., Gu J. D., Ding F. and Tong A. S. F. Electrochemical wastewater disinfection: identification of its principal germicidal actions. *J. Env. Eng.*, **130** (10), 1217–1221 (2004). DOI: 10.1061/(asce)0733-9372(2001)130:10(1217)
 14. Patermarakis G. and Fountoukidis E. Disinfection of water by electrochemical treatment, *Water Res.*, **24**, 1491–1496 (1990). DOI: 10.1016/0043-1354(90)90083-I
 15. Barashkov N. N., Eisenberg D., Eisenberg S., Shegebaeva G. S., Irgibaeva I. S. and Barashkova I. I. Electrochemical chlorine-free AC disinfection of water contaminated with *Salmonella typhimurium* bacteria. *Russ. J. Electrochem.*, **46** (3), 306–311 (2010). DOI: 10.1134/S1023193510030079
 16. Halpin R. M., Duffy L., Cregenzan-Alberti O., Lyng J. G., and Noci F. The effect of non-thermal processing technologies on microbial inactivation: An investigation into sub-lethal injury of *Escherichia coli* and *Pseudomonas fluorescens*. *Food Control*, **41**, 106–115 (2014). DOI: 10.1016/j.foodcont.2014.01.011
 17. Gao S., Lewis G. D., Ashokkumar M., and Hemar Y. Inactivation of microorganisms by low-frequency high-power ultrasound: 2. A simple model for the inactivation mechanism. *Ultrason. Sonochem.*, **21**, 454–460 (2014). DOI: 10.1016/j.ultsonch.2013.06.007
 18. Al-Juboori R. A. and Yusaf T. Improving the performance of ultrasonic horn reactor for deactivating microorganisms in water. *IOP Conf. Series: Mater. Sci. Engineer.*, **36** (1), 012037 (2012). DOI: 10.1088/1757-899X/36/1/012037
 19. Lee Y., Zhou B., Liang W., Feng H., and Martin S. E. Inactivation of *Escherichia coli* cells with sonication, manosonication, thermosonication, and manothermosonication: Microbial responses and kinetics modeling. *J. Food Engineer.*, **93**, 352–364 (2009). DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2009.01.037
 20. Kadkhodae R. and Povey M. J. Ultrasonic inactivation of *Bacillus alpha-amylase*. I. Effect of gas content and emitting face of probe. *Ultrason. Sonochem.*, **15**, 133–142 (2008). DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.08.085
 21. Drakopoulou S., Terzakis S., Fountoulakis M. S., Mantzavinos D., and Manios T. Ultrasound-induced inactivation of gram-negative and gram-positive bacteria in secondary treated municipal wastewater. *Ultrason. Sonochem.*, **16**, 629–634 (2009). DOI: 10.1016/j.ultsonch.2008.11.011
 22. Ashokkumar M. The characterization of acoustic cavitation bubbles – an overview. *Ultrason. Sonochem.*, **18**, 864–872 (2011). DOI: 10.1016/j.ultsonch.2010.11.016
 23. Gong C., Jiang J., and Tian D. L. Ultrasonic application to boost hydroxyl radical formation during Fenton oxidation and release organic matter from sludge. *Sci. Reports*, **5**, 1–8 (2015). DOI: 10.1038/srep11419
 24. Kasai P. H. and McLeod D. Detection by spin trapping of hydrogen and hydroxyl radicals generated during electrolysis of water. *J. Phys. Chem.*, **82**, 619–621 (1978). DOI: 10.1021/j100494a024
 25. Sergeev A., Motyakin M., Barashkova I., Zaborova V., Krasulya O., and Yusof N. S. M. EPR and NMR study of molecular components mobility and organization in goat milk under ultrasound treatment. *Ultrason. Sonochem.*, **77**, 105673 (2021). DOI: 10.1016/j.ultsonch.2021.105673
 26. Zhang B.-T., Zhao L.-X., and Lin J.-M. Study on superoxide and hydroxyl radicals generated in indirect electrochemical oxidation by chemiluminescence and UV-Visible spectra. *J. Environ. Sci.*, **20**, 1006–1011 (2008). DOI: 10.1016/S1001-0742(08)62200-7
 27. Comninellis C. H. Electrocatalysis in the electrochemical conversion/combustion of organic pollutants for waste water treatment. *Electrochim. Acta*, **39** (11–12) 1857–1862 (1994). DOI: 10.1016/0013-4686(94)85175-1

Combination of Electrochemical and Ultrasonic Treatments for Purification of Water Contaminated with Pathogenic Bacteria: a Case Study of *Escherichia coli*

S.B. Bibikov*, A.I. Sergeev**, I.I. Barashkova**, and M.V. Motyakin*, **

*N.M. Emanuel Institute of Biochemical Physics, Russian Academy of Sciences, ul. Kosygina 4, Moscow, 119334 Russia

**N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, ul. Kosygina 4, Moscow, 119991 Russia

Combined effects of electrolysis and ultrasound on the population of *E. coli* bacteria in aqueous solution of sodium sulfate were investigated. The kinetics of bacteria inactivation was determined employing these water purification techniques. It has been shown that the combination of ultrasonic and electrochemical treatments of aqueous solution significantly increases the rate of bacterial inactivation. It has been suggested that hydroxyl radicals formed as a result of the reaction occurred after treatment of aqueous solution by employing a combination of electrolysis and ultrasound are responsible for the death of bacteria. A correlation between the rate of hydroxyl radical formation and the inactivation rate of bacteria has been obtained.

Keywords: water disinfection, electrolysis, Escherichia coli, spin trap, ultrasound, hydroxyl radical