

1
НОМЕР

БОНЦ

ISSN 2304-9081

ЭЛЕКТРОННЫЙ ЖУРНАЛ

<http://www.elmag.uran.ru>



БЮЛЛЕТЕНЬ

ОРЕНБУРГСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА УРО РАН



КРАСНАЯ ПЛОЩАДЬ. БИТВА ЗА МОСКВУ
Бальтерманц Д.Н., 07.11.1941

2025

УЧРЕДИТЕЛЬ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ОРЕНБУРГСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

© Коллектив авторов, 2025

УДК 628.16

Межуева Л.В.¹, Иванова А.П.², Быков А.В.², Гунько Н.М.²

¹ Оренбургский федеральный исследовательский центр УрО РАН (Отдел геоэкологии), Оренбург, Россия

² Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

ТЕХНИЧЕСКИЙ АСПЕКТ ВИБРАЦИОННОЙ КАВИТАЦИИ ДЛЯ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ВОДЫ В РАМКАХ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

Проведен анализ проблемы очистки воды. Рассмотрена возможность эффективной очистки воды в специальных устройствах, основанных на вибрационной кавитации и криогенных технологиях. В работе представлены результаты исследований, направленных на разработку и совершенствование безреагентной очистки воды. Предложено и обосновано использование кавитации совместно с поляризованным материалом силикагеля, что позволяет регулировать содержание органических и минеральных примесей в ней. Значительный потенциал разработанной технологии комплексного использования вибрационной кавитации и криогенной технологии повышает эффективность очистки загрязненных вод до качества чистой питьевой воды.

Ключевые слова: вибрационная кавитация, система полиамидных стержней, напряженность электрического поля, микробиологическая обсемененность, степень очистки, хладагент.

Mezhueva L.V.¹, Ivanova A.P.², Bykov A.V.², Gunko N.M.²

¹ Orenburg Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, (Geoecology Department), Orenburg, Russia

² Orenburg State University, Orenburg, Russia

TECHNICAL ASPECT OF VIBRATIONAL CAVITATION FOR MICROBIOLOGICAL WATER TREATMENT WITHIN THE FRAMEWORK OF RATIONAL NATURE MANAGEMENT

An analysis of the problem of water purification has been conducted. The possibility of effective water purification using specialized devices based on vibrational cavitation and cryogenic technologies has been considered. The study presents the results of research aimed at the development and improvement of reagent-free water purification. The use of cavitation in combination with polarized silica gel is proposed and justified, which allows for the regulation of organic and mineral impurities content in water. The significant potential of the developed technology for the combined use of vibrational cavitation and cryogenic technology enhances the efficiency of water purification, bringing polluted water to the quality of clean drinking water.

Keywords: vibrational cavitation, system of polyamide rods, electric field intensity, microbiological contamination, degree of purification, refrigerant.

Введение

Проблема питьевой воды становится все острее с изменением климатических условий и возникновением природных катаклизмов. Серьезная роль в этом принадлежит активному применению химических веществ в различных технологических процессах, увеличению промышленных и бытовых отходов, сбрасываемых в водоемы и попадающих в грунтовые воды.

Источниками питьевой воды являются либо поверхностные, либо подземные воды. К первым относят реки, озера и водохранилища, которые легко возобновляются и поддаются регулированию, в частности, путем накопления воды в искусственных водоемах. Такие воды легко доступны, но имеют ключевой технический аспект, а именно, характеризуются большим спектром загрязнений как химических, физических, так и микробиологических. В то же время по качественным показателям лучше подземные воды, вбирающие в себя лишь минералы и соли металлов грунтов, через которые они просачиваются. Но у них имеется другой недостаток – гидротехнические и очистные сооружения сложны и экономически затратны. Загрязнение любого из этих источников воды в значительной степени зависит от промышленных предприятий, расположенных вблизи водной инфраструктуры.

Рациональное природопользование при очистке воды представляет собой совокупность подходов и технологий, позволяющих минимизировать негативное воздействие процесса очистки на окружающую среду и одновременно обеспечить высокое качество обработанной воды. Цель использования таких технологий заключается в снижении расходов природных ресурсов, предотвращении загрязнения водоемов и сохранении экологической устойчивости регионов.

