



УДК 628.162

А. Л. ВАСИЛЬЕВ¹, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой водоснабжения, водоотведения, инженерной экологии и химии; **А. С. БАЛОБАНОВ^{1,2}**, аспирант, руководитель проектов

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ СМЕШЕНИЯ РЕАГЕНТОВ

¹ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 430-54-87; эл. почта: k_viv@nngasu.ru

²ООО «НПЦ ПромВодОчистка».

Россия, г. Н. Новгород, ул. Яблоневая, д. 20, литера КК1, П1.

Тел.: (831) 262-16-01. эл. почта: info@prom-water.ru

Ключевые слова: водоподготовка, качество воды, ультразвук, коагуляция, модернизация.

В статье изложен анализ использования ультразвуковых излучателей в системах водоподготовки. Сделаны теоретические расчеты излучателя.

Изучение традиционных технологических схем реагентного умягчения и осветления воды выявило принципиальные недостатки как гидравлических, так и механических смесительных устройств. Эти ограничения приводят к неоправданно высокому расходу химикатов, нестабильному протеканию коагуляционных процессов и, как следствие, к ослаблению защитной функции водоочистных сооружений в периоды резкого ухудшения качества природной воды. Возникает объективная потребность в разработке альтернативных подходов к организации смешения, которые позволяли бы добиваться тонкого диспергирования реагента при малых энергетических затратах и без привнесения дополнительных загрязнений.

Одним из наиболее перспективных направлений считается использование энергии ультразвуковых полей. Физическим фундаментом данного подхода выступает явление акустической кавитации – образование, пульсация и стремительное захлопывание парогазовых пузырьков в жидкости под влиянием переменного давления. Результативность ультразвукового воздействия на стадии смешения и хлопьеобразования определяется не только грамотным выбором акустических параметров (частота, интенсивность, режим), но и типом генератора колебаний. Именно излучатель, трансформирующий электрическую или гидравлическую энергию в механические вибрации, задает пространственную структуру поля, очертания кавитационной зоны и, в итоге, технологический эффект. В настоящее время для обработки жидких сред применяют три основных класса аппаратов, различающихся физическим механизмом возбуждения колебаний и конструктивным исполнением: пьезоэлектрические, магнитострикционные и гидродинамические (струйные) излучатели [1].

Пьезоэлектрические преобразователи – наиболее широко используемый тип ультразвуковых излучателей как в лабораторной практике, так и в ряде



промышленных установок для озвучивания жидкостей. Их функционирование базируется на способности пьезоактивных материалов деформироваться под действием приложенного переменного электрического напряжения. Кристаллический элемент вибрирует с частотой возбуждающего сигнала, передавая акустическую энергию в сопредельную среду. Вместе с тем данному классу присущ ряд фундаментальных ограничений, которые становятся критичными при переходе к промышленному масштабу:

- Коэффициент полезного действия редко превышает 20–40 %, причем заметная доля потерь уходит на разогрев самого пьезоэлемента и акустического трансформатора.

- Постепенное старение пьезокерамики.

- Трудности масштабирования. Поле одиночного стержневого излучателя крайне неравномерно: максимальная кавитационная активность сосредоточена вблизи торца концентратора и быстро спадает с расстоянием [2].

- Эрозионный износ рабочих наконечников за счет кавитации.

Таким образом, без применения специальных конструктивных решений, направленных на выравнивание акустического поля и минимизацию тепловых потерь, пьезоэлектрические преобразователи демонстрируют ограниченную применимость в крупных промышленных системах водоподготовки.

Магнитострикционные преобразователи представляют собой иную разновидность ультразвуковых излучателей. Их принцип действия основан на способности ферромагнитных материалов менять линейные размеры в магнитном поле. Генерируемые таким образом механические колебания через концентратор и рабочую насадку передаются жидкости [3, 4]. Однако и этот тип излучателей имеет недостатки, препятствующие их массовому внедрению в технологии очистки воды:

- Повышенная стоимость, обусловленная использованием редкоземельных сплавов и трудоемкостью изготовления.

