

Обеспечение качества и безопасности процесса питьевой водоподготовки на примере р. Ганг

© 2024. А. Ю. Курбатов, к. т. н., доцент, Е. Д. Мурзина, к. т. н., доцент,
М. А. Ветрова, аспирант, Н. А. Иванцова, к. х. н., доцент,
Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева,
125047, Россия, г. Москва, Миусская пл., д. 9,
e-mail: kurbatov.a.i@muctr.ru

Во всём мире остро стоит проблема качества питьевой воды. Несанкционированные сбросы загрязнённых сточных вод в жизнеобеспечивающие источники водных ресурсов делают последние непригодными для питья. Одним из примеров является р. Ганг – основная артерия хозяйственно-бытового назначения Индии с многочисленными производствами, расположенными на её берегах. Данная статья посвящена изучению возможности повышения качества питьевой воды р. Ганг (Индия), которая уже на входе в город химически и микробиологически загрязнена. Для максимального снижения химической нагрузки на р. Ганг предложен гидродинамический метод обработки воды с применением озона в малых дозах. В рамках работы подтверждена высокая эффективность совместной гидродинамической обработки воды и процесса озонирования. Установлено, что применение кавитационного гидродинамического устройства для обработки воды позволяет снизить расход озона в среднем на 20–25%, что оказывает влияние на положительный экономический эффект и конечную стоимость очищенной воды. Гидродинамическая очистка воды р. Ганг с добавлением в малых дозах озона позволяет получать воду питьевого качества без введения других химических реагентов, что, в свою очередь, делает данный метод экологичным и не несёт за собой вторичного загрязнения окружающей среды. Удешевление процесса очистки происходит из-за эффективного смешивания озона с очищаемой водой при помощи гидродинамического кавитационного устройства. За счёт увеличения площади контакта фаз и дополнительно возникающих кавитационных эффектов происходит интенсификация процесса очистки воды. Применение комбинированного метода гидродинамической обработки с применением озона позволяет значительно понизить цветность, удалить из системы большую часть взвешенных частиц, произвести окисление железа и никеля, снизить концентрацию СПАВ, нефтепродуктов и аммонийного азота; при двукратном количестве циклов очистки – полностью уничтожить бактерии. Нерастворимые соединения, полученные в процессе кавитационной гидродинамической обработки с применением озона, отводятся из системы керамическими мембранными фильтрами. Также в работе приведены результаты исследования химико-биологического исходного состава воды и воды после применения данной технологии с расчётом эффективности метода и стоимостной характеристики.

Ключевые слова: гидродинамическая обработка, озонлиз, микробиологическая загруженность, кавитация.

Ensuring quality and safety for the process of drinkingwater treatment: case-study of the Ganges River

© 2024. A. Yu. Kurbatov ORCID: 0000-0003-2459-7289, E. D. Murzina ORCID: 0009-0007-2331-8467,
M. A. Vetrova ORCID: 0000-0003-0165-6549, N. A. Ivantsova ORCID: 0000-0003-4117-072X,
D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia,
9, Miusskaya sq., Moscow, Russia, 125047,
e-mail: kurbatov.a.i@muctr.ru

Drinking water quality is an acute problem all over the world. Unauthorized discharges of contaminated wastewater into life-sustaining water sources make the latter undrinkable. The Ganges River is the main artery of India's economic and domestic use with the numerous industries located on its banks. This paper is devoted to studying the possibility of improving the quality of drinking water in the Ganges River, India. The studied water is already chemically and microbiologically contaminated at the entrance to the city. The hydrodynamic method of water treatment using ozone in small doses is proposed to minimize the chemical load on the Ganges River. The study confirmed the high efficiency of combined hydrodynamic water treatment and the ozonation process. It is established that the application of cavitation hydrodynamic device for water treatment allows reducing ozone consumption on average by 20–25%, which affects the positive economic effect and the final cost of purified water. Hydrodynamic purification of the Ganges River water with the addition of ozone in small doses allows obtaining water of drinking quality without the introduction of other chemical reagents. The latter makes this method environmentally friendly and does not result in secondary environmental pol-

lution. The low cost of the purification process occurs due to the efficient mixing of ozone with the water being purified using a hydrodynamic cavitation device. By increasing the contact area of the phases and additionally arising cavitation effects, the water purification process is intensified. Application of the combined method of hydrodynamic treatment using ozone significantly reduces water color index, remove most of the suspended particles from the system, oxidize iron and nickel, and reduce the surfactant, petroleum products, and ammonia nitrogen concentrations; with twice the number of cleaning cycles – completely eliminate bacteria. Ceramic membrane filters remove insoluble compounds obtained during cavitation hydrodynamic treatment with ozone. The work also presents the results of studying the chemical and biological initial composition of water and water after using this technology with calculation of the effectiveness of the method and cost characteristics.

Keywords: hydrodynamic treatment, ozonolysis, microbiological load, cavitation.

