

**ОСОБЕННОСТИ КИНЕТИКИ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ
ВОДЫ, СОДЕРЖАЩЕЙ *E.coli* В УСЛОВИЯХ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ**

*Изучено обеззараживающее действие гидродинамической кавитации на микроорганизмы *E.coli* в воде. Установлено, что кинетика обеззараживания зависит от интенсивности гидродинамического кавитационного поля, микробной нагрузки и газосодержания. Изучены структурно-морфологические изменения бактерий *E.coli*. Показано, что антимикробное действие достигается за счет физико-химических эффектов кавитационного поля, под влиянием которых происходит механическое разрушение клеток, и химического обеззараживания радикалами гидроксила и пероксида водорода.*

Выбор оптимальных, экологически безопасных технологических процессов обеззараживания бытовых и природных вод, которые содержат разные виды патогенной флоры, приобретает все большее народнохозяйственное значение. Среди распространённых методов обеззараживания воды приоритетными являются химические методы, которые базируются на использовании соединений хлора, пероксида водорода, ионов серебра, меди. Недостатками таких методов является то, что одновременно с высокой степенью обеззараживания (99,0 – 99,99%) наблюдается реактивация микроорганизмов [1]; к тому же в воду попадают хлорорганические соединения, которые имеют мутагенное и канцерогенное действие, пестициды, аминифенолы, ПАВ [2]. Кроме того, нельзя оставить без внимания и высокую стоимость использования озона, ионов металлов и пероксида водорода. В связи с этим последние исследования в направлении усовершенствования процессов обеззараживания посвящены использованию физических методов обработки воды. Достичь бактерицидного эффекта позволяют методы электрообработки, ультрафиолетового облучения, тлеющего разряда, кавитации [2 – 8].

При использовании энергии ультразвуковой кавитации можно получить высокие показатели качества воды и обеспечить диспергирование газа-окислителя в субстрате, что также является интенсифицирующим фактором. Авторами [8] установлено обеззараживающее действие газа аргона и исследовано комплексное действие ультразвука и аргона. В работе [9] изучено комплексное действие ультразвука и химических реагентов.

В [10] получены данные, свидетельствующие об обеззараживающем действии гидродинамической кавитации. В работе [11] показана возможность

использования гидродинамических кавитационных аппаратов статического типа. Аналогичные результаты получены авторами [12] при исследовании влияния гидродинамической кавитации на микроорганизмы *E.coli* в статическом и роторном кавитационных устройствах. Анализ данных, представленных в указанных работах, показал, что эффект обеззараживания в зависимости от начального загрязнения воды и технологических параметров обработки изучен мало. Кроме того, относительно механизма и кинетики обеззараживания под воздействием гидродинамической кавитации сведений в литературе недостаточно.

Создать условия кавитационного течения достаточно просто. В устройствах динамического типа энергия, необходимая для возникновения кавитации, подводится непосредственно вращающимся рабочим органом (крыльчаткой). В кавитационном режиме могут работать все высокооборотные механические мешалки.

С точки зрения конструктивного, технологического и экономического решения, гидродинамические кавитационные устройства статического типа имеют ряд преимуществ перед динамическими устройствами. Наиболее простое конструктивное решение устройства статического типа – это последовательно установленные конфузор, проточная камера и диффузор.

Цель данной работы – изучение особенностей обеззараживающего воздействия гидродинамической кавитации и исследование структурно-морфологических изменений, возникающих в микробной клетке *E.coli*.

Методика эксперимента. Обработку воды проводили на лабораторной установке динамического типа (рис. 1) [13].

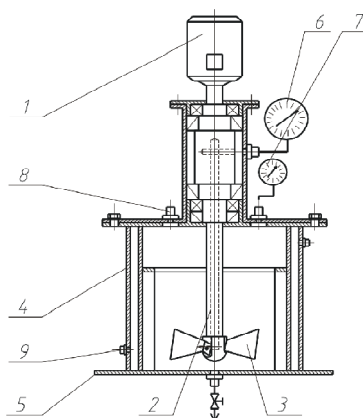


Рис.1. Схема лабораторной экспериментальной установки динамического типа

Установка состояла из электродвигателя 1; рабочей емкости 4 (объем – 2 дм³), изготовленной из органического стекла; рабочего органа 3, уста-

новленного на пустотелом валу 2. В качестве рабочего органа использовали трехлопастную крыльчатку клиновидного профиля с острой передней и тупой задней кромками. Конструкция установлена стационарно на раму 5. Вакуум внутри кавитационной каверны измерялся мановакууметром 6, давление в системе фиксировалось манометром 7. Обрабатываемая жидкость вводилась подводящим патрубком 8. Температура регулировалась термостатом 9.

