

**Фаршад Голдбабайи Кутенайи^{1*}, Нассер Мехрдади¹, Голамреза наби Бидхенди¹,
Хасан Аминирад², Махди Асади Гхалхари³, Мохамад Аин Миррезайи¹**

¹Отделение природоохранного машиностроения, Тегеранский университет, Иран;

²Отделение природоохранного машиностроения, Технологический университет Бабол-Ноширвани, Иран;

³Центр исследования загрязнений окружающей среды, Университет медицинских наук, Кум, Иран

ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН И НАНОПУЗЫРЬКОВ ДЛЯ ДЕЗАКТИВАЦИИ *ESCHERICHIA COLI* В ИЛЕ

Обработка ила в очистных сооружениях — одна из самых сложных проблем как с технической, так и организационной точек зрения. Важной стадией является дезинфекция в связи с повышением стандартов здравоохранения и растущей озабоченности загрязнением водных ресурсов. Химические методы дезинфекции, такие, как хлорирование и озонирование, часто не являются экологически приемлемыми (вследствие образования некоторых нежелательных побочных продуктов, как, например, тригалометанов), поэтому необходимы альтернативные методы дезинфекции. Таким образом, задачей этого исследования является определение влияния ультразвуковых волн с низкой длиной волны и высоким уровнем энергии на повышение скорости удаления *Escherichia coli* из ила и определения оптимальных рабочих параметров ультразвукового метода. В этой работе переменными параметрами были плотность ультразвукового облучения (0,375; 0,75; 1; 1,3 и 2,5) Вт на 1 см³ и время (1; 5; 10; 15 и 30) мин. Кроме того, исследовано влияние этих переменных на дезактивацию *E. coli* в иле. Результаты показали существенный рост скорости уменьшения количества бактерий *E. coli* при увеличении плотности ультразвукового облучения от 0,375 до 2,5 Вт/см³. Также подобный рост скорости уменьшения количества бактерий *E. coli* наблюдался при увеличении продолжительности ультразвукового облучения от 1 до 30 мин. Экспериментально установлено, что оптимальными рабочими параметрами являются время ультразвукового облучения 30 мин, плотность ультразвукового облучения 2,5 Вт/см³ при частоте 20 кГц. Уровень дезактивации *E. coli* в этих условиях составлял 99,43%, что больше чем вдвое превышает логарифмический уровень. На основе полученных результатов сделан вывод, что при низкочастотном ультразвуковом облучении высокой мощности можно удалить практически всю популяцию бактерий *E. coli*, дезинфицировать ил и повысить скорость его обработки.

Ключевые слова: бактерии *Escherichia coli*, ил, кавитация, ультразвуковые волны, нанопузырьки, дезактивация.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее опасных типов бактерий, находящихся в фекалиях, является ки-

шечная палочка *Escherichia coli*, для которой кишечник человека и животного — наиболее распространенная среда обитания. Наличие кишечной палочки в воде свидетельствует о загрязнении сточных вод или отходов животного происхождения [1 — 4].

