

## ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ СТОЧНЫХ ВОД КАВИТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ

М. А. Промтов, А. В. Алешин, М. М. Колесникова, Д. С. Карпов

*Кафедра «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»,  
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; mahp@tambov.ru*

**Ключевые слова:** дезинфекция; кавитация; моделирование; обеззараживание; сточная вода; число кавитации.

**Аннотация:** Приведены результаты экспериментальных исследований по обеззараживанию сточной бытовой воды за счет кавитационной обработки в роторных импульсных аппаратах и проточном гидродинамическом кавитаторе. Показано, что бактерицидный эффект кавитации зависит от степени интенсивности кавитации и числа циклов обработки. Основное бактерицидное действие на микрофлору в воде оказывает пероксид водорода и радикалы гидроксила, которые образуются в воде при кавитации. Кавитационная обработка с добавлением малого количества гипохлорита натрия дает синергетический эффект при обеззараживании сточной воды. Гидродинамические параметры полей давления и скоростей потока жидкости моделировались с использованием программы ANSYS CFX. По результатам моделирования определены числа кавитации роторных импульсных аппаратов и проточного гидродинамического кавитатора.

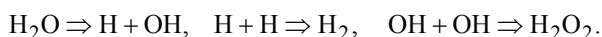
---

Современные требования к питьевой воде, пищевым продуктам, сбросам сточных вод устанавливают жесткие ограничения на остаточное содержание реагентов, используемых для обеззараживания жидкостей, содержание вредных и опасных веществ. В связи с этим растет интерес к безреагентным методам обработки жидких сред. Безреагентные методы очистки и дезинфекции не загрязняют природную среду химическими веществами, не оказывают вредного или раздражающего воздействия на организм человека при контакте с очищенной водой и другими жидкостями. В настоящее время перспективны новые экологичные методы обеззараживания жидкостей за счет их физической обработки и уменьшения количества применяемых для дезинфекции химических реагентов. К таким методам относится ультрафиолетовое облучение, электроразрядная, кавитационная обработка и другие способы физического воздействия на жидкости. При сравнении различных методов обеззараживания кавитация является относительно недорогим способом обработки жидкости. Если финансовые затраты на кавитационную дезинфекцию единицы объема питьевой воды принять за единицу, то затраты на ультрафиолетовую обработку больше примерно в 1,6 раза, на хлорирование – в 3 раза, озонирование – в 10 раз по сравнению с затратами на кавитационную обработку жидкости [1]. Кавитационные технологии показывают высокую эффективность для интенсификации химико-технологических процессов в жидкостях, в том числе и для их очистки, пастеризации и обеззараживания [2 – 17].

Кавитация представляет собой средство локальной концентрации энергии низкой плотности в высокую плотность энергии, связанную с пульсациями и захлопыванием кавитационных пузырьков. В фазе разрежения акустической волны или за счет местного понижения давления, например при обтекании твердого тела, в жидкости образуются каверны. В фазе сжатия под действием внешнего давления и сил поверхностного натяжения каверна захлопывается, а пар конденсируется на границе раздела фаз. Через стены каверны в нее диффундирует растворенный в жидкости газ, который затем подвергается сильному адиабатическому сжатию. В момент схлопывания кавитационной каверны давление и температура газа локально могут достичь значительных величин (по расчетным данным до 100 МПа и до 10 000 °С) [18].

Выделяющейся в процессе схлопывания пузырька энергии достаточно для возбуждения, ионизации и диссоциации молекул воды, газов и веществ с высокой упругостью пара внутри кавитационной полости. На этой стадии любой из присутствующих газов является активным компонентом, участвуя в передаче энергии возбуждения, перезарядке и других процессах. При схлопывании кавитационного пузырька в раствор переходят радикалы Н, ОН, ионы и электроны малой энергии, образовавшиеся в газовой фазе при расщеплении молекулы Н<sub>2</sub>О и веществ с высокой упругостью пара, продукты их взаимодействия и частичных рекомбинаций, а также метастабильные возбужденные молекулы Н<sub>2</sub>О. Независимо от природы растворенных веществ, действие кавитации на воду приводит к изменению ее физико-химических свойств: увеличению рН, электропроводности воды, увеличению числа свободных ионов и активных радикалов, структуризации и активации молекул [19 – 20]. Основное бактерицидное действие на микрофлору в воде оказывают пероксид водорода и радикалы ОН°, которые образуются при диссоциации молекул воды в кавитационных образованиях [2, 12, 13, 17].

