

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ АРТЕЗИАНСКИХ ВОД

А.Ю. Курбатов¹

Е.Н. Кузин¹

Ю.М. Аверина¹

М.А. Ветрова¹

А.В. Ситников²

kurbatov@muctr.ru

e.n.kuzin@muctr.ru

averinajm@mail.ru

margo.vetrova@list.ru

sit_irina@mail.ru

¹ РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Российская Федерация

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Цель работы — исследование процессов гидродинамической обработки природной (артезианской) воды для ее использования в хозяйственно-бытовых и питьевых целях. Основное преимущество гидродинамической обработки природных вод состоит в том, что все наиболее важные процессы, необходимые для подготовки воды соответствующего качества (обезжелезивание, деманганация, аэрация), можно проводить с использованием только одного устройства — так называемого гидродинамического генератора колебаний — без применения каких-либо дополнительных реагентов. Гидродинамический генератор колебаний способствует ускорению массообменных процессов без применения дополнительных химических реагентов, используя только кинетическую энергию потока обрабатываемой природной воды, полученную при резком изменении гидродинамических характеристик самого потока. Генератор не очищает воду, а осуществляет обработку природной воды для получения в ней нерастворимых продуктов за счет рекомбинации форм удаляемых веществ, а именно: перевод растворенных соединений марганца и железа в нерастворимые, снижение содержания углекислого газа в воде в целях процесса выделения нерастворимых соединений кальция. Образовавшиеся нерастворимые соединения могут быть легко удалены в процессе дальнейшей фильтрации на керамическом мембранном фильтре. Эффективность работы гидродинамического генератора колебаний зависит от мно-

Ключевые слова

Очистка воды, кавитация, гидродинамическая обработка, установка очистки воды, спектр акустических частот

гих факторов, следовательно, необходимым этапом при организации наиболее эффективной гидродинамической обработки природных вод в реальных условиях является получение основополагающих закономерностей ее проведения от сопутствующих параметрических характеристик. В рамках эксперимента подтверждено наличие явления сонолюминесценции в природной воде при ее гидродинамической обработке. Предложена технология мониторинга, косвенно подтверждающая эффективность осуществляемого процесса гидродинамической обработки природных вод, основанного на фиксации явления сонолюминесценции акустическим методом

Поступила 13.05.2020

Принята 23.06.2020

© Автор(ы), 2021

Работа выполнена в рамках программы поддержки молодых ученых-преподавателей РХТУ им. Д.И. Менделеева (заявка К-2020-015)

Введение. В настоящее время приоритетной задачей процессов децентрализованной водоподготовки является применение наиболее экологичных и высокоэффективных методов очистки природных вод.

Использование связанных с кавитацией процессов при водоподготовке артезианской воды позволяет интенсифицировать окисление ионов марганца и железа, а также отказаться от применения различных химических реагентов. К основным преимуществам кавитационной обработки воды необходимо отнести высокую скорость процесса (минимальное время контакта и максимальная площадь соприкосновения фаз вода/воздух) и равномерность (стабильность) процесса во всем объеме жидкости и интервале времени [1].

Для создания кавитационных эффектов в процессе обработки воды применяют гидродинамический генератор колебаний (ГДГК), который позволяет одновременно осуществлять обезжелезивание, деманганацию, частичное умягчение и дегазацию. Кроме того, несомненным преимуществом гидродинамической обработки воды является ее обеззараживание [2, 3].

Одним из недостатков кавитационной обработки воды является тот факт, что при однократном проходе обрабатываемой воды через ГДГК применение процесса кавитации целесообразно только при относительно невысоком начальном содержании в обрабатываемой воде загрязняющих веществ — до 3 мг/л Fe^{2+} . При высоком начальном содержании веществ после первого прохода обрабатываемой воды через ГДГК в ней значительно уменьшается содержание растворенного кислорода вследствие дегазации жидкости, сопутствующей кавитации. В противовес отмеченному недо-

статку следует отметить, что гидродинамическую обработку природных вод можно проводить многократно, чередуя обработку без эжектирования воздуха в рабочую камеру ГДГК с эжектированием [4].

Основными недостатками распространенных в настоящее время технологий обработки природных вод является экологичность процесса водоподготовки наряду с узким диапазоном исходных параметров обрабатываемой природной воды. В качестве основных методов обезжелезивания и деманганации, применяемых в системах водоснабжения, используют [5] озонирование, хлорирование (реагентную обработку), упрощенную аэрацию, фильтрацию на каталитических или ионообменных загрузках, обратный осмос.

