ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ ВОДЫ ДВУМЯ ДЛИНАМИ ВОЛН УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ ЭКСИЛАМП

Гаркушева Н.М., Матафонова Г.Г., Батоев В.Б.

*Байкальский институт природопользования СО РАН, Улан-Удэ, Россия
garcusheva@mail.ru*

WATER DISINFECTION BY TWO WAVELENGTHS OF UV-EXCILAMP RADIATION

Garkusheva N.M., Matafonova G.G., Batoev V.B.

Baikal Institute of Nature Management SB RAS, Ulan-Ude, Russia

В работе изучена динамика инактивации кишечной палочки *Escherichia coli* в водной суспензии при облучении двумя длинами волн УФ излучения KrCl (222 нм) и XeBr (282 нм) эксиламп при различной интенсивности излучения. В результате найден высокий синергический эффект для инактивации 100 % клеток. При этом необходимые дозы УФ излучения для полной инактивации относительно низкие и обеспечивают полную инактивацию бактериальных клеток. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения данного метода для эффективного обеззараживания воды.

Ключевые слова: обеззараживание воды, УФ излучение, эксилампа, инаktivация, *E. coli*.

In present work, a dynamics of *Escherichia coli* inactivation in aqueous suspension under irradiation with two UV wavelengths of KrCl (222 nm) and XeBr (282 nm) excilamps at different radiation intensities was studied. Results showed a high synergistic effect for 100% cell inactivation. The required UV doses were relatively low and provided the total inactivation of bacterial cells. The obtained results are promising for application of this method for efficient water disinfection.

Keywords: water disinfection, UV radiation, excilamp, inactivation, *E. coli*.

Загрязнение водных объектов патогенной микрофлорой является глобальной экологической проблемой и ограничивает доступ к безопасной питьевой воде. Для обеззараживания воды широко используется метод хлорирования, имеющий ряд недостатков, таких как токсичность хлора и возможность образования опасных побочных продуктов. Из безреагентных методов обеззараживания наиболее известен метод облучения УФ-светом, не вызывающий вторичного загрязнения. При этом в качестве источников УФ-излучения традиционно применяются экологически небезопасные ртутные лампы низкого и среднего давления. В свете Минаматской Конвенции о ртути, которую Россия подписала в 2014 г. [1], актуален переход на современные безртутные световые источники. Разработка таких источников (эксиламп, светоизлучающих диодов – LED) привела к идее комбинировать разные длины волн для достижения потенциального синергического эффекта. В настоящее время это направление исследований интенсивно развивается, в основном, применительно, к процессам инактивации микроорганизмов [2-16].

Поскольку эксилампы характеризуются узкополосным УФ-излучением, это дает возможность одновременно использовать разные длины волн для достижения возможной синергии. Литературный анализ показал, что процессы инактивации микроорганизмов в воде двумя длинами волн эксиламп и возникающие при этом синергические эффекты ранее не исследованы. В связи с этим, целью работы являлось изучение динамики микробной инактивации в воде двумя длинами волн УФ-излучения эксиламп при 222 и 282 нм (на примере *E. coli*).

В качестве модельного тест-микроорганизма взят штамм кишечной палочки *E. coli* K-12 из Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов (ГосНИИгенетика, г. Москва). Лиофилизированные клетки инокулировали в ГРМ-бульоне и культивировали в аэробных условиях в течение суток при 37 °С. Клетки односуточной культуры осаждали центрифугированием, дважды отмывали и ресуспендировали в буферном растворе. Полученную клеточную суспензию вносили в деионизированную воду для достижения исходной численности клеток 10⁵ КОЕ/мл и облучали в статическом фотореакторе при перемешивании на магнитной мешалке. Источником УФ-излучения служили экси-

лампы барьерного разряда на молекулах KrCl (222 нм) и XeBr (282 нм), которые размещали на различном расстоянии до поверхности обеззараживаемой воды. Полученные при этом величины интенсивности излучения определяли методом ферриоксалатной актинометрии. Степень инактивации клеток определяли путем сравнения среднего числа КОЕ после инкубирования необлученного и облученного образца на агаризованной среде в течение 24 часов в трех параллельных посевах.

В результате проведенных экспериментов было установлено, что одновременное воздействие двух длин волн разных интенсивностей увеличивает скорость инактивации и значительно сокращает продолжительность облучения для полной инактивации бактерий. При этом больший вклад вносит KrCl эксилампа в силу более высокой интенсивности излучения, а, значит, более высокой достигаемой дозы.

Далее нами оценен синергический эффект для инактивации 100 % клеток (т.е. снижения числа клеток на 5 порядков) путем сравнения степени инактивации после двухволнового облучения и облучения одной длиной волны. Во всех используемых двухволновых комбинациях суммарное снижение числа порядков после облучения отдельными длинами волн было ниже 5. Это указывает на синергический эффект при облучении двумя длинами волн, при котором была достигнута полная инактивация клеток.