Образование пероксида водорода при кавитации возможно за счет диссоциации молекул воды:



Эти реакции подтверждаются данными, приведенными в работах [2, 19, 20].

Экспериментальные исследования по кавитационной обработке воды в роторном импульсном аппарате (РИА) показали, что происходит увеличение значения рН (табл. 1). После прекращения кавитационной обработки воды преобладают обратные химические реакции, и рН за 48...72 ч понижается до исходной величины.

Таблица 1

**Зависимость изменения рН воды при обработке в РИА**

Время, мин	рН
0	7,00
5	7,05
10	7,45
15	7,75
20	8,05
25	8,25
30	8,50
35	8,70

При кавитационном воздействии на воду разрушаются коллоиды и частицы, внутри которых могут содержаться бактерии, микроорганизмы лишаются защиты перед другими химическими и физическими воздействиями кавитации. Бактерицидное действие кавитации прямо пропорционально ее интенсивности, кратности или времени обработки. Кавитация способна дробить крупные молекулы органики, являющиеся центрами образования кавитационных пузырьков точно так же, как и микробы являются центрами притяжения кавитационных образований. По размеру микробы соизмеримы с крупными молекулами органических соединений, с молекулами тяжелых нефтепродуктов [1].

Воздействие кумулятивных струй жидкости, локальные пульсации давления и температуры при схлопывании кавитационных пузырьков способны вызывать гибель бактерий, что используется при обеззараживании жидких продуктов и растворов [2 – 4, 8 – 17]. Нами проведены исследования по кавитационной обработке сточной бытовой воды, которые показали, что число общих колиформных бактерий (**ОКБ**) от кавитационного воздействия уменьшается в 100 тыс. раз, термотолерантных бактерий (**ТКБ**) – в 60 тыс. раз, колифагов (бактериальных вирусов) – в 80 раз.

В таблице 2 представлены данные о количестве бактерий и вирусов в сточной воде после обработки в промышленных роторных импульсных аппаратах РИА-150 и РИА-250 без добавления химических реагентов, а также после обработки в лабораторном проточном гидродинамическом кавитаторе (**ПГК**) без химических реагентов и с добавлением 0,1 % раствора гипохлорита натрия (**ГХН**).

Влияние числа циклов обработки можно определить по данным табл. 3. Практически полное уничтожение бактерий в сточной воде при кавитационной обработке в РИА достигалось за 10 циклов, в ПГК с добавлением 0,1 % раствора ГХН – за 5 циклов.

Степень развитости кавитации в гидродинамическом оборудовании определяется числом кавитации. Для РИА число кавитации можно определить по формуле

$$C = \frac{2(P_{к.с} - P_{в})}{\rho V_{\max c}^2},$$

где  $V_{\max c}$  – наибольшее значение скорости потока жидкости в канале статора, м/с;  $P_{к.с}$  – статическое давление в канале статора, Па;  $P_{в}$  – давление насыщенных водяных паров, Па;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>.

Таблица 2

**Количество бактерий и вирусов в сточной воде после обработки**

Анализируемый показатель	РИА-250		РИА-150		ПГК		
	Необр.	Обр.	Необр.	Обр.	Необр.	Обр. без ГХН	Обр. с ГХН
ОКБ, КОЕ/100 мл	9·10 <sup>4</sup>		16·10 <sup>4</sup>	120	16·10 <sup>4</sup>	6·10 <sup>4</sup>	
ТКБ, КОЕ/100 мл	6·10 <sup>4</sup>	н/о	12·10 <sup>4</sup>	100	12·10 <sup>4</sup>	6·10 <sup>4</sup>	н/о
Колифаги, БОЕ/100мл	86		80	н/о	80	н/о	

Примечания: 1. КОЕ, БОЕ – колониеобразующие и бляшкообразующие единицы соответственно.

2. Необр. – необработанная; Обр. – обработанная; н/о – не обнаружено.

Таблица 3

**Количество ОКБ, КОЕ/мл, в зависимости от циклов безреагентной обработки в РИА-150 и ПГК**

Число циклов обработки	РИА-150	ПГК
0	16·10 <sup>4</sup>	16·10 <sup>4</sup>
2	5·10 <sup>4</sup>	9·10 <sup>4</sup>
5	0,4·10 <sup>4</sup>	8,2·10 <sup>4</sup>
10	0,012·10 <sup>4</sup>	6,8·10 <sup>4</sup>

Для ПГК число кавитации определяется по формуле

$$C = \frac{2(P_k - P_v)}{\rho V_{\max}^2},$$

где  $P_k$  – давление на выходе из каналов ПГК, Па;  $V_{\max}$  – наибольшая величина скорости потока жидкости на выходе из каналов ПГК, м/с. Если  $C \geq 1$ , то кавитации в потоке жидкости практически нет; если  $C < 1$ , то в потоке жидкости присутствует кавитация; при  $C \ll 1$  в потоке существует развитая кавитация.