Несмотря на относительно высокую эффективность перечисленных методов, каждый из них имеет недостатки. Так, применение озона требует эксплуатации сложного электрического оборудования, а также обеспечения мер по обезвреживанию остаточного озона, поскольку он весьма токсичен (класс опасности 1). При использовании реагентных методов необходима постоянная закупка реагентов, организация площадей под их хранение, а главное возможность образования токсичных или плохо пахнущих веществ в процессе окисления железа (например, хлорфенолы). Кроме того, применение реагентов сопровождается увеличением габаритов системы в целом за счет использования емкостей, смесителей, насосов дозаторов и приборов контроля остаточного окислителя. Упрощенная аэрация не дает гарантии достижения заданных нормативов по содержанию железа/марганца и оставляет вопрос приобретения новой и утилизации отработанной фильтрующей загрузки (кварцевый песок).

Фильтрация на каталитических загрузках или ионообменное обезжелезивание достаточно эффективны, однако необходима регулярная регенерация (замена) фильтрующих загрузок, что требует применения дополнительных реагентов и значительно усложняет аппаратную схему. В свою очередь, для систем обратного осмоса наличие в воде окисленных соединений железа (III) (достаточно часто встречаются в артезианской воде) является прямым противопоказанием, так как последние могут забить поры или повредить мембрану, что потребует приобретения дорогостоящей комплектующей.

При использовании метода обработки природных вод с применением ГДГК отсутствует вопрос сложности системы или ее значительных габаритов, так как ГДГК прост и надежен в процессе обработки воды. Расход электроэнергии на работу ГДГК сопоставим с традиционными методами очистки и значительно ниже, чем при эксплуатации озонирующего или обратно-

осмотического оборудования. Кроме того, при использовании такой технологии отсутствуют реагентные затраты, а процесс обслуживания системы или замены ГДГК максимально упрощен.

Цель работы — исследование возможностей многофункционального ГДГК, а также косвенное определение изменения эффективности его работы в процессе гидродинамической обработки природных вод.

Методы исследования. Схема ГДГК, собранного в лаборатории кафедры инновационных материалов и защиты от коррозии РХТУ им. Д.И. Менделеева, приведена на рис. 1. Определение суммарного содержания металлов проводили на атомно-адсорбционном спектрометре ААС А-2 (Аквилон, Российская Федерация). Селективное определение различных форм железа (Fe^{2+} и Fe^{3+}) выполняли спектрофотометрически на портативном спектрофотометре DR 900 (НАСН, США). Определение общей жесткости и минерализации проводили в соответствии с ГОСТ 31954–2012* и ГОСТ 18164–72**.

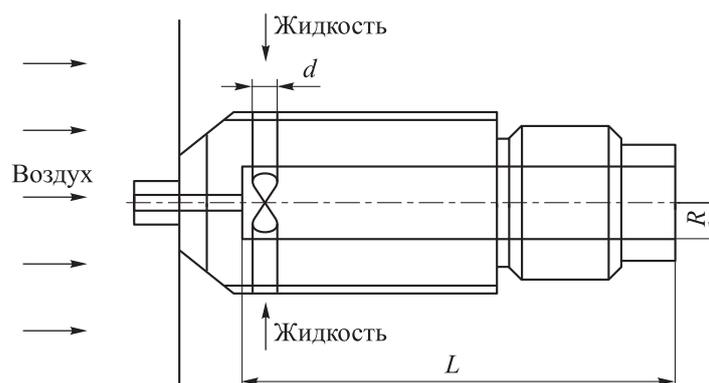


Рис. 1. Принципиальная схема ГДГК:

d — диаметр входного канала рабочей камеры (ПК); R — радиус ПК; L — длина ПК

Гидродинамический генератор колебаний представляет собой устройство, состоящее из цилиндрической полости, рабочей камеры (ПК), в которую тангенциально через входные каналы подается поток обрабатываемой воды. Ключевой параметр процесса обработки — гидродинамическая характеристика потока подачи воды и объем «подсасываемого» воздуха в ПК.

* ГОСТ 31954–2012. Вода питьевая. Методы определения жесткости. М., Стандартинформ. 2018.

** ГОСТ 18164–72. Вода питьевая. Метод определения содержания сухого остатка, М., Стандартинформ. 2010.

Внутри РК происходит центростремительное закручивание движущегося потока воды. При достижении заданных условиями эксперимента параметров в потоке движущейся жидкости начинают образовываться «разрывы сплошности», приводящие к образованию пульсирующей каверны и кавитационных пузырьков [6]. При этом «разрыв сплошности» потока способствует образованию зоны разрежения, находящейся по оси движения потока воды, где может происходить дополнительное самопроизвольное эжектирование воздуха (при необходимости).