- Значительный нагрев катушки. Требуется эффективное охлаждение сердечника.

- Эрозия наконечника. Ситуация усугубляется тем, что замена изношенного концентратора требует стендовой юстировки.

Гидродинамические (струйные) излучатели образуют обособленную категорию устройств, в которых колебания и кавитация возбуждаются непосредственно за счет энергии движущейся жидкости, без привлечения внешних электрических источников. Принцип их работы состоит в том, что при протекании воды через профилированные сопла создаются условия для формирования парогазовых полостей. Взрывное захлопывание этих полостей в зоне восстановления давления порождает весь комплекс кавитационных явлений: ударные волны, кумулятивные струйки, интенсивные турбулентные пульсации, а в ряде конструкций – мощные акустические поля [5, 6]. Основные достоинства гидродинамических излучателей:

- Конструктивная простота и отсутствие электронных компонентов.

- Не требуется дополнительного подвода электричества большой мощности.

Гидродинамические генераторы не лишены недостатков, ограничивающих их повсеместное распространение и диктующих необходимость дальнейших исследований:



– Зависимость от гидравлического режима. Производительность кавитационной обработки сильно зависит от расхода, напора и температуры воды [7].

– Эрозия сопловых и резонансных элементов.

– Слабая изученность физики вихревой кавитации. Следствие – отсутствие надежных инженерных методик расчета таких устройств применительно к конкретным условиям водоподготовки [6].

– Узкий диапазон частоты и интенсивности.

Таким образом, гидродинамические излучатели представляют собой компромиссное решение для промышленной реализации ультразвуковой интенсификации смешения реагентов и кондиционирования воды.

Создание струйного гидроакустического генератора требует количественной оценки гидродинамических и акустических процессов, развивающихся в его элементах [8]. Для расчета излучателя перепад давления между входом в сопло и резонансной камерой принимаем равным $\Delta P = 0,35$ МПа (среднее значение из рабочего диапазона). Для конического профилированного сопла с углом конусности $12\text{--}15^\circ$ коэффициент расхода составляет $\mu = 0,95$. Скорость жидкости на срезе сопла определяется по уравнению Бернулли:

$$V = \mu \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} = 0,95 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 0,35 \cdot 10^6}{998}} \approx 25,1 \text{ м/с},$$

где ΔP – перепад давления на сопле, ρ – плотность жидкости, μ – коэффициент расхода сопла (зависит от его геометрии и числа Рейнольдса, обычно $0,6\text{--}0,98$). Эта скорость является ключевым фактором, определяющим интенсивность вихреобразования и глубину разрежения в кавитационной зоне [8].

Диаметр сопла находим из уравнения неразрывности, определяется по формуле:

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}}.$$

Для $Q = 5 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($1,39 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$): $d \approx 8,4 \text{ мм}$.

Для $Q = 15 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($4,17 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$): $d \approx 14,6 \text{ мм}$.

Принимаем комплект сменных сопел диаметрами 8, 10, 12 и 15 мм, что позволяет гибко настраивать расход и частоту. Число Рейнольдса для минимального сопла ($d = 8 \text{ мм}$) составляет:

$$Re = \frac{Vd}{\nu} = \frac{25,1 \cdot 0,008}{1,0 \cdot 10^{-6}} \approx 2,0 \cdot 10^5.$$

Столь высокое значение гарантирует развитый турбулентный режим истечения и стабильное вихреобразование на кромке сопла – необходимое условие возникновения акустических автоколебаний [9]. При натекании затопленной струи на острую кромку резонатора возникает автоколебательный режим, расстоянием от среза сопла до отражающей стенки резонатора (зазор) [10]. При $f = 8000 \text{ Гц}$ и $V = 25,1 \text{ м/с}$ требуемый зазор составляет:

$$l = \frac{i \cdot k \cdot V}{4 \cdot f} = \frac{1 \cdot 0,77 \cdot 25,1}{4 \cdot 8000} \approx \frac{19,33}{32\,000} \approx 0,60 \text{ мм},$$



где $i = 1$ – номер основной гармоники, $k \approx 0,77$ – эмпирическая константа, V – скорость струи, l – расстояние от среза сопла до отражающей стенки резонатора (зазор).