Для определения гидродинамических параметров оборудования применялось моделирование полей давления и скоростей потока жидкости с использованием программы ANSYS. Для расчета числа кавитации написана подпрограмма в рабочей среде ANSYS CFX 14, которая интегрировала необходимые данные результатов моделирования в формулу для расчета числа кавитации [21]. Расчет числа кавитации для применяемого кавитационного оборудования показал, что наименьшее значение числа кавитации  $C$  для применяемого оборудования составило: для РИА-250 – 0,27; РИА-150 – 0,78; ПГК – 0,83.

Сопоставление данных по обработке сточной воды и величин чисел кавитации в РИА и ПГК позволяет сделать вывод, что кавитация прямо пропорционально влияет на эффективность бактерицидной обработки в гидродинамическом оборудовании. При обработке сточной воды в промышленном РИА-250 возможно полное уничтожение бактерий за 10 циклов без химических реагентов. При обработке сточной воды в лабораторном ПГК возможно полное уничтожение бактерий за 5 циклов обработки с добавлением не менее 0,1 % раствора ГХН. При содержании в воде 0,1 – 0,2 % ГХН она соответствует нормативным требованиям по pH и содержанию ОКБ и ТКБ. Кавитационная обработка сточной воды с введением небольшого количества окислителя (гипохлорита натрия) дает синергетический эффект и позволяет снизить в несколько раз число химических реагентов, применяемых для обеззараживания сточной воды.

#### *Список литературы*

1. Шиян, Л. Н. Химия воды. Водоподготовка : учеб. пособие / Л. Н. Шиян. – Томск : Изд-во ТПУ, 2004. – 72 с.
2. Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing / Hao Feng, Gustavo V. Barbosa-Cánovas, Jochen Weiss (Eds.). – Springer Science + Business Media, LLC, 2011. – 678 p.
3. Kumar, J. K. Cavitation – a New Horizon in Water Disinfection. Water disinfection by ultrasonic and hydrodynamic cavitation / J. K. Kumar, A. B. Pandit. – Verlag : VDM, 2010. – 304 p.
4. Ozonek, J. Application of Hydrodynamic Cavitation in Environmental Engineering / J. Ozonek. – Boca Raton: CRPress, 2012. – 124 p.
5. Промтов, М. А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов / М. А. Промтов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 861 – 869.
6. Промтов, М. А. Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества : учеб. пособие / М. А. Промтов. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 136 с.
7. Промтов, М. А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика / М. А. Промтов. – М. : Машиностроение-1, 2001. – 260 с.
8. Gogate, R. P. Application of Cavitation Reactors for Water Disinfection: Current Status and Path Forward / R. P. Gogate // Journal of Environmental Management. – 2007. – Vol. 85. – P. 801 – 815.