Интенсификация массообменных процессов внутри ГДГК осуществляется за счет собственной кинетической энергии потока обрабатываемой воды — за счет закручивания этого потока. При наличии дополнительной контактной камеры сразу после ГДГК при прохождении потока жидкости через ГДГК и контактную камеру появляются так называемые волновые эффекты [7], внешне напоминающие бурное «кипение» жидкости во всем ее объеме. Указанный волновой эффект возникает в результате того, что геометрические размеры применяемого ГДГК рассчитаны так, что генерируемая частота звуковых колебаний совпадает с собственной частотой колебаний двухфазной среды вода/воздух в применяемой контактной камере. При этом происходит дополнительное увеличение скорости массообменных процессов, повышается дисперсность, происходит интенсивное направленное движение газовых пузырьков [8]. Настоящий эксперимент проводился без применения контактной камеры.

Эффективность обработки природной воды напрямую зависит от эффективности работы главного элемента установки — ГДГК. Генератор не проводит очистку, он лишь осуществляет гидродинамическую обработку природной воды в целях перевода растворенных соединений марганца и железа в нерастворимые, изменения содержания углекислого газа в воде для частичного выделения нерастворимых форм солей жесткости для их дальнейшей фильтрации.

После обработки природной воды в модуле ГДГК проводят ее механическую фильтрацию для извлечения образовавшихся окисленных/нерастворимых соединений. Процесс фильтрации осуществляли на трубчатом керамическом мембранном фильтре для удаления окисленных и нерастворимых соединений [9].

Результаты и их обсуждение. Эффективность гидродинамической обработки оценивали по изменению концентраций ионов Fe^{2+} и Fe^{3+} в обрабатываемой воде. Исследуемая вода (артезианская) отобрана из скважины глубиной 62 м (Калужская обл., Боровский район, деревня

Беницы). Перед началом экспериментов провели химический экспресс-анализ состава воды. Химический анализ воды и результаты по основным показателям приведены в табл. 1.

Таблица 1

Химический анализ воды

Показатель	Номер пробы			ПДК СанПиН 2.1.4.1074–01
	1	2	3	
рН	7,28	7,25	7,3	6–9
Общее солесодержание, мг/л	382	394	387	1000
Электропроводность, мкСм/м	840	832	841	*Не норм.
Концентрация, мг/л:				
железо общее	3,4	3,25	3,33	0,3
железо Fe ²⁺	2,8	2,75	2,8	*Не норм.
марганец Mn ²⁺	0,14	0,137	0,14	0,1
Жесткость общая, мг-экв/л	6,7	6,4	6,2	7,0

На отобранной воде проводили оценку влияния режимов гидродинамической обработки на эффективность окисления ионов железа Fe²⁺. Кроме того, в процессе обработки оценивали изменения оставшихся химических показателей воды. Показатели эксперимента и полученный результат приведены в табл. 2. Обработка воды проводилась за один проход через ГДГК без дополнительного эжектирования воздуха.

Таблица 2

Значения показателей эксперимента

Показатель	Исходная вода	Номер пробы				
		1	2	3	4	5
<i>Параметры эксперимента</i>						
Давление, атм	1	7,5	9	12	14,5	16,5
Расход воды, м ³ /ч	0,1	0,96	1,06	1,20	1,33	1,40
Расчетная скорость, м/с	2,62	25,11	27,69	31,39	34,87	36,57
<i>Изменение концентраций загрязняющих веществ</i>						
Концентрация, мг/л:						
железо общее	3,33	2,12	1,45	0,99	0,45	0,75
железо Fe ²⁺	2,78	2,12	1,45	0,99	0,45	0,75
марганец Mn ²⁺	0,14	0,11	0,1	0,085	0,06	0,065
сероводород	0,003	0,001	0	0	0	0
Жесткость, мг-экв/л	6,43	6,38	6,13	5,92	5,24	5,45
Солесодержание, мг/л	387,67	384	378	374	352	361

При увеличении прохождения скорости жидкости через ГДГК эффективность очистки по всем контролируемым показателям возрастает. Отмечено, что фильтрация через керамический мембранный фильтр позволяет на 100 % выделить из воды коллоидные соединения железа.

При увеличении скорости потока жидкости до 35 м/с наблюдается стабильное увеличение эффективности очистки по всем исследуемым показателям, однако дальнейшее повышение скорости пропускания жидкости (> 38 м/с) снижает эффективность очистки. Это, вероятно, связано с изменением режима схлопывания кавитационных пузырьков в обрабатываемой воде.