По данным тематического исследования 2025 г. крупнейшего рейтингового агентства RAEX, посвященного изучению мер, связанных с эффективным управлением водными ресурсами, 60% компаний из ESG-рэнкинга RAEX имеют невысокий уровень рационального водопользования. Данные были получены в результате анализа 144 компаний по итогам прошлого года. При этом статистику водопотребления брали из данных корпоративных политик и программ, связанных с водопользованием, выявлением рисков и мер по их минимизации, реализация которых позволяет сократить как абсолютные, так и удельные объемы использования водных ресурсов. Основным фактором, влияющим на водопользование, а, следовательно, и на увеличение

рисков, является специфика отрасли, связанной с большим количеством потребления водных ресурсов, которые не являются оборотными и не относятся к безотходному производству [1].

Для улучшения физических, химических и биологических свойств воды используется современное оборудование, разработаны всевозможные устройства и установки, которые рассматриваются в комплексе конструктивных параметров и режимных характеристик процесса, что позволяет получать разнообразные решения, удовлетворяющие той или иной поставленной задаче. Комплекс параметров эффекта, сформированный в результате суммарного взаимодействия многопараметрической системы, характеризует масштаб процесса, энергоемкость, материальные затраты и качество полученного продукта [2-4].

Соответствие качественным характеристикам воды, в последнее время, достигается все большими экономическими и техническими усилиями, позволяющими применять различные способы ее нормализации и очистки.

Следует отметить, что из всего многообразия способов очистки воды, наилучший результат дают комбинированные, поскольку позволяют удалять примеси разного характера.

Целью работы явился анализ технического аспекта эффективных способов очистки воды с оценкой возможности их комплексного использования.

Аналитический подход к технологиям.

Рассмотрим возможность эффективной очистки воды в специальных устройствах, основанных на вибрационной кавитации и криогенных технологиях. В результате экспериментальных исследований установлено, что для очистки воды от органических и неорганических примесей целесообразно использовать разработанное нами устройство повышенной степени очистки с увеличенным сроком службы, временем регенерации фильтрующего материала [5]. Эффективность его работы зависит от конструктивных особенностей, которые включают две электродные камеры, находящиеся в корпусе из диэлектрического материала и разделенные мембранами, при этом источник кавитационного поля и рабочая камера включаются во второй корпус из пищевого алюминия с внешним холодильником, расположенным соосно под первым корпусом и соединенным с ним патрубком. В рабочей камере устройства для очистки воды установлены источник кавитационного поля и сис-

тема фильтрующих полиамидных стержней с возможностью встряхивания. Схема устройства представлена на рисунке 1.