В качестве объекта исследования использовали суточную культуру *E. coli*, выращенную на мясо-пептонном бульоне. Из 18-часовой бульонной культуры готовили суспензию бактерий плотностью 10^7 ос./см³. При необходимости ее разбавляли дистиллированной водой до плотности 10^4 , 10^5 или 10^6 ос./см³.

Антимикробное воздействие гидродинамической кавитации изучали по выживаемости бактерий *E. coli*. Пробы отбирали через определенные промежутки времени в течение 900 с, после чего проводили посев проб (или соответствующие разведения) на среду Эндо с последующим культивированием в термостате при 37°C в течение 20 – 24 ч. Выживаемость бактерий представляли как логарифм отношения числа выживших клеток (N_t) к исходному количеству (N_0) – $\lg(N_t/N_0)$.

Скорость отмирания микроорганизмов (K) рассчитывали по формуле

$$K = \frac{\lg(N_t / N_0)}{\tau}, \quad (1)$$

где $\lg(N_t/N_0)$ – десятичный логарифм отношения числа выживших клеток к их исходному количеству; τ – экспозиция, с [1].

Так же была исследована зависимость скорости отмирания *E. coli* в воде от интенсивности кавитационного поля, исходной зараженности воды и газовой среды.

В качестве основных параметров, характеризующих интенсивность кавитационного режима, в частности гидродинамику и структуру потока обрабатываемой среды, были выбраны модифицированное число Рейнольдса (Re_m) и число кавитации (χ).

Модифицированное число Рейнольдса определяли по уравнению

$$Re_m = \frac{d_m^2 n_m \rho}{\mu_c}, \quad (2)$$

где n_m – частота вращения мешалки, 1/с; d_m – диаметр мешалки, м; ρ – плотность жидкости, кг/м³; μ_c – вязкость обрабатываемой среды, Па·с.

Число кавитации характеризует особенности кавитационного режима, в частности, указывает на форму и размер образующихся парогазовых каверн, и определяется по уравнению

$$\chi = \frac{p - p_{\infty}}{1/2 \cdot v^2 \cdot \rho}, \quad (3)$$

где p, p_{∞} – давление соответственно в системе и каверне, Па; v – относительная скорость движения жидкости, м/с. В качестве энергетической характеристики данной лабораторной установки рассматривали удельную энергию (ε , Вт/дм³):

$$\varepsilon = \frac{N}{V}, \quad (4)$$

где N – полная потребляемая энергия, Вт (определяли экспериментально); V – объём обрабатываемой жидкости, дм³.

Используя известные теоретические зависимости [14], был определен порог кавитации ($n_m = 51 \text{ с}^{-1}$). Эти данные хорошо согласуются с экспериментальными визуальными исследованиями. Кроме того, согласно рис. 2, при режимах обработки, меньших этой скорости вращения, практически не наблюдается инактивация микроорганизмов. В табл. 1 представлены характеристики кавитационного поля в зависимости от удельной потребляемой энергии.

Таблица 1. Характеристики гидродинамического кавитационного поля

ε , Вт/дм ³	Частота вращения кавитирующей крыльчатки (n), с ⁻¹	Re _м	χ	Вакуум на лопасти крыльчатки *, кПа
45,8	50	$3,19 \cdot 10^5$	2,6	5
63,6	83	$5,3 \cdot 10^5$	0,96	20
87	125	$7,98 \cdot 10^5$	0,42	25

* Расстояние от передней кромки – 8 мм.

Суспензию микроорганизмов обрабатывали в деаэрированном дистилляте и воде с фиксированным газосодержанием. Деаэрацию образца, насыщение газом CO₂ и кислородом проводили следующим образом:

– при деаэрировании дистиллированную воду подвергали кипячению в открытой ёмкости, после чего охлаждали без доступа воздуха;

– воду в ёмкости экспериментальной установки барботировали газом CO_2 или O_2 из баллона в течение 10 мин до концентрации газа 8–10 г/дм³.

Результаты и их обсуждение. На рис. 2, 3 представлены кинетические кривые скорости отмирания бактерий *E. coli* в воде под воздействием гидродинамического кавитационного поля. Анализ свидетельствует, что скорость отмирания бактерий зависит как от удельной энергии (рис. 2), так и от микробной нагрузки (рис. 3). Если в первом случае она возрастает с увеличением интенсивности кавитации, то во втором – при уменьшении исходной зараженности воды (при снижении исходной зараженности до 10^4 ос./см³ степень обеззараживания 99,9% достигается в течение 12–14 мин).