При высоких значениях концентрации железа Fe^{2+} в обрабатываемой воде (> 3 мг/л) необходимо провести двукратный проход обрабатываемой воды через ГДГК в целях получения очищенной воды, соответствующей нормам СанПиН 2.1.4.1074–01*.

Для повышения эффективности очистки воды от соединений железа в рамках однократного пропускания через ГДГК в обрабатываемую воду дополнительно вводили воздушную смесь. Это технологическое решение позволило повысить эффективность и увеличить практическую значимость применения ГДГК за счет выхода на более широкий диапазон начальных значений концентраций загрязняющих веществ, в частности соединений железа Fe^{2+} . Этот процесс будет наиболее эффективен для холодных артезианских вод (температура 4 °С), так как концентрация растворенного кислорода в них может достигать 13...14 мг/л [10].

Расход эжектируемого воздуха в рабочую камеру ГДГК регулировался ротаметром. На основании экспериментов получена зависимость остаточного содержания ионов железа Fe^{2+} от объема воздуха (объем газа V_T / объемом жидкости $V_{ж}$). Скорость движения потока обрабатываемой воды около 38 м/с. Полученная зависимость приведена на рис. 2. Оптимальным соотношением $V_T/V_{ж}$ является диапазон 4...5 %. Это связано с тем, что после увеличения растворенного кислорода в обрабатываемой воде начинается лавинообразное снижение эффекта кавитации за счет изменения гидродинамики потока обрабатываемой воды в ГДГК.

В нескольких экспериментах отмечено полное окисление всех содержащихся в обрабатываемой воде ионов железа Fe^{2+} за один проход через

* СанПиН 2.1.4.1074–01 Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности.

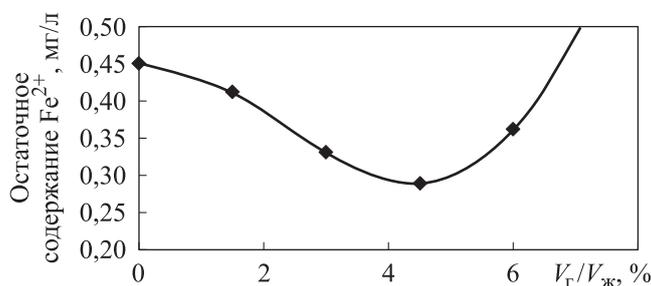


Рис. 2. Зависимость остаточного содержания ионов железа Fe^{2+} от объема добавленного воздуха в рабочую камеру ГДГК

ГДГК. Эти эксперименты соответствовали скорости потока во входных тангенциальных каналах 34...36 м/с. Такое явление можно объяснить изменением характера схлопывания кавитационных пузырьков, порожденных хвостовой нестационарной частью каверны. В процессе математической обработки данных определено, что при схлопывании кавитационных пузырьков выделяющейся в пространство энергии достаточно для возбуждения, диссоциации и ионизации молекул воды и газов [11]. Возможность протекания в процессе кавитационной обработки таких физических процессов, как люминесценция и генерация звуковых колебаний, отмечена в [12–15].

Люминесценция протекает и при схлопывании кавитационных пузырьков. В процессе схлопывания в локальных точках могут регистрироваться скачки давления (до 50 000 атм) и температуры (до 50 000 °С), а испускаемый свет (сонолюминесценция) теоретически сопоставим с излучением абсолютно черного тела с температурой примерно 6 000 °С (за вычетом ультрафиолетовой составляющей) [16]. Указанное явление также можно объяснить неустойчивостью молекул и их «стремлением» испустить энергию в пространство в виде фотонного излучения и теплоты в результате столкновений с другими частицами или в процессе диссоциации для стабилизации [17, 18].

Характер схлопывания кавитационных пузырьков, которые образуются за пределами каверны, является ключевым фактором процесса, определяющим описанный выше эффект. Делаем промежуточный вывод о том, что конкретное ГДГК при указанных гидродинамических характеристиках генерирует изменение пульсации каверны с образованием особого, нестационарного характера движения в части ее «хвоста» [19].

Для подтверждения возникновения сонолюминесценции при обработке воды только ГДГК при заданных параметрах (34...36 м/с) была со-

брана светоизолированная ячейка [20], оснащенная фотоэлектронным умножителем (*Phillips XP1110*), соединенным через усилитель с осциллографом (С1-112А, HVPS-320). Принципиальная схема разработанной установки приведена на рис. 3.