* Для листування: farshadgolbabaiei@yahoo.com

9. Thompson K., Gillespie S., Goslan E. *Disinfection by-products in drinking water*. Royal Soc. Chem. 2015.
10. Stack J., Carney A., Malone B., Wessels K. Factors influencing the ultrasonic separation of oil-in-water emulsions, *Ultrason. Sonochem.* 2003. 12. P. 153–160.
11. Kumar M., Grieser F. Ultrasonic assisted chemical processes. *Rev. Chem. Eng.* 1991. 1. P. 123–129.
12. Mohammadi A., Mehrdadi N., Nabi Bidhendi G., Torabian A. Excess sludge reduction using ultrasonic waves in biological wastewater treatment. *Desalination*. 2011. 275, N1/3. P. 67–73.
13. Parag M. Mapping of an ultrasonic horn: Primary and secondary effect of ultrasound. *Ultrason. Sonochem.* 2003. 10. P. 347–355.
14. Pierre G. Establishing a reference ultrasonic cleaning vessel. Pt 1. Supporting infrastructure and early measurements, NPL Report CMAM 55, 2001.
15. Cui X., Talley J., Liu G., Larson S. Effects of primary sludge particulate (PSP) entrapment on ultrasonic (20 kHz) disinfection of *Escherichia coli*. *Water Res.* 2011. 45, N11. P. 3300–3308.
16. Joyce E., Phull S., Lorimer J., Mason T. The development and evaluation of ultrasound for the treatment of bacterial suspensions. A study of frequency, power and sonication time on cultured *Bacillus species*. *Ultrason. Sonochem.* 2003. 10, N6. P. 315–328.
17. Wang F., Wang Y., Ji M. Mechanisms and kinetics models for ultrasonic waste activated sludge disintegration. *J. Hazard. Mater.* 2005. B123. P. 145–150.
18. Gholami M., Mirzaei R., Mohammadi R., Zarghampour Z., Afshari A. Destruction of *Escherichia coli* and *Enterococcus faecalis* using Low Frequency Ultrasound Technology: A Response Surface Methodology. *Health Scope*, 2014. 3, N1. P. 4213.
19. Bigelow T., Northagen T., Hill T., Sailer F. The destruction of *Escherichia coli* biofilms using high-intensity focused ultrasound. *Ultrasound Med. Biol.* 2009. 35, N6. P. 1026–1031.
20. Antoniadis A., Poullos I., Nikolakaki E., Mantzavinos D. Sonochemical disinfection of municipal wastewater. *J. Hazard. Mater.* 2007. 146. P. 492–495.
21. APHA, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21st ed, American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation. Washington, DC, USA. 2005.
22. Bas D., Boyaci I. Modeling and optimization: Usability of response surface methodology. *J. Food Eng.* 2007. 78, N3. P. 836–845.
23. Phama T., Satinder K., Brara R., Tyagia R. Ultrasonication of wastewater sludge—consequences on biodegradability and flowability. *J. Hazard. Mater.* 2009. 163. P. 891–898.
24. Dehghani M. Effectiveness of ultrasound on the destruction of *E. coli*. *Amer. J. Environ. Sci.* 2005. 1, N3. P. 187–189.
25. Hulsmans A., Joris K., Lambert N., Rediers H., Declerck P., Delaet Y. Evaluation of process parameters of ultrasonic treatment of bacterial suspensions in a pilot scale water disinfection system. *Ultrason. Sonochem.* 2010. 17. P. 1004–1009.

Поступила в редакцію 10.12.2017 г.

После доработки 21.05.2018 г.

Принято к публикации 18.12.2019 г.

Фаршад Голдбабайі Кутенай^{1*}, Нассер Мехрдаді¹, Голамреза набі Бідхенді¹, Хасан Амінірад²,
Махді Асаді Гхалхарі³, Мохамад Аін Міррезайі¹

¹Відділення природоохоронного машинобудування, Тегеранський університет, Тегеран, Іран;

²Відділення природоохоронного машинобудування, Технологічний університет Бабол-Ноширвані, Бабол, Іран;

³Центр дослідження забруднень навколишнього середовища, Університет медичних наук, Кум, Іран

*farshadgolbabaiei@yahoo.com

ЗАСТОСУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ І НАНОБУЛЬБАШОК ДЛЯ ДЕЗАКТИВАЦІЇ *ESCHERICHIA COLI* В МУЛІ

Обробка мулу в очисних спорудах — одна з найскладніших проблем як з технічної, так і організаційної точок зору. Дезінфекція є складним аспектом обробки води через швидке підвищення стандартів охорони