9. Loraine, G. Disinfection of Gram – Negative and Gram – Positive Bacteria using DYNAJETS Hydrodynamic Cavitating Jets / G. Loraine [et al.] // *Ultrasonics and Sonochemistry*. – 2012. – No. 19. – P. 710 – 717.
10. Effect of Hydrodynamic Cavitation on Zooplankton: a Tool for Disinfection / S. S. Sawant [et al.] // *Biochem. Eng. J.* – 2008. – No. 42(3). – P. 320 – 328.
11. Inactivation of Food Spoilage Microorganisms by Hydrodynamic Cavitation to Achieve Pasteurization and Sterilization of Fluid Foods / P. J. Milly [et al.] // *Journal of Food Science*. – 2007. – Vol. 72, No. 9. – P. 414 – 422.
12. Arrojo, S. A Parametrical Study of Disinfection with Hydrodynamic Cavitation / S. Arrojo, Y. Benito, A. Martinez // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2007. – No. 15. – P. 903 – 908.
13. Remediation and Disinfection of Water Using Jet Generated Cavitation [Электронный ресурс] / К. М. Kalumuck [et al.] // 5th Int. Symp. on Cavitation (cav2003), Osaka, Japan, November 1 – 4, 2003. – Cav03-OS-2-2-003. – Режим доступа : <http://flow.me.es.osaka-u.ac.jp/cav2003/Papers/Cav03-OS-2-2-003.pdf> (дата обращения: 04.03.2015).
14. Mahvi, A. H. Application of Ultrasonic Technology for Water and Wastewater Treatment / A. H. Mahvi // *Iranian J. Publ. Health*. – 2009. – Vol. 38, No. 2. – P. 1 – 17.
15. Гимранов, Ф. М. Оценка возможности использования комплексных методов обеззараживания воды в пищевой промышленности / Ф. М. Гимранов [и др.] // *Вестн. Казан. технол. университета*. – 2012. – № 8. – С. 289 – 291.
16. Промтов, М. А. Кавитационное обеззараживание жидких органических удобрений / М. А. Промтов [и др.] // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2012. – Т. 18, № 4. – С. 899 – 904.
17. Rotation Generator of Hydrodynamic Cavitation for Water Treatment / M. Petkovšek [et al.] // *Separation and Purification Technology*. – 2013. – Vol. 118. – P. 415 – 423.
18. Кнэпп, Р. Кавитация : пер. с англ. / Р. Кнэпп, Дж. Дейли, Ф. Хэммит. – М. : Мир, 1974. – 678 с.
19. Маргулис, М. А. Сонолюминисценция / М. А. Маргулис // *Успехи физ. наук*. – 2000. – Т. 170, № 3. – С. 263 – 287.
20. Витенько, Т. Н. Механизм активирующего действия гидродинамической кавитации на воду / Т. Н. Витенько, Я. М. Гумницкий // *Химия и технология воды*. – 2007. – Т. 29, № 5. – С. 422 – 432.
21. Промтов, М. А. Характеристики потока жидкости в каналах проточных гидродинамических статических кавитаторов / М. А. Промтов, А. Ю. Степанов, А. В. Алешин // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2013. – Т. 19, № 3. – С. 562 – 569.

---

## Cavitation Treatment for Wastewater Disinfection

M. A. Promtov, A. V. Aleshin, M. M. Kolesnikova, D. S. Karpov

*Department “Technological Processes, Devices and Technosphere Safety”, TSTU;  
mahp@tambov.ru*

**Keywords:** cavitation; cavitation number; decontamination; disinfection; modeling; wastewater.

**Abstract:** It shows the results of experimental studies on wastewater disinfection f by cavitation treatment in rotor-stator devices and hydrodynamic flowpath cavitator. It is shown that the bactericidal effect depends on the degree of cavitation, the cavitation intensity and the amount of processing cycles. Hydrogen peroxide and hydroxyl radicals formed in cavitation water have basic bactericidal activity against pathogenic

microorganisms in the water. Cavitation treatment with addition of a small amount of sodium hypochlorite gives a synergistic effect in wastewater disinfecting. The hydrodynamic parameters of pressure and velocity fields of fluid flow were simulated in the ANSYS CFX software package. The results of modeling identified cavitation number for rotor-stator devices and hydrodynamic flowpath cavitator.