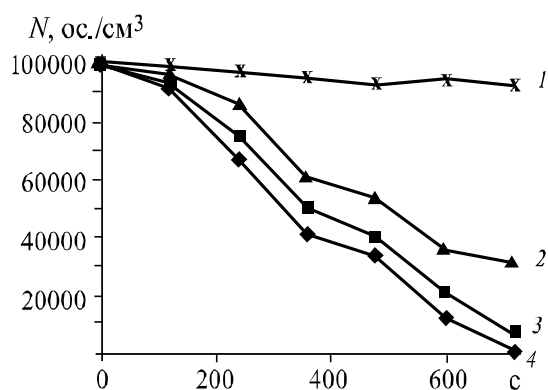


Рис. 2. Изменение количества бактерий *E. coli* в зависимости от удельной потребляемой энергии (Вт/дм³): 32,3 (1), 46,8 (2), 63,6 (3) и 87 (4)

Для исследованных скоростей вращения крыльчатки (33; 50; 83; 125 с⁻¹) значения скорости отмирания микроорганизмов *E. coli* составляли соответственно $2 \cdot 10^{-4}$; $8 \cdot 10^{-4}$; $1,4 \cdot 10^{-3}$ и $2,1 \cdot 10^{-3}$ с⁻¹. Константы скорости отмирания микроорганизмов при микробной нагрузке 10^6 , 10^5 , 10^4 ос./см³ соответствовали $1,5 \cdot 10^{-3}$; $2,1 \cdot 10^{-3}$ и $2,7 \cdot 10^{-3}$ с⁻¹.

Поскольку интенсивность обеззараживания зависит от газосодержания, были проведены исследования при введении культуры *E. coli* в деаэрированную воду и воду с фиксированным газосодержанием (рис. 4).

Согласно полученным экспериментальным данным определены скорости отмирания бактерий *E. coli* в зависимости от среды обработки: в деаэрированном дистилляте – $5 \cdot 10^{-4}$ с⁻¹; в воде, насыщенной CO_2 , – $7 \cdot 10^{-4}$ с⁻¹; в атмосфере воздуха – $1,5 \cdot 10^{-3}$ с⁻¹; в воде, насыщенной кислородом, – $2,7 \cdot 10^{-3}$ с⁻¹.

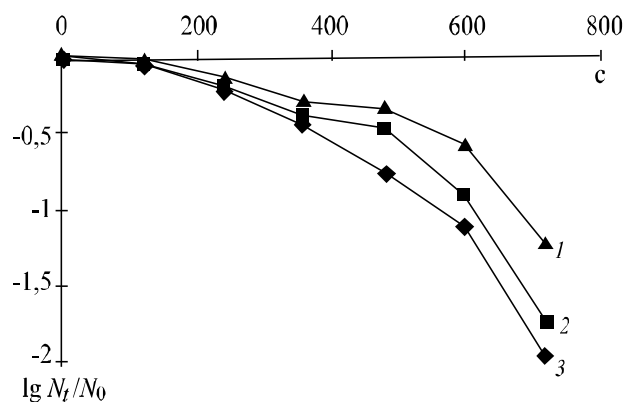


Рис. 3. Зависимость скорости отмирания бактерий *E.coli* при удельной потребляемой энергии 87 Вт/дм³ от микробной нагрузки: 10⁶ (1), 10⁵ (2) и 10⁴ ос./см³ (3)

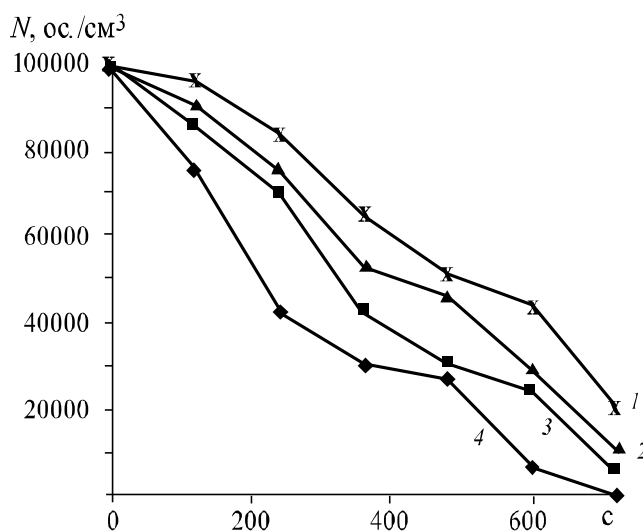


Рис. 4. Влияние атмосферы обрабатываемой среды на процесс отмирания бактерий *E.coli* при удельной потребляемой энергии 87 Вт/дм³: деаэрированный дистиллят (1), CO₂ (2), воздух (3) и O₂ (4)