здоров'я та зростаюче занепокоєння щодо забруднених водних ресурсів. Хімічні методи дезінфекції, такі, як хлорування та озонування, часто не є екологічно прийнятними (через утворення деяких небажаних побічних продуктів, як, наприклад, тригалометани), тому необхідні альтернативні методи дезінфекції. Отже завданням цього дослідження є визначення впливу ультразвукових хвиль з низькою довжиною хвилі та високим рівнем енергії на підвищення швидкості видалення *E. coli* з мулу та визначення оптимальних робочих параметрів ультразвукового методу. В даній роботі змінними параметрами були густина ультразвукового опромінення (0,375; 0,75; 1; 1,3 та 2,5) Вт на 1 см³, та час (1; 5; 10; 15 та 30) хв. Крім того, досліджено вплив цих змінних на дезактивацію *E. coli* в мулі. Результати показали істотне зростання швидкості зменшення кількості бактерій *E. coli* при збільшенні густини ультразвукового опромінення від 0,375 до 2,5 Вт/см³. Подібне зростання ступеня зменшення кількості бактерій *E. coli* спостерігалось при збільшенні ультразвукового опромінення від 1 до 30 хв. Експериментально визначено, що оптимальними робочими параметрами є час ультразвукового опромінення 30 хвилин, густина ультразвукового опромінення 2,5 Вт/см³ при частоті 20 кГц. Рівень дезактивації *E. coli* в цих умовах становив 99,43%, що більше ніж вдвічі перевищує логарифмічний рівень. На основі отриманих результатів зроблено висновок, що при низькочастотному ультразвуковому опроміненні високої потужності можна видалити практично всю популяцію бактерій *E. coli*, дезінфікувати мул і підвищити швидкість його обробки.

Ключові слова: бактерії *Escherichia coli*, мул, кавітація, ультразвукові хвилі, нанобульбашки, дезактивація.

Farshad Golbabaee Kootenaei ^{1*}, Nasser Mehrdadi ¹, Gholamreza Nabi Bidhendi ¹,
Hasan Aminirad ², Mahdi Asadi Ghalhari ³, Mohammad Amin Mirrezaei ¹

¹Department of Environmental Engineering, University of Tehran, Iran;

²Department of Environmental Engineering, Babol (Noshirvani) University of Technology, Iran;

³Research Center for Environmental Pollutants, Qom University of Medical Sciences, Iran

*farshadgolbabaee@yahoo.com

APPLICATION OF ULTRASOUND WAVES AND NANOBUBBLES FOR INACTIVATION OF ESCHERICHIA COLI IN SLUDGE

Sludge treatment in wastewater treatment plants is one of the most difficult challenges for professionals and officials. Disinfection has become a challenging aspect of treatment because of the rapid elevation of health standards and the growing concern for pollution-free water resources. Chemical disinfection methods, like chlorination and ozonation, are often not environmental friendly (because of production of some undesirable by-products such as trihalomethanes) so alternative methods for disinfection are needed and the objective of this study is to determine the effect of ultrasonic waves with low wavelength and the high level of energy to improve removal rate of *Escherichia coli* in sludge and determine the optimum operating parameters of the ultrasonic method. In this research, variables include ultrasound density (0.375; 0.75; 1; 1.3 and 2.5) W per 1 mL and time (1; 5; 10; 15 and 30) min. Furthermore, the impact of these variables on the *E. coli* inactivation in sludge is measured. The results shows a significant increase in rate of *E. coli* bacteria reduction by increase of ultrasound density from 0.375 to 2.5 W/mL. By increasing of sonication time from 1 min to 30 min, the similar increase in rate of *E. coli* bacteria reduction was observed. The experiments determined that the optimum operating parameters be sonification time of 30 min, ultrasound density of 2.5 W/mL in the frequency of 20 kHz. Inactivation rate of *E. coli* in these circumstances was 99.43% that is more than 2 logs. Based on the results of this research, high power and low-frequency ultrasound waves are capable of eliminating nearly all the *E. coli* bacteria population at relatively short irradiation time and they could remove *E. coli* and disinfect the sludge hence could increase the treatment rate.

Keywords: *Escherichia coli*, sludge, cavitation, ultrasonic waves, nanobubbles, inactivation.