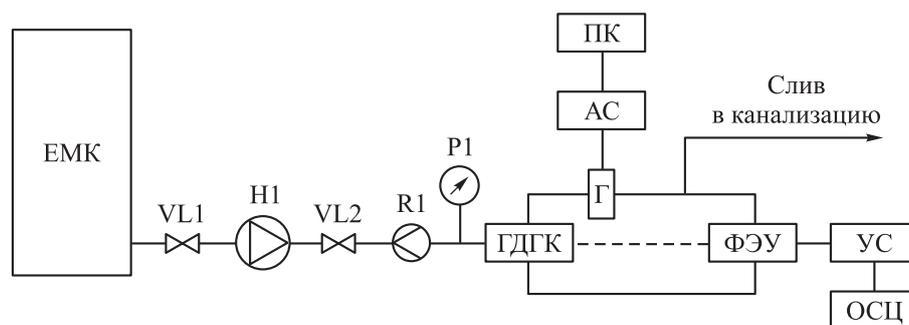


Рис. 3. Система регистрации сонолюминесценции в условиях гидродинамической обработки воды:

ЕМК — емкость; VL1 — кран шаровый; Н1 — насос; VL2 — кран шаровый; R1 — расходомер; P1 — манометр; ПК — персональный компьютер; АС — анализатор спектра; Г — гидрофон; ФЭУ — фотоэлектронный умножитель; УС — усилитель сигнала; ОСЦ — осциллограф

Возникновение сонолюминесценции (вспышек света) в процессе гидродинамической обработки воды вызывает электрический сигнал на осциллографе, полученный с помощью фотоэлектронного умножителя. Частота регистрируемых в ходе эксперимента вспышек света находилась в диапазоне 640...660 Гц. Регистрация спектра акустических частот, образующихся в процессе гидродинамической обработки воды, осуществлялась с использованием анализатора акустического спектра с частотой дискретизации 250 кГц и гидрофона ВС-312, установленного в ячейку напротив ГДГК. Полученные с анализатора спектра данные обрабатывали с помощью ПО *ZETLab*.

Спектры акустических колебаний регистрировали для каждого гидродинамического режима работы ГДГК со схожими параметрами, при которых изредка фиксировались вспышки света на осциллографе. Полученные частотные характеристики ГДГК в интересующих параметрах обработки потока воды приведены на рис. 4.

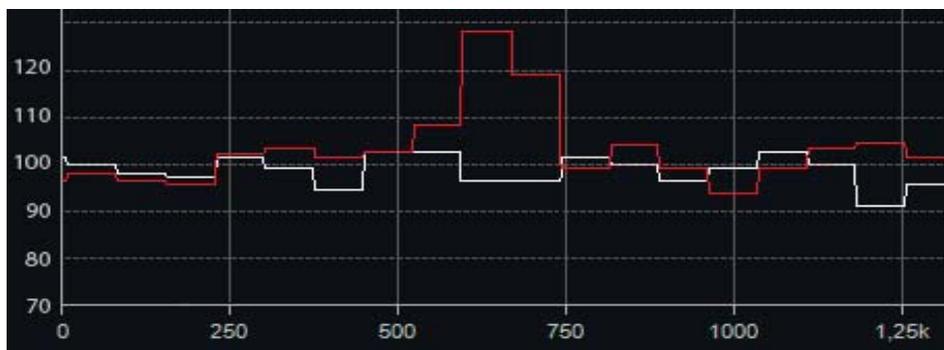
В процессе работы ГДГК при скорости жидкости около 34 м/с и давлении 13 атм удавалось изредка зафиксировать пик в диапазоне частот 620...680 Гц. На основании полученных данных сформулировано следующее предположение: наличие указанного пика на частотных характеристиках в этом диапазоне и только для рассматриваемого ГДГК может



a



б



в

Рис. 4. Соотношение спектров акустических частот, генерируемых при прохождении воды через ГДГК (красная линия) и воды при тех же гидродинамических параметрах в системе без ГДГК (белая линия) при скорости потока 34 м/с, давлении 13 атм (*a*), скорости потока 31 м/с, давлении 16,5 атм (*б*), скорости потока 37 м/с, давлении 16,5 атм (*в*)

косвенно свидетельствовать об изменении режимов схлопывания кавитационных пузырьков, образующихся в обрабатываемой воде в процессе ее гидродинамической обработки с использованием устройства. В свою очередь, этот пик подтверждает наличие сонолюминесценции, свиде-

тельствующее о более «жестких» кавитационных явлениях (изменение пульсации каверны) в обрабатываемой воде [21]. Сопоставление наличия пика на частотной характеристике конкретного ГДГК с установленным ранее наличием сонолюминесценции при работе этого ГДГК может быть косвенным параметром контроля эффективности проведения процессов гидродинамической обработки природных вод.