Следует отметить, что интенсивнее всего процесс инактивации происходит в среде кислорода. Это можно объяснить дополнительным влиянием химического фактора гидродинамического кавитационного поля. В [15] изучены некоторые химические реакции, инициируемые физическими эффектами гидродинамического кавитационного поля. Показано, что, при обработке воды в атмосфере кислорода, одновременно с повышением

pH из парогазовой фазы в воду поступают химически активные соединения (OH^\cdot , H_2O_2 и O_3), имеющие обеззараживающее действие.

Радикалы гидроксила при воздействии на SH-группы, гистидиновые и другие аминокислотные остатки белков вызывают их денатурацию и инактивируют ферменты. В нуклеиновых кислотах радикалы OH^\cdot разрушают углеводородные связи между нуклеотидами и разрывают цепи ДНК и РНК, в результате чего клетки погибают. Кроме того, радикалы гидроксила, попадая в липидный слой мембран клеток, инициируют реакции цепного окисления липидов, которые провоцируют повреждение мембран и нарушение их функций, что также приводит к гибели клеток. Обеззараживающее действие пероксида водорода достигается за счёт высокой окислительной способности, в результате чего происходит снижение поверхностного натяжения клеточной мембраны и нарушение синтеза белка [9]. Концентрации озона являются незначительными ($<0,05$ мг/дм³), в связи с чем он не может существенно влиять на ход процесса [15].

Менее интенсивно происходит инактивация *E.coli* в присутствии CO_2 и в деаэрированной среде, поскольку химический фактор в данном случае не будет влиять на процесс [16]. При этом воздействие оказывают кумулятивные струйки.

Наименьший эффект достигается при обработке в деаэрированной воде, поскольку она освобождена от растворенных газов. Поэтому интенсивность процессов возникновения и схлопывания кавитационных пузырьков и сопровождающих их явлений меньше, нежели в воде, насыщенной газом. Это согласуется с результатами работы [10], в которой действие кавитации в вакууме намного слабее.

Для подтверждения принятого механизма обеззараживания были изучены структурно-морфологические изменения, возникающие в микробной клетке *E.coli* под влиянием эффектов гидродинамической кавитации. В контрольных препаратах клетки кишечной палочки имеют форму коротких палочек с закругленными концами однородной оптической плотности с четкими контурами оболочки (рис. 5).

Специфичность воздействия кавитации на микробные клетки проявилась в следующем: после 10-минутной обработки в гидродинамическом устройстве снижается контрастность клеток, происходит нарушение их оболочек, т.е. разрыхление, потеря четкости контуров, изменение формы. При этом клетки будто склеиваются, образуя скопления (рис. 6). Следовательно, имеет место обеззараживание химическими соединениями OH^\cdot и H_2O_2 [9]. В образцах после обработки наблюдаются также клетки с разрушенной оболочкой цитоплазмы, что свидетельствует о влиянии физических эффектов.

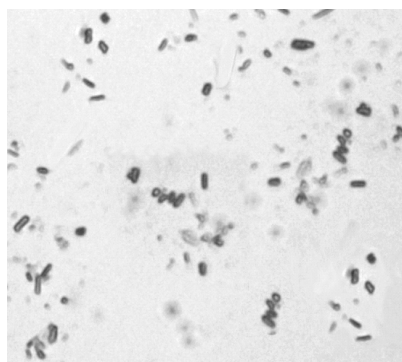


Рис. 5. Культура *E.coli* в пробах дистиллированной воды. Микробная нагрузка – 10^6 ос./см³ (x 1650)

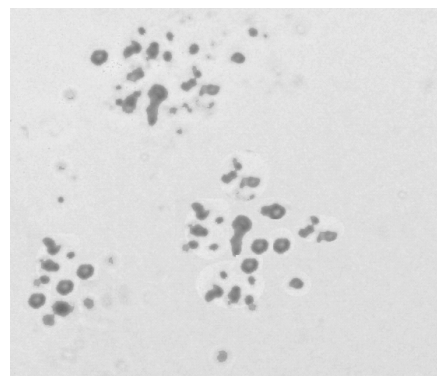


Рис. 6. Культура *E.coli* после обработки в течение 10 мин в гидродинамическом кавитационном аппарате при $\varepsilon = 87$ Вт/дм³. Микробная нагрузка – 10^6 ос./см³ (x 1650)