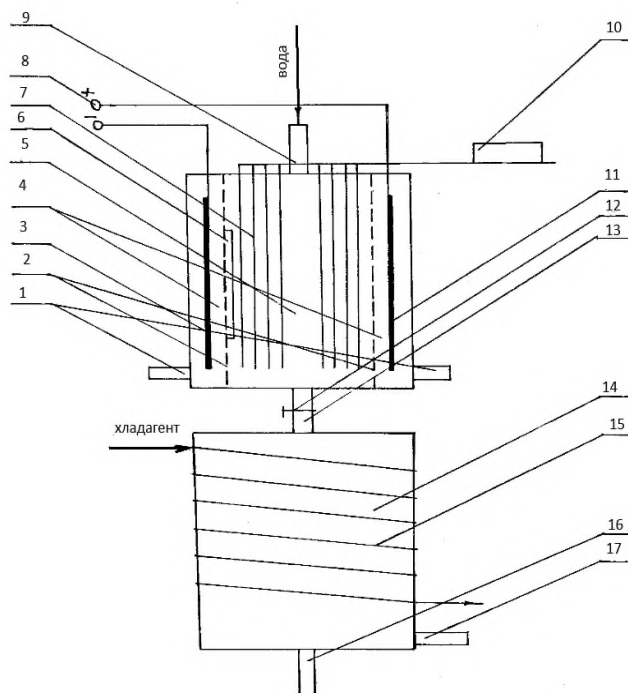


Рис. 1. Схема устройства для очистки воды: 1 – корпус, выполненный из диэлектрического материала, 2-патрубки для подвода воды, 3 – патрубки для подвода и отвода электролита, 4 – электроды, 5 – блок питания, 6 – мембраны, 7 – электродные камеры, 8 – рабочие камеры, 9 – источник кавитационного поля, 10 – система фильтрующих полиамидных стержней, 11 – виброустройство, 12 – корпус из пищевого алюминия, 13 – внешний холодильник, 14, 17, 18 – патрубки, 15 – затвор.

В качестве источника кавитационного поля может быть ультразвуковой излучатель или другое устройство, создающее колебания заданной частоты. Вода подвергается воздействию вибрации, вызывая появление микропузырьков, которые быстро схлопываются, выделяя большое количество энергии в виде микрогидравлических ударов и микровзрывов.

Следует отметить, что при длительной работе устройства для очистки воды на фильтрующем материале системы полиамидных стержней удерживается настолько большое количество загрязнений, что они превращаются в пастообразную массу. Это приводит к увеличению гидравлического сопротивления системы и препятствует протеканию очищаемой воды. Если отключается блок питания и прекращается подача электрического тока на электроды, загрязнения освобождаются и потоком воды вымываются в виде густой массы через выпускной патрубок. Имобилизованные клетки не могут само-

стоятельно преодолеть естественные преграды фильтрующего материала, поэтому для разрушения этих комплексов производится обработка их кавитационным полем. В момент включения источника кавитационного поля исходящие ультразвуковые волны, проходящие через загрязняющие вещества, задержанные на системе фильтрующих полиамидных стержней под действием сил поверхностного натяжения, создают разрывы, принимающие форму пузырьков. Схлопывание кавитационного пузырька вызывает мощную гидравлическую ударную волну, которая оказывает разрушительное действие на органические соединения и микроорганизмы, тем самым, сокращая время регенерации фильтрующих полиамидных стержней и приводя к обезвреживанию полученного концентрата загрязняющих веществ. После этой процедуры происходит замораживание воды при помощи хладагента, протекающего по внешнему холодильнику, до перехода ее в твердую фазу (8-10% массы). Эффект отделения примесей основан на разности температур замерзания чистой воды и примесей. Так как примеси имеют более низкую температуру замерзания, то удаление не замороженной воды позволяет удалять и содержащиеся в ней примеси; оставшаяся часть замороженной воды является очищенной.

В работе описанного устройства заложен способ очистки воды, ранее разработанный и защищенный охранным документом [6]. Замораживание проводят дважды, а именно: сначала до перехода 4-5% (масс.) воды в лед, который удаляют, а затем продолжают замораживать оставшуюся воду в присутствии кавитационного поля. В процессе кавитации происходит перемешивание воды и, как следствие, примеси с более низкой температурой замерзания, чем чистая вода, перемещаются в центральную часть объема, которую после замораживания удаляют в количестве 4-5% (масс.), а вместе с ней и все вредные примеси.

Обсуждение особенностей описанной технологии.

Результаты показали, что при удалении менее 8% воды с примесями получить абсолютно чистую воду не возможно, а удаление более 10% – экономически затратно.

Создание вибрационной кавитации базируется на возможности понижения давления в определенных слоях гидравлического потока, что приводит к образованию пузырьков газа или пара, имеющих возможность менять свой диаметр при прохождении нескольких циклов колебаний [7]. Резкая смена

диаметра в конечном счете приводит к схлопыванию пузырька, создавая высокие температуру и давление в окрестностях этих точек. При этом в центре взрыва оказываются споры бактерий и грибов, загрязняющих воду. Как результат, в области взрыва полностью уничтожается патогенная микрофлора, причем даже споры таких грибов, как *Aspergillus niger*, которые не уничтожает ни ультрафиолет, ни озон.

Процесс очистки воды проводили в устройстве, содержащем электродную камеру с электродами, поэтому одним из технологических параметров процесса явилась напряженность электрического поля.