Заключение. На основании результатов экспериментов получены зависимости эффективности гидроакустической обработки артезианской воды в процессах ее водоподготовки. Доказана высокая степень окисления и удаления соединений железа при последовательной гидродинамической обработке и фильтрации на керамических мембранных фильтрах.

Установлены закономерности влияния растворенного кислорода на эффективность процессов окисления и удаления типовых загрязняющих веществ из образца артезианской воды.

Доказана возможность повышения эффективности работы гидродинамического генератора при достижении определенных жестких условий (температура, давление) на границе раздела фаз вода/схлопывающийся пузырек/загрязняющее вещество.

Предложена методика косвенного контроля условий гидродинамического процесса обработки природных вод с использованием ГДГК на базе системы регистрации сонолюминесценции с применением фотоэлектронного умножителя в сопоставлении с частотной характеристикой, генерируемой ГДГК в процессе его работы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Федоткин И.М., Оржельский И.В. Новые физические эффекты, их использование и перспектива. Кн. 7. Физические эффекты при гидродинамической кавитации и их практическое использование. Киев, ГМВКК, 2001.
- [2] Кнэпп Р., Дейли Дж., Хэммит Ф. Кавитация. М., Мир, 1974.
- [3] Kosel J., Gutiérrez-Aguirre I., Rački N., et al. Efficient in activation of MS-2 virus in water by hydrodynamic cavitation. *Water Res.*, 2017, vol. 124, pp. 465–471. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.077>
- [4] Курбатов А.Ю., Аснис Н.А., Баталов Р.С. и др. Способ очистки воды. Патент РФ 2525177. Заявл. 28.11.2012, опубл. 10.08.2014.
- [5] Золотова Е.Ф., Асс Г.Ю. Очистка воды от железа, марганца, фтора и сероводорода. М., Стройиздат, 1975.
- [6] Авдудевский В.С., Ганиев Р.Ф., Калашников Г.А. и др. Гидродинамический генератор колебаний. Патент РФ 2015749. Заявл. 04.10.1991, опубл. 15.07.1994.

- [7] Украинский Л.Е. Динамические основы волновой технологии. Дис. ... д-ра техн. наук. М., МАИ, 2006.
- [8] Ганиев Р.Ф., ред. Волновая техника и технология. Научные основы, промышленные испытания и их результаты, перспективы использования. М., Логос, 1993.
- [9] Averina J.M., Kaliakina G.E., Zhukov D.Y., et al. Development and design of a closed water use cycle. *Proc. SGEM*, 2019, vol. 19, no. 3-1, pp. 145–152.
DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2019/3.1/S12.019>
- [10] Лутфуллаева Н.Б., Аширбекова Д.Р. Интенсификация процесса очистки вод. *Высшая школа*, 2017, № 1, с. 127–128.
- [11] Промтов М.А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов. *Вестник ТГТУ*, 2008, т. 14, № 4, с. 861–869.
- [12] Дежжунов Н.В. Связь порога кавитации и максимальной интенсивности звуколюминесценции. *Письма в ЖТФ*, 2008, № 8, с. 59–67.
- [13] Костров С.А. Автоколебательные режимы движения в системах с жидкостью и газом. М., Ин-т машиностроения, 1988.
- [14] Ганиев Р.Ф., ред. Колебательные явления в многофазных средах и их использование в технологии. Киев, Техника, 1960.
- [15] Маргулис М.А. Сонолюминесценция. *УФН*, 2000, т. 170, № 3, с. 263–287.
DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.0170.200003c.0263>
- [16] Кривоуцкий А.С., Кулагин В.А. Изменение физико-химических свойств воды под воздействием гидродинамической кавитации. *Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения. Мат. НПК. Вып. IX*. Красноярск, КГТУ, 2003, с. 61–74.
- [17] Сиротюк М.Г. Экспериментальные исследования ультразвуковой кавитации. В кн.: *Мощные ультразвуковые поля*. М., Наука, 1968, с. 168–220.
- [18] Averina J.M., Zhukov D.Y., Kurbatov A.Y., et al. Methods of intensification of iron — contain in natural water purification processes. *Proc. SGEM*, 2018, vol. 18, no. 1-5, pp. 345–350.
- [19] Левковский Ю.Л. Структура кавитационных течений. Л., Судостроение, 1978.
- [20] Балабышко А.М., Зимин А.И., Ружицкий В.П. Гидромеханическое диспергирование. М., Наука, 1998.
- [21] Пирсол И. Кавитация. М., Мир, 1975.

Курбатов Андрей Юрьевич — канд. техн. наук, ассистент кафедры инновационных материалов и защиты от коррозии РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9).