Выводы. На основании исследования структурно-морфологических изменений, возникающих в микробной клетке *E.coli*, изучен механизм обеззараживающего действия гидродинамической кавитации. Установлено, что интенсивность процесса зависит от характеристик кавитационного поля, введенной энергии, начальной микробной загрузки и газосодержания. Эти результаты могут быть использованы при разработке технологий водоподготовки.

Резюме. Вивчено знезаражуючий вплив гідродинамічної кавітації на мікроорганізми *E.coli* у воді. Встановлено, що інактивуюча дія гідродинамічної кавітації залежить від інтенсивності гідродинамічного кавітаційного поля, микробного навантаження і газомісту. Вивчено структурно-морфологічні зміни бактерій *E.coli*. Показано, що антимікробний ефект досягається за рахунок фізичних ефектів кавітаційного поля, що здійснюють механічне руйнування клітин і хімічної деградації, що відбувається під впливом хімічно активних сполук.

O.R. Gashchyn, T.M. Viten'ko

ESCHERICHIA COLI. THE MECHANISM AND KINETICS OF WATER DISINFECTION UNDER THE INFLUENCE OF HYDRODYNAMIC CAVITATIVE FIELD

Summary

It has been investigated the distinctive action of hydrodynamic cavitations on the microorganisms of the *E. coli* in the water. It has been installed that inactive effect of hydrodynamic cavitation field, the microbes' loading and

the gas content. It has been shown that the anti-microbe effect is reached with the help of physical effects of cavitative field that makes the mechanical destroying of cells and chemical degradation under the influence of chemical-active compositions.

1. *Потапченко Н.Г., Савлук О.С., Горчев В.Ф., Косинова В.Н.* // Химия и технология воды. – 1997. – **19**, № 3 – С. 315 – 319.
2. *Гончарук В.В., Потапченко Н.Г.* // Там же. – 1998. – **20**, № 2. – С. 190 – 217.
3. *Маркитанова Л.И., Зенин Г.С.* // Там же. – 1990. – **12**, № 7. – С. 658 – 661.
4. *Потапченко Н.Г., Савлук О.С.* // Там же. – 1991. – **13**, № 12. – С. 1117 – 1129.
5. *Григорьева Л.В., Корчак Г.И., Бей Т.В.* // Там же. – 1992. – **14**, № 10. – С. 794 – 799.
6. *Кравченко А.В., Подгорный О.А., Царенко В.В., Нестеренко А.Ф., Рахманин Ю.А., Кублановский В.С.* // Там же. – 1995. – **17**, № 5. – С. 549 – 553.
7. *Савлук О.С., Потапченко Н.Г., Ильяшенко В.В.* // Там же. – 1993. – **15**, №11/12. – С. 797 – 803.
8. *Шевчук Л.І., Старчевський В.Л., Кузьо О.М.* // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка." – 2005. – № 536. – С. 178 – 181.
9. *Интенсификация процессов обеззараживания воды / Под ред. Л.А. Кульского.* – Киев: Наук. думка, 1978. – 96 с.
10. *Есиков С.А.* // Дис... канд. техн. наук. – Красноярск, 1987. – 210 с.
11. *Вітенько Т.М.* // Автореф. дис... канд. техн. наук. – Львів, 1996. – 17 с.
12. *Вітенько Т.М., Волюкова Н.М.* // Вісн. УНТУ "Київ. політехн. ін-т", Машинобудування. – 2002. – **1**, Вип. 42. – С.77 – 80.
13. *Витенько Т.Н., Гащин О.Р.* // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2007. – №3. – С. 44 – 48.
14. *Исаков А.Я.* // Автореф. дис... канд. техн. наук. – Владивосток, 1997. – 17 с.
15. *Вітенько Т.М., Гащин О.Р.* // Наукові праці. / Одеська нац. академія харчових технологій. – 2006. – **2**, №28 – С. 22 – 25.
16. *Маргулис М.А., Мальцев А.Н.* // Журн физ. химии. – 1968. – **42**. – С. 1447 – 1452.

Гос. техн. ун-т им. И. Пулюя,
г. Тернополь, Украина

Поступила 04.01.2007