Данная формула справедлива в широком диапазоне скоростей и позволяет оперативно оценить частоту излучения [11]. Для обеспечения свободного развития струи D_k принимается не менее двух диаметров сопла d ($D_k \geq 2d > 30$ мм). Данное условие, основанное на практических рекомендациях по проектированию гидродинамических излучателей, гарантирует устойчивый колебательный режим и предотвращает эффект прилипания струи к стенкам камеры. Принимаем $D_k = 50$ мм. Длина камеры складывается из максимального зазора и пространства для выхода потока: $L_k \approx 1,0$ мм + 40 мм = 41 мм.

Раствор коагулянта подается в зону пониженного давления, возникающую в центре камеры за срезом сопла. Давление в этой зоне оценивается по уравнению Бернулли с учетом потерь в сопле:

$$P_3 = P_1 - \frac{\rho V^2}{2} - \Delta P_{\text{соп}} = 0,45 - \frac{999 \cdot 25,1^2}{2} - 0,034 \approx 0,102 \text{ МПа},$$

где потери в сопле при $\mu = 0,95$ составляют $\Delta P_{\text{соп}} > 0,034$ МПа.

Давление ниже атмосферного ($\sim 0,1$ МПа изб. = 0,2 МПа абс.) создает разрежение, достаточное для самопроизвольного подсоса реагента. Общие потери напора в генераторе складываются из трех составляющих: потери в сопле, потери на внезапное расширение струи в камере и потери на выходе. Потери в сопле при $\mu = 0,95$:

$$\Delta P_{\text{соп}} = \frac{\rho V^2}{2} \cdot \frac{1 - \mu^2}{\mu^2} \approx 0,314 \cdot 0,108 \approx 0,034 \text{ МПа}.$$

Потери на внезапное расширение рассчитываются по формуле Борда–Карно [12]. Для наихудшего случая (сопло 15 мм, камера 50 мм) отношение площадей:

$$\Delta P_{\text{расш}} = \frac{\rho V^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{S_c}{S_k}\right)^2 \approx 0,314 \cdot \left(1 - \frac{15}{50}\right)^2 \approx 0,260 \text{ МПа}.$$

Выходные потери (поворот, трение) оцениваются в $\sim 0,02$ МПа. Суммарные потери:

$$\Delta P_{\text{общ}} \approx 0,034 + 0,260 + 0,02 \approx 0,314 \text{ МПа}.$$

Для определения числа кавитации (критерий подобия) [13], получаем:

$$\sigma = \frac{2(P_3 - P_v)}{\rho V^2} \approx \frac{2 \cdot (0,102 \cdot 10^6 - 2300)}{998 \cdot (25,1)^2} \approx \frac{2 \cdot 99\,700}{628\,000} \approx 0,318.$$

При $\sigma > 1$ кавитационные явления в потоке отсутствуют; при $\sigma < 1$ зарождаются отдельные пузырьки (начальная стадия); при $\sigma \ll 1$ (около 0,1 и менее) наступает развитая суперкавитация, при которой каверна охватывает значительную часть объема и обеспечивает максимальное механическое и акустическое воздействие [14]. Для интенсификации смешения реагента целесообразно работать в суперкавитационной области с числом кавитации в диапазоне 0,01–0,1.

Найденное значение соответствует начальной фазе развитой кавитации. При повышении входного давления до 0,5 МПа число кавитации уменьшается до $\sim 0,1$, переводя аппарат в режим суперкавитации с максимальным выходом акустических эффектов.



Полученные геометрические и режимные параметры могут являться основой для конструктивного оформления опытной модели излучателя.