Индия – страна с населением более 1,3 млрд человек, уступает по численности населения лишь Китаю. Одной из основных проблем данной территории является нехватка питьевой воды – всего 4% мировых водных запасов. Центральное место в жизни страны как культурного, так и хозяйственного назначения играют, несмотря на качество, воды р. Ганг, которая занимает первое место в системе пресного водоснабжения страны. На многих территориях страны р. Ганг является основным источником пресной воды [4].

Мощный поток р. Ганг протяжённостью 2700 км берёт своё начало в Гималаях и впадает в Бенгальский залив, снабжая водой почти 1/10 населения Земли.

В отдалённых регионах страны р. Ганг является единственным источником пресной питьевой воды. Местные жители используют речную воду, подвергая её простейшему фильтрованию и кипячению. По данным [2, 3] ежегодно от ненадлежащего качества воды 1,5–3,6 млн человек страдают от вирусной лихорадки, диареи, гельминтозов и др. Единственное, что спасает жителей Индии от тотальных эпидемий, это способность р. Ганг к самоочищению и обеззараживанию. По мнению учёных, повышенное содержание кислорода в воде, получаемое за счёт высокой турбулентности потоков, препятствует размножению бактерий, а ряд притоков реки, питающихся от горных источников, насыщают речную воду ионами серебра [4].

Вода реки не только утоляет жажду людей, но также питает скот и применяется для орошения земель, используется в качестве транспортной системы и основного энергоносителя страны (системы ГРЭС) [5]. Рост крупнейших мегаполисов по берегам р. Ганг отравляет реку, а также людей, которые зависят от неё. Многие крупнейшие кожевенные заводы Канпура – одного из основных промышленных центров Индии, через который протекает р. Ганг – не имеют систем эффективной переработки отходов, и стоки с тушами животных, сильней-

шими химикатами стекают в реку. Кроме того, в реку поступают поливочные воды с прилегающих сельскохозяйственных угодий, ввиду чего в воде реки обнаружены значительные концентрации пестицидов и других химикатов сельскохозяйственного назначения [6].

Острой проблемой р. Ганг является биологическое загрязнение, так как река используется в качестве канализационного коллектора. Каждую секунду в реку сливается порядка 1 млн л сточных вод, в неё поступают атмосферные стоки с улиц, а местные жители используют воду из реки для санитарных нужд [7]. Согласно данным лаборатории г. Варанаси, в водах реки находится от 40 до 80 тыс. КОЕ/мл фекальных бактерий при норме не более 50 КОЕ/мл [8].

Вопросам изучения качества воды р. Ганг посвящено множество работ [9–18]. В 1986 г. была разработана программа повышения качества пресной воды, но программа не дала удовлетворительных результатов [19].

Целью работы было изучение показателей качества воды р. Ганг, а также подбор минимальной, но в то же время достаточно эффективной, схемы водоочистки для нужд питьевого водоснабжения.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования были взяты образцы воды, отобранные из дельты р. Ганг вблизи г. Варанаси (штат Уттар-Прадеш), на входе в город (500 м выше крематория) и на выходе из города.

Химические, физические и биологические характеристики воды определяли по следующим методикам. Определение содержания ионов металлов проводили на атомно-эмиссионном спектрометре с магнитной плазмой «Спектроскай» (Россия). Измерение содержания органических веществ выполняли на газовом хроматографе Кристалл 5001 (Россия). Содержание нитратов и аммония в воде определяли с использова-

нием ионоселективных электродов на лабораторном иономере И-160 (Россия). Перманганатную окисляемость (далее ПО) определяли методом титрования, содержание взвешенных веществ и минерализацию воды – гравиметрическим методом, содержание нефтепродуктов и СПАВ – методом ИК спектроскопии на портативном концентратометре КН-2М (Россия). Содержание фосфатов и цветность определяли на портативном спектрофотометре DR 2800 (HACH USA). Определение общего микробного числа проводили методом глубинного культивирования с использованием готового питательного агар-агара. Чашки инкубировали при температуре 36–37 °С в течение 24 ч, а также при 22 °С в течение 72 ч для фиксации сапрофитных водных микроорганизмов.

Результаты и обсуждение

Результаты анализа химического состава воды, а также допустимые нормативы для данных показателей (по нормативам РФ) приведены в таблице 1.

Как видно из данных таблицы 1, вода на входе в город имеет превышение по установленным нормативам для таких показателей как ПО, содержание железа, взвешенных веществ, СПАВ, минерализация, цветность и содержание нефтепродуктов.

Основной проблемой объекта исследования (р. Ганг) является его высокая микробиологическая загрязнённость. Для определения общего микробного числа (ОМЧ) в образцах подсчитывали выросшие колонии на чашках Петри с питательным агар-агаром (рис. 1). Было отмечено, что в исследуемом объёме воды более 1000 КОЕ/мл, что превышает действующие нормативы РФ [20].

Основные направления повышения качества воды. Учитывая большие объёмы воды, для достижения эффективного результата очистки предполагается использовать воду на выходе из города, как наиболее чистый вариант, требующий минимальных затрат. Как следует из данных таблицы 1, основным направлением очистки воды станет её обеззараживание, в сочетании со снижением показателей загрязнённости органическими веществами (ПО, СПАВ, нефтепродукты).