Известно, что частицы материала искажают электрическое поле, находясь в нем. Поляризуясь и имея отличную от среды диэлектрическую проницаемость, они создают локальные микрополя, увеличение напряженности которых прямо пропорционально увеличению напряженности макроскопического внешнего поля. Связь между этими напряженностями описывается уравнением:

$$E_1 = E + \frac{P}{3\epsilon_0}, \quad (1)$$

а напряжение на электродах определяется зависимостью:

$$\int_k^a E dS = U, \quad (2)$$

где E_1 - напряженность локального микрополя;

E - напряженность внешнего электрического поля;

P - поляризуемость частицы;

ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость;

S - расстояние между электродами (катодом k и анодом a);

U - напряжение на электродах.

Основной причиной миграции частиц к поверхности поляризуемого материала является электрофорез и электростатическое взаимодействие; при этом образуются цепочечные агрегаты, а в местах контакта поляризуемого материала между собой дипольфорез способствует скоплению клеток частиц [8].

При движении отрицательно заряженной сферической частицы в неоднородном электрическом поле на неё действует электрофоретическая сила (F_e), направленная в сторону анода, а на частицу со значительным дипольным моментом действует диэлектрофоретическая сила (F_g), направленная в

зону большей напряженности поля. Вектора этих сил определяются по уравнениям:

$$\overline{F_e} = q\overline{E} = \xi \cdot \varepsilon \cdot r \cdot \overline{E} \quad (3)$$

$$\overline{F_g} = \frac{1}{2} \varepsilon_1 \frac{x_1 - x_2}{x_2 - 2x_1} r^3 \nabla \overline{E_1}^2, \quad (4)$$

где q – заряд клетки;

ξ – дзета-потенциал;

x_1, x_2 – проводимость частицы и среды;

r – радиус частицы;

$\varepsilon, \varepsilon_1$ – диэлектрическая постоянная частицы и среды соответственно;

∇E_1 – градиент напряженности неоднородного локального микрополя.

Поскольку рассматриваются частицы, находящиеся в жидкости, то надо учитывать ещё и силу сопротивления (F_c), определяемую по уравнению Стокса:

$$F_c = 6\pi \cdot r \cdot \eta \cdot v, \quad (5)$$

где v – скорость движения частицы под действием электрического поля, т.е. скорость электрофореза;

η – вязкость жидкости.

В зависимости от того, какая из этих сил будет преобладать над суммой двух других, будет зависеть направление движения частицы, а именно, будет ли она притягиваться к положительно заряженной поляризованной поверхности электрода ($F_e > F_g + F_c$) или будет унесена потоком жидкости ($F_c > F_g + F_e$).

Учитывая, что очищаемая вода содержит микроорганизмы и вещества самой различной природы, способные адсорбироваться на поляризованном диэлектрическом материале, то для очистки воды можно использовать явление электроудерживания.

При изменении режимов, при которых проводилась выше описанная очистка воды, выявлена зависимость эффективности очистки воды от напряженности электрического поля, что отражено на графике (рис. 2), а также оценено влияние толщины фильтрующих стержней на степень удерживания водой загрязняющих веществ (рис. 3).