Кузин Евгений Николаевич — канд. техн. наук, доцент кафедры промышленной экологии РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9).

Аверина Юлия Михайловна — канд. техн. наук, доцент кафедры инновационных материалов и защиты от коррозии РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9).

Ветрова Маргарита Александровна — студентка магистратуры кафедры инновационных материалов и защиты от коррозии РХТУ им. Д.И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9).

Ситников Алексей Викторович — старший преподаватель кафедры «Электротехника и промышленная электроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Курбатов А.Ю., Кузин Е.Н., Аверина Ю.М. и др. Исследование процессов гидродинамической очистки артезианских вод. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2021, № 2 (95), с. 118–133.

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2021-2-118-133>

INVESTIGATING THE PROCESSES OF HYDRODYNAMIC ARTESIAN WATER TREATMENT

A.Yu. Kurbatov¹

E.N. Kuzin¹

Yu.M. Averina¹

M.A. Vetrova¹

A.V. Sitnikov²

kurbatov@muctr.ru

e.n.kuzin@muctr.ru

averinajm@mail.ru

margo.vetrova@list.ru

sit_irina@mail.ru

¹ D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia,

Moscow, Russian Federation

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper aims to investigate hydrodynamic treatment processes of raw (artesian) groundwater to be used for household needs and drinking. The main advantage of hydrodynamic raw water treatment is that a single device, a so-called hydrodynamic vibration generator, is enough to perform the most important processing (deferrization, manganese removal, aeration) without any additional reactants. A hydrodynamic vibration generator contributes to accelerating mass exchange processes without using additional chemical reactants, solely by means of the kinetic energy inherent in the raw water flow undergoing treatment, which is generated when the

Keywords

Water purification, cavitation, hydrodynamic treatment, water purification plant, acoustic frequency spectrum

hydrodynamic properties of the flow itself change dramatically. The generator by itself does not purify water; it processes raw water so as to derive insoluble products by recombining the forms in which the substances to be removed are found in the water, that is, by transforming dissolved manganese and iron compounds into insoluble compounds and decreasing carbon dioxide content in the water so as to precipitate insoluble calcium compounds. The resulting insoluble compounds are easy to remove via further processing in a ceramic membrane filtration system. Hydrodynamic vibration generator efficiency depends on many factors, which means that, when implementing hydrodynamic raw water treatment in real life, obtaining fundamental laws governing the treatment processes as functions of respective parametric characteristics is a necessary stage so as to ensure maximum efficiency. Our experiment confirmed that a phenomenon known as sonoluminescence occurs in raw water subjected to hydrodynamic treatment. We propose a monitoring technology indirectly confirming the efficiency of the hydrodynamic raw water treatment implemented, which is based on recording the sonoluminescence phenomenon via an acoustic technique

Received 13.05.2020

Accepted 23.06.2020

© Author(s), 2021

The study was enabled by the support program targeting young researcher teachers in D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (application K-2020-015)

REFERENCES

- [1] Fedotkin I.M., Orzhelskiy I.V. *Novye fizicheskie efekty, ikh ispol'zovanie i perspektiva*. Kn. 7. *Fizicheskie efekty pri gidrodinamicheskoy kavitatsii i ikh prakticheskoe ispol'zovanie*. [New physical effects, their use and perspective. P. 7. *Physical effects of hydrodynamic cavitation and their practical application*]. Kiev, GMVKK, 2001.
- [2] Knapp R.T., Daily J.W., Hammitt F.G. *Cavitation*. McGraw Hill, 1970.
- [3] Kosel J., Gutiérrez-Aguirre I., Rački N., et al. Efficient in activation of MS-2 virus in water by hydrodynamic cavitation. *Water Res.*, 2017, vol. 124, pp. 465–471. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.077>
- [4] Kurbatov A.Yu., Asnis N.A., Batalov R.S., et al. *Sposob ochistki vody* [Method of water treatment]. Patent RF 2525177. Appl. 28.11.2012, publ. 10.08.2014 (in Russ.).
- [5] Zolotova E.F., Ass G.Yu. *Ochistka vody ot zheleza, margantsa, ftora i serovodoroda* [Water treatment from iron, manganese, flour and hydrogen sulphide]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1975.