В качестве основной технологической схемы для указанного выше состава природной воды была предложена технология, основанная на применении процесса озонирования совместно с процессом гидродинамической обработки.

Выбор в пользу озонирования был обусловлен как высокой окислительной способностью озона по отношению к ряду загрязняющих веществ органического происхождения, так и его высокой дезинфицирующей способностью [21–24]. Недостатком данного метода является недостаточная смешиваемость озона с обрабатываемой водой, а также проблемы синтеза в жарком климате с учётом нестабильности озона при высоких температурах [24, 25]. С целью минимизации количества потребляемого и вырабатываемого озона (снижение себестоимости и энергозатрат на охлаждение) за счёт более эффективного смешивания с обрабатываемой водой было предложено в качестве устройства для смешивания применить кавитационное гидродинамическое устройство [25]. Данное устройство использует энергию самого потока обрабатываемой воды для создания в ней кавитационных явлений, способствующих интенсификации массообменных процессов, диспергированию газов (как находящихся, так и поступающих) в обрабатываемой жидкости и обеззараживанию. Всё это приводит к увеличению степени окисления загрязняющих соединений за счёт образования активных форм кислорода [27–30].

Создание необходимого градиента давления для достижения кавитационного эффекта в обрабатываемой воде достигается насосным оборудованием, представляющим собой либо высокорасходный низконапорный насос, либо малорасходный высоконапорный ($Q > 3 \text{ м}^3/\text{час}$, $P_{\text{н}} > 1,4 \text{ МПа}$). Важно отметить, что конструкция применяемого кавитационного гидродинамического устройства позволяет одновременно выполнять функцию эжектора озона без потери кавитационного явления (при определённом соотношении эжектируемого газа к объёму обрабатываемой воды). Реализация эжектирования озона в обрабатываемый поток воды осуществляется за счёт создания зоны разряжения по оси движения вихревого потока в кавитационном гидродинамическом устройстве. Это в свою очередь позволяет попадать озону непосредственно в зону образования кавитационных явлений, что приводит к резкому уменьшению диаметра диспергированных воздушных пузырьков озона, увеличивая тем самым площадь контакта фаз воздушных пузырьков с обрабатываемой водой. Время пребывания диспергированных пузырьков озона в объёме обрабатываемой воды увеличивается за счёт уменьшения скорости схлопывания пузырь-

Таблица 1 / Table 1

Показатели качества воды р. Ганг (поселение Варанаси)
Water quality indicators of the Ganges River, Varanasi

Показатель Index	Единицы измерения Measurement units	На входе в город At the entrance to the city	На выходе из города On the way out of the city	Норматив Standard
рН	ед. / units	7,6±0,2	7,1±0,2	6,0–9,0*
Азот нитратов Nitrate nitrogen	мг/л mg/L	1,80±0,20	21,2±1,6	45 (по N / by N)**
Азот аммонийный Ammonia nitrogen		0,45±0,09	57±5	1,5 (по N / by N)**
Фосфор общий Total phosphorous		0,33±0,06	2,30±0,06	1,14 (по P / by P)**
Железо / Iron		0,049±0,011	0,24±0,05	0,3*
Цинк / Zinc		0,330±0,030	0,310±0,030	1,0*
Кобальт / Cobalt		0,0020±0,0001	0,0020±0,0001	0,1**
Кадмий / Cadmium		0,0010±0,00010	0,0010±0,00010	0,001**
Свинец / Lead		0,005±0,001	0,006±0,002	0,01**
Медь / Copper		0,0082±0,0020	0,0100±0,0020	1,0*
Хром / Chromium		0,0031±0,0020	0,0030±0,0020	0,05*
Магний / Magnesium		17,0±0,7	18,0±0,7	50**
Натрий / Sodium		35,0±0,9	50,0±0,9	200**
Калий / Potassium		9,0±0,8	14,0±0,7	не нормируется not standardized
Кальций / Calcium		31,0±1,2	35,0±1,5	не нормируется not standardized
Никель / Nickel		0,0066±0,0028	0,0061±0,0026	0,02**
Марганец / Manganese		0,0110±0,0035	0,0120±0,0038	0,1**
Минерализация Mineralization		1970±180	2250±220	1000*
Взвешенные вещества Suspended solids		19,1±0,9	125±6	3,5*
Нефтепродукты Petroleum products		0,180±0,020	0,250±0,020	0,1*
СПАВ / Synthetic surfactants		0,240±0,020	3,21±0,20	0,5*
ПО / PD	мгО/л mgO/L	20,7±1,5	215,0±1,4	5 (по ПО / by PD)*
Жёсткость / Hardness	мг·экв/л mg·Eq/L	4,60±0,09	5,10±0,09	7*
Цветность / Color index	градусы degrees	26±2	42±3	20*
Общее микробное число Total microbial count	КОЕ/мл CFU/mL	> 1000	10 ⁵ –10 ⁶	≤ 50

Примечание: * норматив согласно СанПиН 2.1.4.1074-01; ** – СанПиН 1.2.3685-21.
Note: * standard according to SANPIN 2.1.4.1074-01; ** – SANPIN 1.2.3685-21.