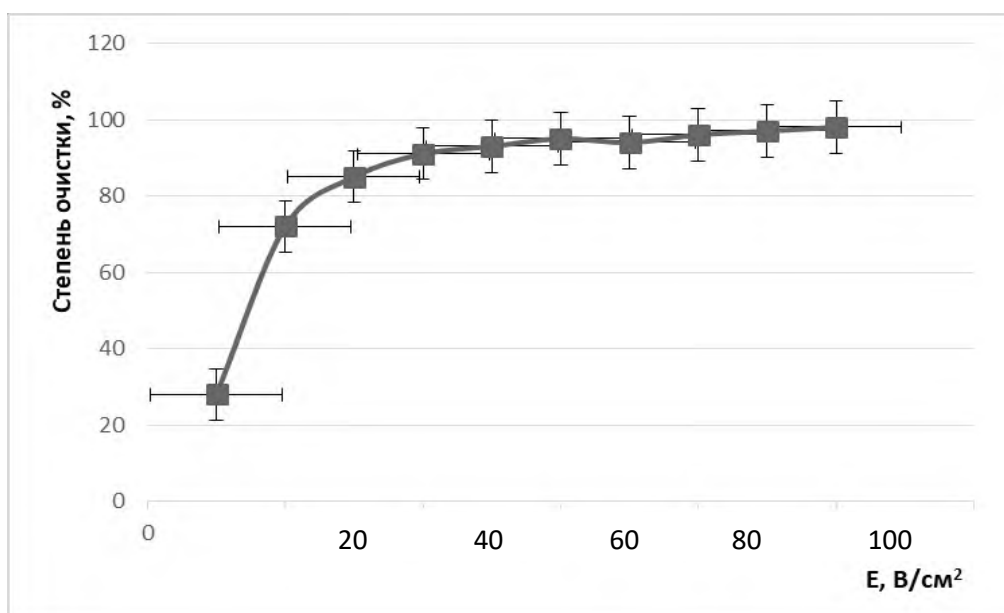


Рис. 2. Влияние напряженности электрического поля на степень очистки.

В результате проведенных экспериментов определены основные технологические режимы очистки воды для разработанной установки, в частности: напряженность электрического поля $E = 30 \dots 50$ В/см, толщина фильтрующих стержней $L = 30 \dots 40$ см, время регенерации фильтра $\tau = 2 \dots 3$ мин, частота колебаний ультразвука $20,3 \dots 23,7$ кГц.

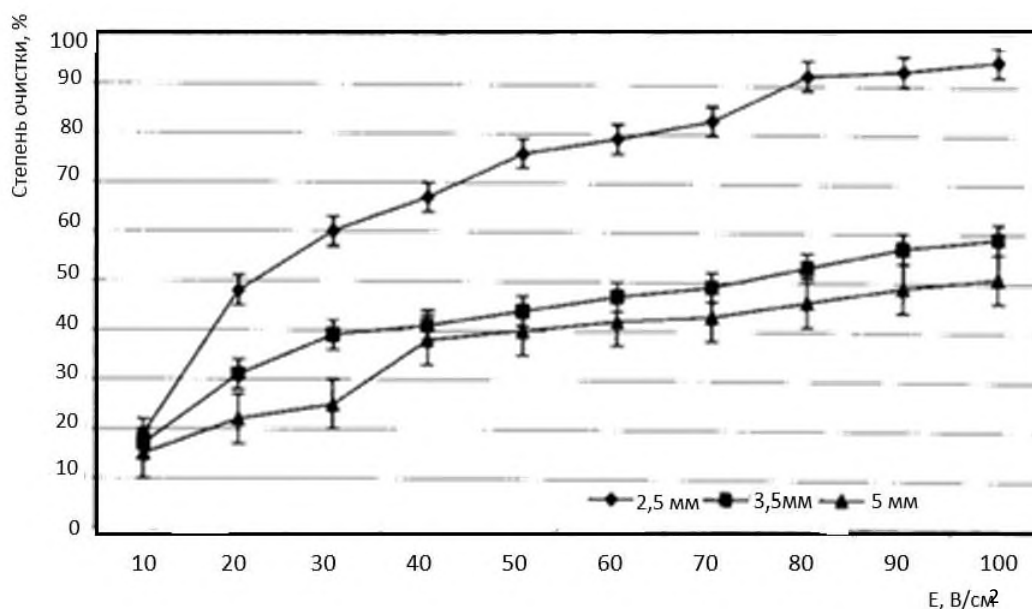


Рис. 3. Влияние толщины фильтрующих стержней на степень удерживания загрязняющих веществ вод.

Физико-химические и микробиологические показатели исследуемой и очищенной воды проводили в соответствии с известными методиками. Результаты сведены в таблицы 1 и 2.