Проведенный анализ существующих методов ультразвуковой интенсификации реагентной обработки воды показал, что гидродинамические (струйные) излучатели, использующие энергию основного потока, представляют собой наиболее рациональное решение для промышленных водоочистных станций. Данные устройства отличаются конструктивной простотой, отсутствием потребности во внешнем электропитании высокой мощности и, как следствие, низкими капитальными и эксплуатационными затратами.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на экспериментальную верификацию предложенной модели, изучение эрозионной стойкости сопел и резонаторов из современных композиционных материалов, в условиях реальной эксплуатации водоочистных сооружений. Успешное решение этих задач позволит реализовать на практике энергоэффективную технологию реагентной обработки воды с минимальным перерасходом химикатов и повышенной барьерной надежностью очистных станций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Назаренко, А. Ф. Гидродинамический излучатель / А. Ф. Назаренко // Большая российская энциклопедия: научно-образовательный портал. – URL: <https://old.bigenc.ru/physics/text/2358344> (дата обращения: 27.05.2024).
2. Физические основы ультразвуковой технологии / под ред. Л. Д. Розенберга. – Москва : Наука, 1970. – 688 с.
3. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / под ред. И. П. Голяминой. – Москва : Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
4. Кикучи, Э. Ультразвуковые преобразователи : пер. с яп. / Э. Кикучи, Т. Окудзава, Т. Сато. – Москва : Мир, 1972. – 424 с.
5. Кардашев, Г. А. Тепломассообменные акустические процессы и аппараты / Г. А. Кардашев, П. Е. Михайлов. – Москва : Машиностроение, 1973. – 223 с.
6. Horodyskyi, N. I. Hydrodynamics in cavitation device under tangential supply fluid / N. I. Horodyskyi, T. M. Vitenko // *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2018. – Vol. 82, No. 1. – P. 48–55. – DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2018.82.128285>.
7. Прокофьев, В. В. Использование кавитационных автоколебательных режимов для генерации периодических импульсных струй / В. В. Прокофьев, С. А. Очеретяный, Е.А. Яковлев // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2021. – Т. 62, № 1. – С. 97–108.
8. Самбунова, Л. И. Интенсификация процессов в энергоемких теплоиспользующих системах нефтяной промышленности: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Самбунова Людмила Ивановна. – Москва, 2006. – 219 с.
9. Гартмана генератор // Большая советская энциклопедия. – URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/78210/Гартмана> (дата обращения: 27.05.2024).
10. Капелюховский, А. А. Резонатор Гельмгольца в составе струйного гидродинамического генератора / А. А. Капелюховский // *Вестник Омского государственного технического университета*. – 2018. – С. 30–35.
11. Dîntu, S. Generatoare de ultrasunete gazodinamice de tip Hartmann / S. Dîntu // Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților, Universitatea Tehnică a Moldovei. – Chișinău, 2019. – URL: <http://repository.utm.md/handle/5014/4566>.
12. Гидравлика и аэродинамика / А. Д. Альтшуль, Л. С. Животовский, Л. П. Иванов. – Москва : Стройиздат, 1987. – 414 с.



13. ГОСТ 34437-2018. Арматура трубопроводная. Методика экспериментального определения гидравлических и кавитационных характеристик : издание официальное. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 39 с.

14. Патент № 2183511 Российская Федерация, МПК В06В 1/20. Способ гидродинамического звукообразования : опубл. 20.06.2002 / Янковский Н.Б. – 3 с. : ил.

VASILEV Aleksey Lvovich¹, doctor of technical sciences, professor, holder of the chair of water supply, sewage, engineering ecology and chemistry; BALOBANOV Aleksandr Sergeevich^{1,2}, postgraduate student, leading engineer technologist

THEORETICAL ASPECTS OF USING ULTRASONIC EMITTERS FOR INTENSIFYING REAGENT MIXING

¹Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.
65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.

Tel.: (831) 430-54-87; e-mail: k_viv@nngasu.ru

²NPTs PromVodOchiskta, LLC.

20, KK1, P1, Yablonevaya St., Nizhny Novgorod, Russia.

Tel.: (831) 262-16-01, e-mail: info@prom-water.ru

Key words: water treatment, water quality, ultrasound, coagulation, modernization.

This article presents an analysis of the use of ultrasonic emitters in water treatment systems. Theoretical calculations for the emitter are provided.