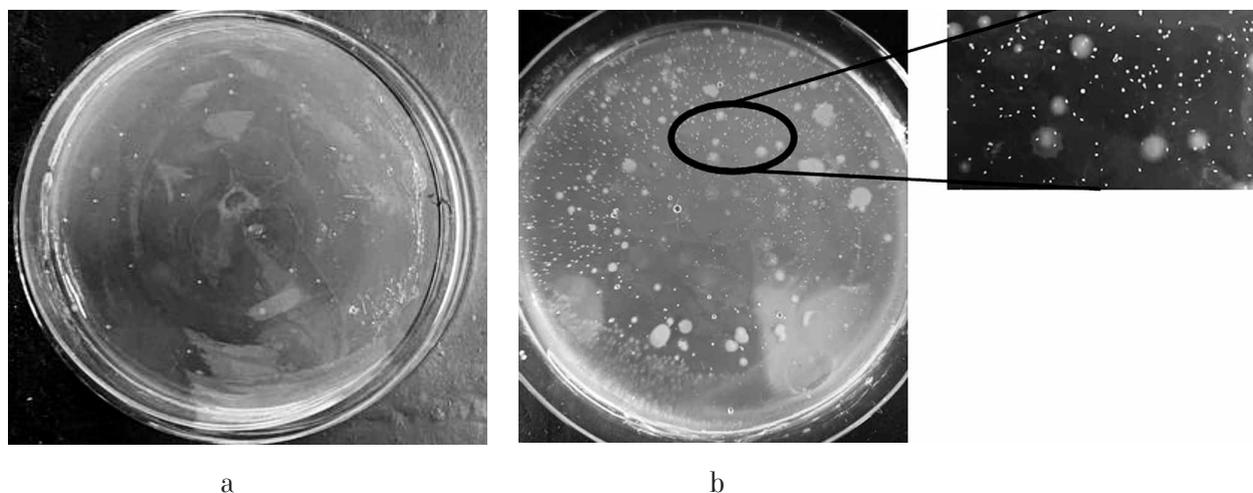


Рис. 1. Колонии микроорганизмов, выросшие на 12 ч культивирования при температуре 37 °С на чашках Петри с агаризованной питательной средой: а) образец с чистой водой; б) образец с водой, взятой на входе в город
Fig. 1. Colonies of microorganisms grown during 12 h of cultivation at 37 °С on Petri dishes with agar nutrient medium: a) clean water sample; b) at the entrance to the city

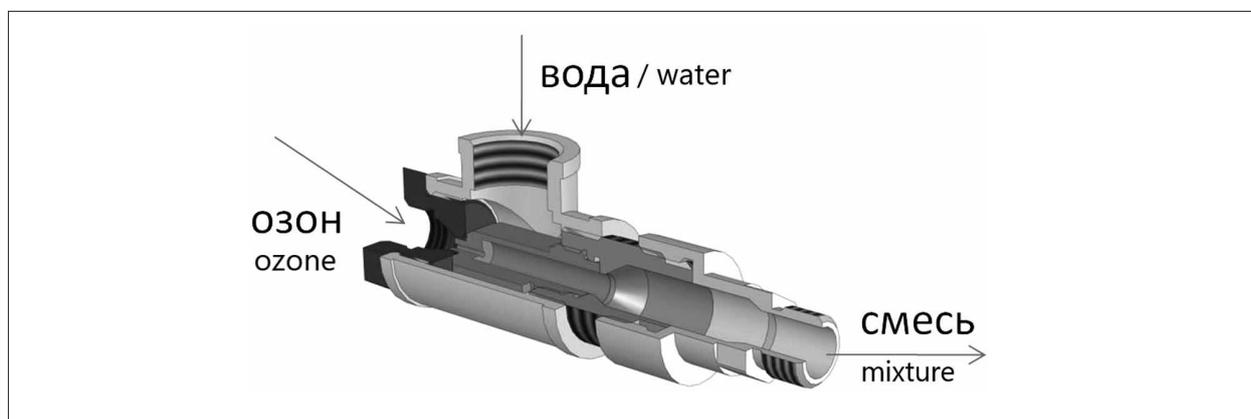


Рис. 2. 3D-модель кавитационного гидродинамического устройства
Fig. 2. 3D model of a cavitation hydrodynamic device

ков, чему способствуют более мелкие размеры образовавшихся пузырьков.

Данное синергетическое применение кавитационной обработки и озонирования позволит, с одной стороны, минимизировать затраты озона на процесс окисления (за счёт увеличения площади контакта фаз вода-озон), а с другой – увеличит степень эффективности кавитационной обработки в отдельности (за счёт увеличенного окислительного эффекта). При этом оптимизируются общие аппаратурные затраты, так как использование указанного кавитационного гидродинамического устройства позволяет не только отказаться от сложного аппаратурного оформления, но и повысить эффективность очистки воды за счёт дополнительных кавитационных процессов, возникающих в процессе обработки воды, при минимальном количестве необходимого озона [26].

Техническое обеспечение системы очистки. Основные принципы работы кавитационного гидродинамического устройства были разработаны ещё в 80-х гг. в Институте машиноведения имени А. А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН) [30]. В рамках проведённых в РХТУ имени Д. И. Менделеева работ, была проведена модернизация прототипа с разработкой нового типа гидродинамических устройств.