Суммарные дозы УФ-излучения эксиламп для полной инактивации были близкими для всех двухволновых комбинаций и составили в среднем 2.4 мДж/см². Несмотря на то, что эти дозы закономерно выше, чем дозы при облучении одной длиной волны, полученные значения низкие и сопоставимы с найденными нами ранее для инактивации *E. coli* KrCl-эксилампой [16]. При этом достигается высокий синергический эффект и значительно сокращается продолжительность обработки воды для полного обеззараживания. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности данного метода для экспрессного и высокоэффективного обеззараживания воды.

Работа выполнена в рамках государственного задания БИП СО РАН (проект № 0273-2021-0006).

Список литературы

1. The Minamata Convention on Mercury [Электронный ресурс] // URL: <https://www.mercuryconvention.org/Convention/Text/tabid/3426/language/en-US/Default.aspx> (accessed: 28 May 2021).
2. Ramsay I. A., Niedziela J.-C., Ogden I. D. The synergistic effect of excimer and low-pressure mercury lamps on the disinfection of flowing water // J. Food Prot. 2000, V. 63, № 11, pp. 1529-1533.
3. Multivariate optimization of fecal bioindicator inactivation by coupling UV-A and UV-C LEDs / A.-C. Chevrement, A.-M. Farnet, M. Sergent, B. Coulomb // Desalin. 2012a, Vol. 285, pp. 219-225.
4. Effect of coupled UV-A and UV-C LEDs on both microbiological and chemical pollution of urban wastewaters / A.-C. Chevrement, A.-M. Farnet, B. Coulomb, J.-L. Boudenne // Sci. Tot. Environ. 2012b, Vol. 426, pp. 304-310.
5. Ha J.-W., Kang D.-H. Effect of intermittent 222 nm krypton-chlorine excilamp irradiation on microbial inactivation in water // Food Control. 2018, Vol. 90, pp. 146-151.
6. Kang J.-W., Kim S.-S., Kang D.-H. Inactivation dynamics of 222 nm krypton-chlorine excilamp irradiation on Gram-positive and Gram-negative foodborne pathogenic bacteria // Food Res. Int. 2018, Vol. 109, pp. 325-333.
7. Hull N.M., Linden K.G. Synergy of MS2 disinfection by sequential exposure to tailored UV wavelengths // Water Res. 2018, Vol. 143, pp. 292-300.
8. Kang J.-W., Kang D.-H. The synergistic bactericidal mechanism of simultaneous treatment with a 222-nanometer krypton-chlorine excilamp and a 254-nanometer low-pressure mercury lamp // Appl. Environ. Microbiol. 2019, Vol. 85, № 1, e01952-18.
9. Application of the 222 nm krypton-chlorine excilamp and 280 nm UVC light emitting diode for the inactivation of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella Typhimurium* in water with various turbidities / S.-S. Kim, M. Shin, J.-W. Kang, D.-K. Kim // LWT - Food Sci. Technol. 2020, Vol. 117, 108458.
10. Shin M., Kim S.-S., Kang D.-H. Combined treatment with a 222-nm krypton-chlorine excilamp and a 280-nm LED-UVC for inactivation of *Salmonella Typhimurium* and *Listeria monocytogenes* // LWT – Food Sci. Technol. 2020, Vol. 131, 109715.
11. Calvert J. G., Pitts Jr. J. N. Photochemistry. New York: John Wiley & Sons Inc, 1966. 899 p.
12. Evaluating UV-C LED disinfection performance and investigating potential dual-wavelength synergy / S. E. Beck, H. Ryu, L. A. Boczek, J. L. Cashdollar // Water Res. 2017, Vol. 109, pp. 207-216.
13. Evaluating (sono)-photo-Fenton-like processes with high-frequency ultrasound and UVA LEDs for degradation of organic micropollutants and inactivation of bacteria separately and simultaneously / S. Popova, I. Tsenter, N. Garkusheva, S. E. Beck // J. Environ. Chem. Eng. 2021, Vol. 9, 105249.

14. Goldstein S., Rabani J. The ferrioxalate and iodide-iodate actinometers in the UV region // J. Photochem. Photobiol. A. 2008, Vol. 193, pp. 50-55.
15. Kinetic modeling of lag times during photo-induced inactivation of *E. coli* in sunlit surface waters: Unraveling the pathways of exogenous action / E. A. Serna-Galvis, J. A. Troyon, S. Giannakis, R. A. Torres-Palma // Water Res. 2019, Vol. 163, 114894.
16. Popova S., Matafonova G., Batoev V. Simultaneous atrazine degradation and *E. coli* inactivation by UV/S₂O₈²⁻/Fe²⁺ process under KrCl excilamp (222 nm) irradiation // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2019, Vol. 169, pp. 169-177.