### References

1. Shiyan L.N. *Khimiya vody. Vodopodgotovka* (Water conditioning), Tomsk: Izdatel'stvo TPU, 2004, 72 p.
2. Feng H., Barbosa-Cánovas G. V., Weiss J. (Eds.), *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing*, Springer Science + Business Media, LLC. 2011, 678 p.
3. Kumar J.K., Pandit A.B. *Cavitation - a New Horizon in Water Disinfection. Water disinfection by ultrasonic and hydrodynamic cavitation*, VDM Verlag, 2010, 304 p.
4. Ozonek J. *Application of Hydrodynamic Cavitation in Environmental Engineering*, Boca Raton: CRPress, 2012, 124 p.
5. Promtov M.A. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 4, pp. 861-869.
6. Промтов, М.А. Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества. Учебное пособие. / М.А. Промтов/ – М.: «Издательство Машиностроение – 1», 2004. – 136 с.
7. Promtov M.A. *Pul'satsionnye apparaty rotornogo tipa: teoriya i praktika* (Pulsation rotary type machines: theory and practice), Moscow: Mashinostroenie-1, 2001, 260 p.
8. Gogate, R.P. *Journal of Environmental Management*, 2007, vol. 85, p. 801-815.
9. Loraine G., Chahine G., Hsiao C.-T., Aley P. *Ultrasonics and Sonochemistry*, 2012, no. 19, pp. 710–717.
10. Sawant S.S., Anil A.C., Krishnamurthy V., Gaonkar C., Kolwalkar J., Khandeparker L., Desai D., Mahulkar A.V., Ranade V.V., Pandit A.B. *Biochem. Eng. J.*, 2008, no. 42(3), pp. 320-328.
11. Milly P.J., Toledo R.T., Harrison M.A., Armstead D. *Journal of Food Science*, 2007, vol. 72, no. 9, pp. 414-422.
12. Arrojo S., Benito Y., Martinez A. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2007, no. 15, pp. 903-908.
13. Kalumuck K.M., Chahine G.L., Hsiao C-T, Choi J-K *5th Int. Symp. on Cavitation (cav2003)*, Osaka, Japan, November 1-4, 2003, Cav03-OS-2-2-003, available at: <http://flow.me.es.osaka-u.ac.jp/cav2003/Papers/Cav03-OS-2-2-003.pdf> (accessed 4 March 2015).
14. Mahvi A.H. *Iranian J. Publ. Health*, 2009, vol. 38, no. 2, pp. 1-17.
15. Gimranov F.M., Belyaev A.N., Flegentov I.V., Suslov A.S. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2012, no. 8, pp. 289-291.
16. Promtov M.A., Ivanova A.E., Stepanov A.Yu., Aleshin A.V. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 4, pp. 899904.
17. Petkovšek M., Zupanc M., Dular M., Kosjek T., Heath E., Kompare B., Širok B. *Separation and Purification Technology*, 2013, vol. 118, pp. 415-423.
18. Knapp R.T., Daily J.W., Hammitt F.G. *Cavitation*, New York: McGraw-Hill Book Company, 1970.
19. Margulis M.A. *Physics-Uspexhi*, 2000, vol. 43, no.3, pp. 259-282.
20. Viten'ko T.N., Gumnitskii Ya.M. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 2007, vol. 29, issue 5, pp. 231-237.
21. Promtov M.A., Stepanov A.Yu., Aleshin A.V. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2013, vol. 19, no. 3, pp. 562-569.

## Entgiftung der Abwässer von der Kavitationsbearbeitung

**Zusammenfassung:** Es sind die Ergebnisse der experimentalen Forschungen nach der Entgiftung des Abflußhaushaltswassers mit Hilfe der Kavitationsbearbeitung in den Rotorpulsapparaten und in dem fließenden hydrodynamischen Kavitator angeführt. Es ist gezeigt, dass der bakterizide Effekt der Kavitation von der Stufe der Intensität der Kavitation und von der Zahl der Zyklen der Bearbeitung abhängt. Die bakterizide Haupthandlung auf die pathogenen Mikroflora im Wasser wirken das Peroxid des Wasserstoffes und die Radikalen des Hydroxyles ein, die im Wasser bei der Kavitation gebildet werden. Die Kavitationsbearbeitung mit der Ergänzung der kleinen Zahl des Natriumhypochlorites gibt den synergetischen Effekt bei der Entgiftung des Abwässers. Die hydrodynamischen Parameter der Felder des Druckes und der Geschwindigkeiten des Stroms der Flüssigkeit wurden mit der Ausnutzung des Programms ANSYS CFX modelliert. Nach den Ergebnissen der Modellierung sind die Zahlen der Kavitation der Rotorimpulsapparate und des fließenden hydrodynamischen Kavitators bestimmt.

---

## Désinfection des eaux usées par un traitement de cavitation

**Résumé:** Sont cités les résultats des études expérimentales sur la désinfection des eaux usées par un traitement de cavitation dans les appareils impulsionsnels de rotor et cavitateur hydrodynamique courant. Est montré que l'effet bactéricide de la cavitation dépend du degré de l'intensivité de la cavitation et de la quantité des cycles du traitement. L'action bactéricide sur la microflore principale pathogène dans l'eau donne le peroxyde de l'hydrogène et les radicaux de l'hydroxyle qui sont formés dans l'eau après la cavitation. Le traitement de cavitation avec une addition d'une petite quantité d'hypochlorite de sodium donne un effet synerigique lors de la désinfection des eaux usées. Les paramètres hydrodynamiques des champs de pression et de vitesses des courants de liquide étaient modulés avec l'emploi du programme ANSYS CFX. D'après les résultats du modélage sont définis les nombres de cavitation des appareils impulsionsnels de rotor et du cavitateur hydrodynamique courant.

---

**Авторы:** *Промтов Максим Александрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», декан факультета международного образования; *Алешин Андрей Владимирович* – аспирант кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Колесникова Мария Максимовна* – магистрант кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность»; *Карпов Дмитрий Сергеевич* – студент кафедры «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Технологические процессы, аппараты и техносферная безопасность», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

---