Основной целью модификации устройства для решения данной технологической задачи являлось обеспечение возможности эжектирования озона непосредственно в рабочую камеру кавитационного гидродинамического устройства для достижения максимальной степени его диспергирования, но без потери возможности создания кавитационных явлений в обрабатываемой воде.

3D-модель разработанного кавитационного гидродинамического устройства представлена на рисунке 2.

Представленное на рисунке 2 устройство позволяет одновременно сочетать в себе процессы, вызванные явлением кавитации, эжектирования и диспергирования с функцией обеззараживания.

Данные по изменению расхода озона, необходимого для окисления органического загрязняющего вещества, на примере гуминовой кислоты (показатель цветности) при использовании гидродинамического устройства и без него, представлены на рисунке 3.

Из представленного на рисунке 3 графика видно, что применение гидродинамической обработки в сочетании с озонированием позволяет снизить эффективную дозу озона в среднем на 10–15%, либо на 10–15% повысить эффективность очистки при эквивалентных дозах.

В качестве заключительной стадии очистки воды предлагается использование системы фильтрации через керамический мембранный элемент с рейтингом фильтрации 0,072 мкм. Результаты химического анализа воды, прошедшей стадию озонирования, кавитации и фильтрации на керамическом мембранном фильтре, представлены в таблице 2.

Эффективность очистки воды с использованием предложенной технологии представлена на графике (рис. 4). Эффек-

тивная доза озона при совместной обработке в гидродинамическом устройстве составила 4,5 мг/л, при этом в отсутствие устройства эффективная доза озона составила 5,8 мг/л (на 20% выше).

Из данных таблицы 2 и рисунка 4 видно, что при использовании озона в дозе 4,5 мг/л происходит полное обеззараживание воды, при этом существенно снижается количество СПАВ и нефтепродуктов в воде, а также показатель ПО. Незначительное увеличение нитратов обусловлено частичным окислением соединений аммония в обрабатываемой воде активными формами кислорода.

Исходя из опубликованных данных на выработку 1 кг озона на классических трубчатых генераторах озона (конструкция Велсбаха) расходуется от 11 до 16 кВт/кг(O₃) [23, 24]. Расчётная стоимость очистки 1 м³ воды с применением гидродинамического устройства составит 0,64 рубля против 0,72 рублей без него, или примерно 0,75 и 0,84 индийской рупии (при средней зарплате от 3000 рупий) соответственно. Принимая во внимание тот факт, что стоимость озонирующего оборудования ежегодно снижается, а на рынок выходят новые высокоэффективные генераторы озона (плоскостной), потребляющие 7–8 кВт/кг(O₃), стоимость очистки 1 м³ воды составит не более 0,25 руб. или 0,29 индийской рупии (0,21 при использовании гидродинамической обработки).