REFERENCES

1. Nazarenko A. F. Gidrodinamicheskiy izluchatel [Hydrodynamic emitter]. Bolshaya rossiyskaya entsiklopediya: nauchno-obrazovatelnyy portal [Great Russian Encyclopedia: Scientific and Educational Portal]. URL: <https://old.bigenc.ru/physics/text/2358344> (accessed: 27.05.2024).

2. Fizicheskie osnovy ultrazvukovoy tekhnologii [Physical foundations of ultrasonic technology]. pod red. L. D. Rozenberga. Moscow, Nauka, 1970, 688 p.

3. Ultrazvuk. Malenkaya entsiklopediya [Ultrasound. Small encyclopedia]. pod red. I. P. Golyaminoy. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya, 1979, 400 p.

4. Kikuchi E., Okudzava T., Sato T. Ultrazvukovye preobrazovateli [Ultrasonic transducers] : per. s yap. Moscow, Mir, 1972, 424 p.

5. Kardashev G. A., Mikhaylov P. E. Teplomassoobmennye akusticheskie protsessy i apparaty [Heat and mass transfer acoustic processes and apparatus]. Moscow, Mashinostroenie, 1973, 223 p.

6. Horodyskiy N. I., Vitenko T. M. Hydrodynamics in cavitation device under tangential supply fluid. Mechanics and Advanced Technologies. 2018, Vol. 82, No. 1, P. 48–55. DOI: 10.20535/2521-1943.2018.82.128285.

7. Prokofev V. V., Ocheretyanyy S. A., Yakovlev E. A. Ispolzovanie kavitatsionnykh avtokolebatelnykh rezhimov dlya generatsii periodicheskikh impulsnykh struy [Use of cavitation self-oscillating regimes for generation of periodic pulsed jets]. Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics]. 2021, Vol. 62, № 1, P. 97–108.

8. Samburova L. I. Intensifikatsiya protsessov v energoemkikh teploispolzuyushchikh sistemakh neftyanoy promyshlennosti [Intensification of processes in energy-intensive heat-using systems of the oil industry] : diss. ... kand. tekhn. nauk. Samburova Lyudmila Ivanovna. Moscow, 2006, 219 p.



9. Gartmana generator [Hartmann generator]. Bolshaya sovetskaya entsiklopediya [Great Soviet Encyclopedia]. URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/78210/Гартмана> (accessed: 27.05.2024).
10. Kapelyukhovskiy A. A. Rezonator Gelmgoltsa v sostave struynogo gidrodinamicheskogo generatora [Helmholtz resonator as part of a jet hydrodynamic generator]. Vestnik Omskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Omsk State Technical University]. 2018, P. 30–35.
11. Dîntu S. Generatoare de ultrasunete gazodinamice de tip Hartmann [Gas-dynamic ultrasonic generators of Hartmann type]. Conferința Tehnico-Științifică a Colaboratorilor, Doctoranzilor și Studenților, Universitatea Tehnică a Moldovei [Technical-Scientific Conference of Collaborators, Doctoral Students and Students, Technical University of Moldova]. Chișinău, 2019. URL: <http://repository.utm.md/handle/5014/4566>.
12. Altshul A. D., Zhivotovskiy L. S., Ivanov L. P. Gidravlika i aerodinamika [Hydraulics and aerodynamics]. Moscow, Stroyizdat, 1987, 414 p.
13. GOST 34437-2018. Armatura truboprovodnaya. Metodika eksperimentalnogo opredeleniya gidravlicheskih i kavitatsionnykh kharakteristik [Pipeline valves. Methodology for experimental determination of hydraulic and cavitation characteristics]: izdanie ofitsialnoe. Moscow, Standartinform, 2018, 39 p.
14. Patent № 2183511 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B06B 1/20. Spособ gidrodinamicheskogo zvukoobrazovaniya [Method of hydrodynamic sound generation]: opubl. 20.06.2002. Yankovskiy N. B. 3 p. : il.

© **А. Л. Васильев, А. С. Балобанов, 2026**

Получено: 22.05.2026 г.