Таблица 1. Физико-химические показатели воды

Показатели	Единицы измерения	Показатели качества воды			
		исходной	при удалении внутренней части замерзшей воды в количестве, (% масс.)		
			4	4,5	5
Силикаты (по Si)	мг/л	14,0	10,0	9,0	10,0
Нитраты (по NO)	-“-	26,0	20,0	5,0	8,0
Железо (Fe, суммарно)	-“-	0,38	0,30	0,28	0,29
Медь (Cu, суммарно)	-“-	1,4	1,00	0,90	0,95
Натрий (Na ⁺)	-“-	280	200	20	24
Селен (Se, суммарно)	-“-	0,026	0,010	0,009	0,010
Свинец (Pb, суммарно)	-“-	0,012	0,010	0,005	0,010
Цинк (Zn ²⁺)	-“-	8	5	3	4
Бор (B, суммарно)	-“-	0,61	0,50	0,30	0,40
Мышьяк (As, суммарно)	-“-	0,019	0,010	0,006	0,007

Таким образом, представлен технический аспект вибрационной кавитации для микробиологической очистки воды в рамках рационального природопользования, заключающийся в комплексном использовании её с криотехнологиями.

Были исследованы влияния кавитационного поля на скорость очистки воды, напряженности электрического поля на степень очистки воды, толщины замороженного слоя на степень очистки воды, толщины фильтрующего материала на степень очистки воды, скорость подачи сжатого воздуха на скорость очистки воды, которые показали, что в современных условиях совершенствование и соответствие техники и технологии требованиям научно-технического прогресса во многом обуславливают уровень качества. В данном случае симбиоз кавитации и криотехнологии позволил провести очистку загрязненных вод до качества чистой питьевой воды.

Таблица 2. Микробиологические показатели очищенной воды

Показатели	Едини- цы из- мерения	Показатели качества воды при удалении поверхностной замерзшей воды и в ко- личестве (% масс.)			
		исходной	4,0	4,5	5,0
Микробиологические и паразитологические показатели					
а) бактериологические показатели:					
ОМЧ при температуре 37°С	КОЕ/мл	24	24	20	22
ОМЧ при температуре 22°С		125	120	105	110
Общие колиформные бактерии	КОЕ/ 100 мл	отсутствие в 250 мл	отсутствие в 280 мл	отсутствие в 300 мл	отсутствие в 290 мл
Споры сульфитреду- цирующих клостридий		отсутствие в 15 мл	отсутствие в 15 мл	отсутствие в 20 мл	отсутствие в 20 мл
Aspergiliuss niger		отсутствие в 15 мл	отсутствие в 20 мл	отсутствие в 20 мл	отсутствие в 30 мл
Pseudomonas aeruginosa		отсутствие в 800 мл	отсутствие в 900 мл	отсутствие в 1500 мл	отсутствие в 1000 мл
б) вирусологические показатели:					
Колифаги	БОЕ/ 100 мл	отсутствие в 800 мл	отсутствие в 9000 мл	отсутствие в 1700 мл	отсутствие в 1000 мл
в) паразитарные показатели:					
Ооцисты крипто- споридий	кол-во/ 50 л	2	отсутствие	отсутствие	отсутствие
Цисты лямблий		1	отсутствие	отсутствие	отсутствие
Яйца гельминтов		1	отсутствие	отсутствие	отсутствие

Заключение

Рациональное природопользование при очистке воды требует комплексного подхода, сочетающего технологические инновации, эколого-экономический анализ и соблюдение принципов устойчивого развития. Такое взаимодействие обеспечит долгосрочную защиту водных ресурсов и здоровье будущих поколений, поэтому полученные результаты показывают необходимость продолжения поиска комбинированных научных решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Евгения Скалей. RAEX назвало компании, которые рационально используют водные ресурсы // [Новости на тему: Экология - Новости и аналитика Центральной Азии](https://cronos.asia/ekologiya). 29.01.2025 URL: <https://cronos.asia/ekologiya> (дата обращения: 02.02.2025).