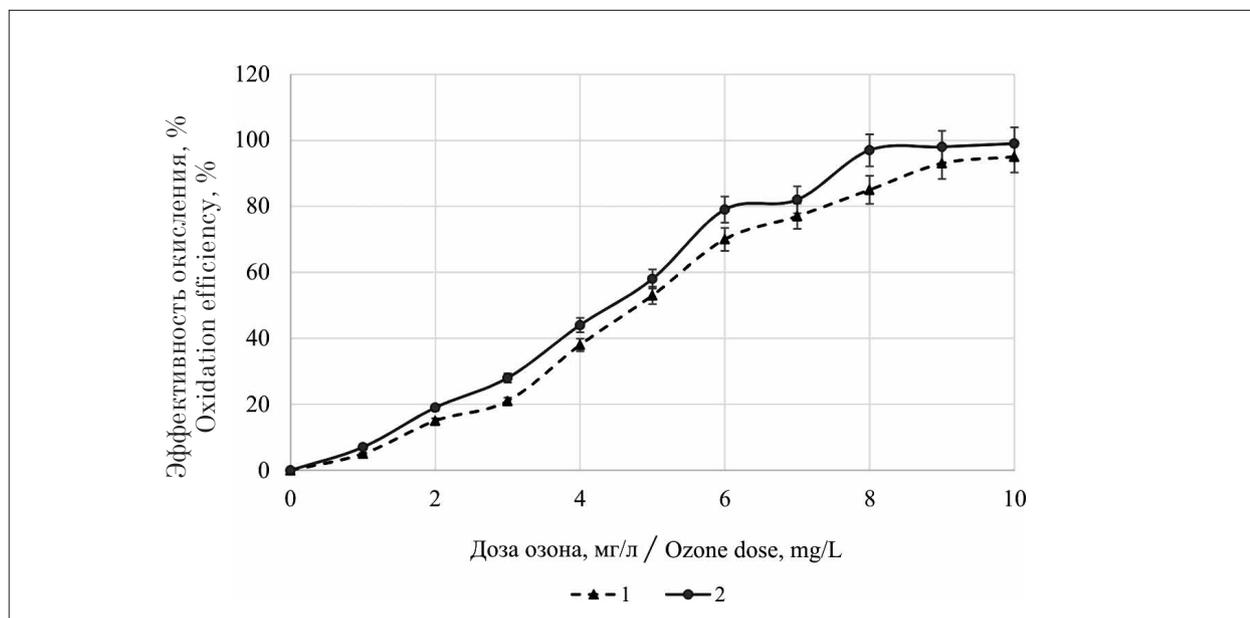


Рис. 3. Эффективность окисления (%) гуминовой кислоты при различной концентрации озона (мг/л) 1 – только озонирование; 2 – комбинация озонирования и гидродинамической обработки
 Fig. 3. Efficiency (%) of humic acid oxidation at different ozone content (mg/L): 1 – ozonation only; 2 – combination of ozonation and hydrodynamic treatment

Таблица 2 / Table 2

Эффективность очистки воды с использованием озонирования и гидродинамической обработки
Efficiency of water treatment using ozone and hydrodynamic treatment

Показатель Index	Единицы измерения Measurement units	На входе в город At the entrance to the city	На выходе из города On the way out of the city	Норматив Standard
рН	ед. / units	7,1±0,2	6,5±0,2	6,0–9,0
Азот нитратов Nitrate nitrogen	мг/л mg/L	21,2±0,8	1,9±0,7	45 (по N / by N)
Азот аммонийный Ammonia nitrogen		56,8±2,3	0,12±0,02	1,5 (по N / by N)
Фосфор общий Total phosphorous		2,30±0,06	0,31±0,06	1,14 (по P / by P)
Железо / Iron		0,24±0,05	0,0100±0,0039	0,3
Цинк / Zinc		0,310±0,030	0,310±0,030	1,0
Кобальт / Cobalt		0,0020±0,0005	0,00100±0,00026	0,001
Кадмий / Cadmium		0,0010±0,0001	0,0020±0,0001	0,1
Свинец / Lead		0,0060±0,0020	0,0050±0,0020	0,01
Медь / Copper		0,0100±0,0020	0,0074±0,0020	1,0
Хром / Chromium		0,0030±0,0010	0,0030±0,0010	0,05
Магний / Magnesium		18,0±0,6	17,0±0,7	50
Натрий / Sodium		50,0±0,9	34,0±0,9	200
Калий / Potassium		14,0±0,8	9,0±0,8	не нормируется not standardized
Кальций / Calcium		35,0±1,9	30,0±1,7	не нормируется not standardized
Никель / Nickel		0,0061±0,0026	0,0034±0,0014	0,02
Марганец / Manganese		0,0120±0,0038	0,00100±0,00032	0,1
Взвешенные вещества Suspended solids	125±11	1,7±0,1	3,5	
Минерализация Mineralization	2250±200	1370±90	1000	
Нефтепродукты Petroleum products	0,250±0,020	0,0580±0,0020	0,1	
СПАВ / Synthetic surfactants	3,21±0,20	0,07±0,010	0,5	
ПО / PD	мгО/л mgO/L	215±14	2,3±0,4	5 (по ПО / by PD)
Жёсткость / Hardness	мг·эquiv/л mg·Eq/L	5,1±0,7	4,2±0,5	7
Цветность / Color index	градусы degrees	42±4	8±1	20
Общее микробное число Total microbial count	КОЕ/мл CFU/mL	10 ⁵ –10 ⁶	не обнаружено not detected	≤ 50

Заключение

В рамках работы подтверждена высокая эффективность совместной гидродинамической обработки воды и процесса озонирования. Применение данного метода позволило увеличить степень очистки воды от аммонийного азота, ПО, никеля, СПАВ, нефтепродуктов на 70–90%,

железа – на 98%. Удалось снизить цветность воды на 69% за счёт глубокого и необратимого окисления гуминовых кислот и удалить порядка 71% нефтепродуктов. Количество взвешенных частиц в воде после очистки снижается на 91%.

Установлено, что применение гидродинамического устройства обработки воды позволяет снизить расход озона в среднем на