- [6] Avduevskiy V.S., Ganiev R.F., Kalashnikov G.A., et al. *Gidrodinamicheskiy generator kolebaniy* [Hydrodynamic vibration generator]. Patent RF 2015749. Appl. 04.10.1991, publ. 15.07.1994 (in Russ.).
- [7] Ukrainskiy L.E. *Dinamicheskie osnovy volnovoy tekhnologii*. Dis. d-ra tekhn. nauk [Dynamic foundations of wave technology. Dr. Sc. Eng. Diss.]. Moscow, MAI, 2006 (in Russ.).
- [8] Ganiev R.F., ed. *Volnovaya tekhnika i tekhnologiya. Nauchnye osnovy, promyshlennyye ispytaniya i ikh rezul'taty, perspektivy ispol'zovaniya* [Wave technique and technology. Scientific foundations, industrial tests and their results, prospects for use]. Moscow, Logos Publ., 1993.
- [9] Averina J.M., Kaliakina G.E., Zhukov D.Y., et al. Development and design of a closed water use cycle. *Proc. SGEM*, 2019, vol. 19, no. 3-1, pp. 145–152. DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2019/3.1/S12.019>
- [10] Lutfullaeva N.B., Ashirbekova D.R. Intensification of the water treatment process. *Vysshaya shkola*, 2017, no. 1, pp. 127–128 (in Russ.).
- [11] Promtov M.A. Prospects of cavitation technologies application for intensification of chemical technological processes. *Vestnik TGTU* [Transactions of the TSTU], 2008, vol. 14, no. 4, pp. 861–869 (in Russ.).
- [12] Dezhkunov N.V. Relationship between the cavitation threshold and maximum sonoluminescence intensity. *Tech. Phys. Lett.*, 2008, vol. 34, no. 4, art. 346. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063785008040226>
- [13] Kostrov S.A. *Avtokolebatel'nye rezhimy dvizheniya v sistemakh s zhidkost'yu i gazom* [Self-oscillating modes of motion in systems with liquid and gas]. Moscow, Institut mashinostroeniya Publ., 1988.
- [14] Ganiev R.F., ed. *Kolebatel'nye yavleniya v mnogofaznykh sredakh i ikh ispol'zovanie v tekhnologii* [Vibrational phenomena in multiphase media and their use in technology]. Kiev, Tekhnika Publ., 1960.
- [15] Margulis M.A. Sonoluminescence. *Phys. Usp.*, 2000, vol. 43, no. 3, pp. 259–282. DOI: <https://doi.org/10.1070/PU2000v043n03ABEH000455>
- [16] Krivolutskiy A.S., Kulagin V.A. [Changes in the physicochemical properties of water under the influence of hydrodynamic cavitation]. *Sotsial'nye problemy inzhenernoy ekologii, prirodopol'zovaniya i resursosberezheniya. Mat. NPK. Vyp. IX* [Social Problems of Engineering Ecology, Nature Management and Resource Saving. Proc. Sc.-Pract. Conf. Vol. IX]. Krasnoyarsk, KGTU Publ., 2003, pp. 61–74 (in Russ.).
- [17] Sirotyuk M.G. *Ekspperimental'nye issledovaniya ul'trazvukovoy kavitatsii*. V kn.: *Moshchnyye ul'trazvukovyye polya* [Experimental study of ultrasonic cavitation. In: Powerful Ultrasonic Fields]. Moscow, Nauka Publ., 1968, pp. 168–220 (in Russ.).
- [18] Averina J.M., Zhukov D.Y., Kurbatov A.Y., et al. Methods of intensification of iron — contain in natural water purification processes. *Proc. SGEM*, 2018, vol. 18, no. 1-5, pp. 345–350.

[19] Levkovskiy Yu.L. *Struktura kavitatsionnykh techeniy* [The structure of cavitation currents]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1978.

[20] Balabyshko A.M., Zimin A.I., Ruzhitskiy V.P. *Gidromekhanicheskoe dispergirovaniye* [Hydromechanical dispersion]. Moscow, Nauka Publ., 1998.

[21] Pearsall J.S. *Cavitation*. Mills and Boon, 1972.

Kurbatov A.Yu. — Cand. Sc. (Eng.), Assist. Professor, Department of Innovative Materials and Protection Against Corrosion, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miuskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Kuzin E.N. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Industrial Ecology, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miuskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Averina Yu.M. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Innovative Materials and Protection Against Corrosion, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miuskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Vetrova M.A. — Master's Degree Student, Department of Innovative Materials and Protection Against Corrosion, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miuskaya ploshchad 9, Moscow, 125047 Russian Federation).

Sitnikov A.V. — Senior Lecturer, Department of Electronics and Industrial Electronics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Kurbatov A.Yu., Kuzin E.N., Averina Yu.M., et al. Investigating the processes of hydrodynamic artesian water treatment. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2021, no. 2 (95), pp. 118–133 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2021-2-118-133>