2. Иванова А.П., Межуева Л.В., Пискарева Т.И., Гунько В.В., Быков А.В. Декомпозиционный подход к надежности технической системы. Вестник ОГУ. 2011. №10(129): 280-283.
3. Цымбалов А.С., Блиничев В.Н. Влияние конструктивно – режимных параметров на кавитационное воздействие. Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2018. №4 (56): 100-106.
4. Котухов А.В. и др. Комбинированный метод исследования акустической кавитации. Доклады БГУИР. 2020. Т. 18, № 4: 80-88. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-4-80-88>.
5. Быков А.В., Межуева Л.В., Быкова Л.А. и др. Устройство для очистки воды. Патент РФ 2314264. Бюл., 2008. №1.
6. Бондаренко В.А., Касперович В.Л., Межуева Л.В. Способ очистки воды. Патент РФ 2282596. Бюл., 2006. №24.
7. Худайкулов С.И., Муминов О.А. Моделирования максимальной скорости потока вызывающей кавитацию и резкой перестройки потока. Universum: технические науки: электрон. науч. журн. 2022. 2(95). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/13126> (дата обращения: 15.01.2025).
8. Рез И.С., Поплавко Ю.М. Диэлектрики. Основные свойства и применение в электронике. М.: Радио и связь, 1989. 288 с. ISBN 5-256-00235-X.

Поступила 21 марта 2025 г.

(Контактная информация: **Межуева Лариса Владимировна** – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела геоэкологии Оренбургского федерального исследовательского центра УрО РАН; адрес: Россия, 460014, Оренбург, ул. Набережная, д. 29, а/я 59; тел./факс (3532) 77-06-60 e-mail: larisam57@mail.ru);

Иванова Анастасия Петровна – профессор, доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»; адрес: Россия, 460000, Оренбург, пр-кт Победы, д. 13; e-mail: ivaanastassia27@mail.ru;

Быков Артем Владимирович – доктор биологических наук, доцент, зав. кафедрой ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»; e-mail: artem19782@yandex.ru;

Гунько Никита Максимович – аспирант ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»; e-mail: tngmnik2001@mail.ru)

REFERENCES

1. Evgeniya Skaley. RAEX named companies that efficiently use water resources. News on the topic: Ecology - News and analytics of Central Asia. 29.01.2025. URL: <https://cronos.asia/ekologiya> (accessed: 02.02.2025).
2. Ivanova A.P., Mezhueva L.V., Piskareva T.I., Gunko V.V., Bykov A.V. Decomposition approach to the reliability of a technical system . Bulletin of OGU. 2011. 10(129): 280-283.
3. Tsymbalov A.S., Blinichev V.N. Influence of design and operating parameters on cavitation effect. Modern High-Tech Technologies. Regional application. 2018. No. 4 (56): 100-106
4. Kotukhov A.V. et al. Combined method for studying acoustic cavitation. Reports of BSUIR. 2020. Vol. 18, No. 4: 80-88. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-4-80-88>.
5. Bykov A.V., Mezhueva L.V., Bykova L.A. et al. Device for water purification. Patent of the Russian Federation 2314264. Bull., 2008. No. 1.
6. Bondarenko V.A., Kasperovich V.L., Mezhueva L.V. Method of water purification. Patent of the Russian Federation 2282596. Bull., 2006. No. 24.
7. Khudaikulov S.I., Muminov O.A. Modeling the Maximum Flow Velocity Causing Cavitation and Sudden Flow Reorganization. Universum: Technical Sciences: Electronic Scientific Journal. 2022. 2(95). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/13126> (accessed: 15.01.2025).

8. Rez I.S., Poplavko Yu.M. Dielectrics. Basic Properties and Applications in Electronics. Moscow: Radio and Communication, 1989. 288 p. ISBN 5-256-00235-X.

Образец ссылки на статью:

Межуева Л.В., Иванова А.П., Быков А.В., Гунько Н.М. Технический аспект вибрационной кавитации для микробиологической очистки воды в рамках рационального природопользования. Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН 2025. 1. 12с. [Электр. ресурс] (URL: <http://elmag.uran.ru:9673/magazine/Numbers/2025-1/Articles/MLV-2025-1.pdf>). DOI: 10.24411/2304-9081-2025-11005.