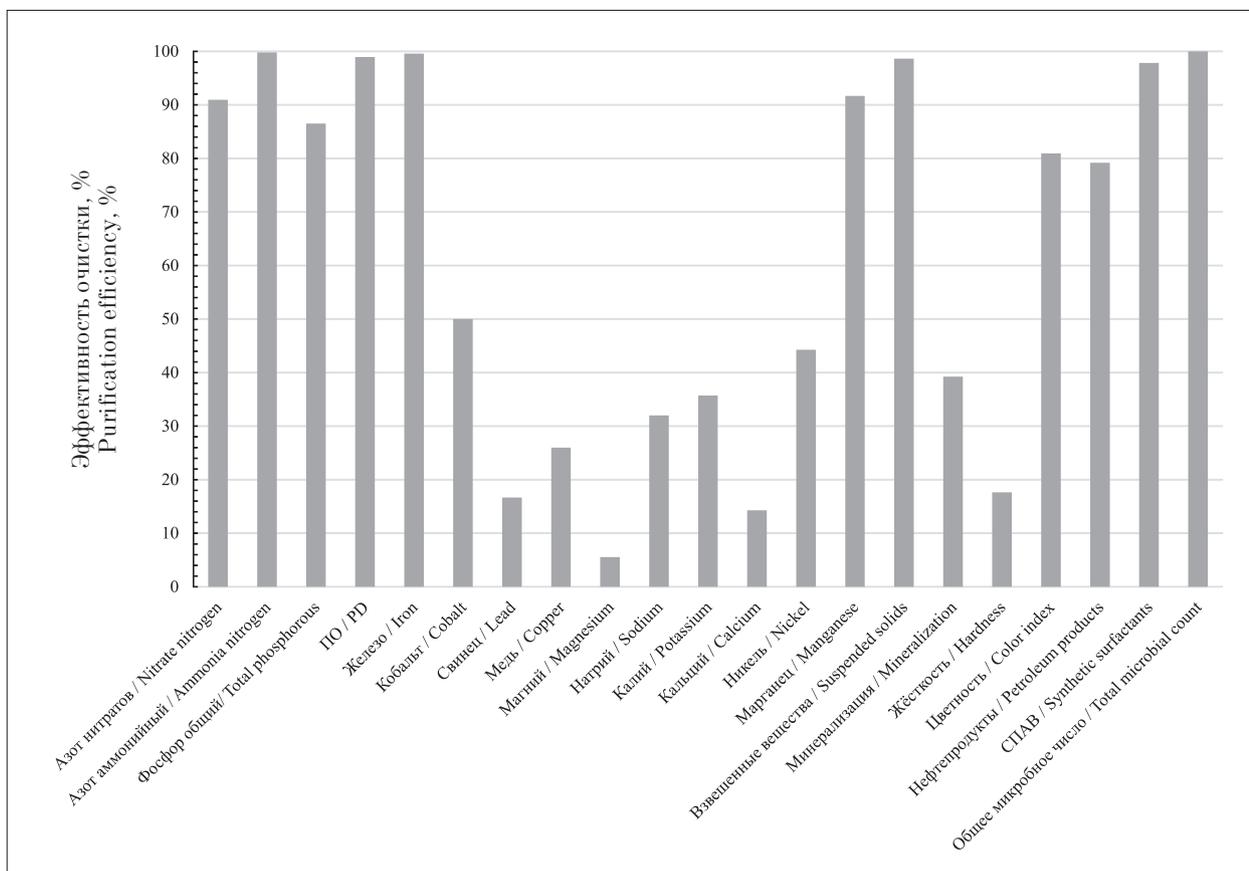


Рис. 4. Итоговая эффективность процесса очистки воды по предложенной технологии, %
Fig. 4. The final efficiency of the water purification process according to the proposed technology, %

20–25%, что, несомненно, окажет положительный экономический эффект на стоимость очищенной воды.

Отмечено, что резкие изменения давления и температуры в местах схлопывания кавитационных пузырьков и воздействие озона на очищаемую воду приводят к полному уничтожению бактерий в очищаемой воде при двукратном количестве циклов очистки без добавления химических реагентов.

Применение данного метода очистки имеет ряд преимуществ, так как установка не требует больших площадей и может заменить несколько стадий водоподготовки (механические, физико-химические, биологические, обеззараживание).

С учётом полученных данных об эффективности совместного применения озонирования и гидродинамической обработки в процессах водоподготовки можно сделать вывод о том, что, несмотря на относительную дороговизну способа, при условии комплексного подхода (например, использовании мощностей соседней ГРЭС и ТЭС), возможно существенно повысить качество питьевой воды в штате Уттар-Прадеш, а также улучшить санитарно-гигиенические

показатели воды, используемой для хозяйственных и культурно-бытовых целей.

References

- Goryacheva A.M. Urbanization and water supply of Indian cities // Water resources of India: economic, political, social aspects: materialy nauchnoy konferentsii. Moskva: Institute of Oriental Studies RAS, 2015. P. 77–116 (in Russian).
- Bidhuri S., Taqi M., Khan M.M.A. Water-borne disease: Link between human health and water use in the Mithepur and Jaitpur area of the NCT of Delhi // J. Public Health. 2018. V. 26. P. 119–126. doi: 10.1007/s10389-017-0835-y
- Kumar P., Srivastava S., Banerjee A., Banerjee S. Prevalence and predictors of water-borne diseases among elderly people in India: evidence from Longitudinal Ageing Study in India, 2017–18 // BMC Public Health. 2022. V. 22. No. 1. Article No. 993. doi: 10.1186/s12889-022-13376-6
- Nautiyal C.S. Self-purificatory Ganga water facilitates death of pathogenic *Escherichia coli* O157:H7 // Curr. Microbiol. 2009. V. 58. No. 1. P. 25–29. doi: 10.1007/s00284-008-9260-3
- Revelle R., Lakshminarayana V. The Ganges water machine // Science. 1975. V. 188. No. 4188. P. 611–616. doi: 10.1126/science.188.4188.611

6. Samanta S. Metal and pesticide pollution scenario in Ganga River system // *Aquat. Ecosyst. Health Manage.* 2013. V. 16. No. 4. P. 454–464. doi: 10.1080/14634988.2013.858587
7. Singh A.N., Shrivastava R., Mohan D., Kumar P. Assessment of spatial and temporal variations in water quality dynamics of river Ganga in Varanasi // *Pollution.* 2017. V. 4. No. 2. P. 239–250. doi: 10.22059/poll.2017.240626.310
8. Kandhari R. Ganga reduced to sludge in Varanasi [Internet resource] <https://dialogue.earth/en/water/ganga-reduced-to-sludge-in-varanasi/> (Accessed: 12.02.2024).
9. Tripathi B.D., Sikandar M., Shukla S.C. Physico-chemical characterization of city sewage discharged into river Ganga at Varanasi, India // *Environ. Int.* 1991. V. 17. No. 5. P. 469–478. doi: 10.1016/0160-4120(91)90281-T
10. Khare R., Khare S., Kamboj M., Pandey J. Physico-chemical analysis of Ganga Water // *Asian J. Biochem. Pharm. Res.* 2011. V. 1. No. 2. P. 232–239.
11. Yadav R.C., Srivastava V.C. Physico-chemical properties of the water of river Ganga at Gazipur // *Indian J. Sci. Res.* 2011. V. 2. No. 4. P. 41–44.
12. Srivastava R.K., Sinha A.K., Pande D.P., Singh K.P., Chandra H. Water quality of the river Ganga at Phaphamau (Allahabad) – Effect of mass bathing during Mahakumbh // *Environ. Toxicol. Water Qual.* 1996. V. 11. No. 1. P. 1–5. doi: 10.1002/(SICI)1098-2256(1996)11:1<1::AID-TOX1>3.0.CO;2-D
13. Joshi D.M., Kumar A., Agrawal N. Studies on physicochemical parameters to assess the water quality of river Ganga for drinking purpose in Haridwar District // *Rasayan J. Chem.* 2009. V. 2. No. 1. P. 195–203.
14. Trivedi P., Bajpai A., Thareja S. Evaluation of water quality: physico-chemical characteristics of Ganga river at Kanpur by using correlation study // *Nature and Science.* 2009. V. 1. No. 6. P. 91–94.
15. Khatoon N., Khan A.H., Rehman M., Pathak V. Correlation study for the assessment of water quality and its parameters of Ganga river, Kanpur, Uttar Pradesh, India // *IOSR Journal of Applied Chemistry.* 2013. V. 5. No. 3. P. 80–90. doi: 10.9790/5736-0538090
16. Rai A.K., Paul B., Mudra L., Kishor N. Studies of selected water quality parameters of river Ganges at Patna, Bihar // *J. Adv. Lab. Res. Biol.* 2011. V. 2. No 4. P. 136–140.
17. Singh L., Choudhary S.K. Physico-chemical characteristics of river water of Ganga in Middle Ganga Plains // *IJIRSET.* 2013. V. 2. No. 9. P. 4349–4357.
18. Arya S., Gupta R. Water quality evaluation of Ganga river from up to downstream area at Kanpur City // *Journal of Chemistry and Chemical Sciences.* 2013. V. 3 (2). P. 54–63.
19. Parshina L.S. The Clean Ganga project in India // *Modern approaches to the study of environmental problems in physical and socio-economic geography: materialy X Mezhdunarodnoy molodezhnoy shkoly-konferentsii.* Moskva: “11-y format”, 2017. P. 98–99 (in Russian).
20. Agarwal D.K., Gaur S.D., Sen P.C., Marwah S.M. Bacteriological study of Ganges water at Varanasi // *Indian J. Med. Res.* 1976. V. 64. No. 3. P. 373–383.
21. Cheremisinoff N.P., *Handbook of water and wastewater treatment technologies.* Butterworth-Heinemann, 2002. 636 p.
22. Spellman F.R. *Handbook of water and wastewater treatment plant operations.* CRC Press, 2013. 923 p. doi: 10.1201/b15579
23. Mazitova A.K., Sukhareva I.A. Aminova A.F., Yagafarova G.G., Khangildin R.I., Mukhametzhanova E.G. Oxidative method of wastewater treatment of woodworking industry enterprises // *Theoretical and Applied Ecology.* 2020. No. 4. P. 75–80 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-075-080
24. Orlov V.A. *Ozonation of water.* Moskva: Stroyizdat, 1984. 89 p. (in Russian).
25. Gimranov F.M., Belyaev A.N., Flegentov I.V., Suslov A.S. Hydrodynamic cavitation as a method of intensifying the ozonation process in food technologies // *Bulletin of the Kazan Technological University.* 2012. V. 15. No. 8. P. 292–294 (in Russian).
26. Ganiev R.F. *Wave machines and technologies (Introduction to wave technology).* Moskva: R&C Dynamics, 2008. 192 p. (in Russian).
27. Tsitsifli S., Kanakoudis V. Disinfection impacts to drinking water safety – A review // *Proceedings.* 2018. V. 2. No. 11. Article No. 603. doi: 10.3390/proceedings2110603
28. Collivignarelli M., Abba A., Benigna I., Sorlini S., Torretta V. Overview of the main disinfection processes for wastewater and drinking water treatment plants // *Sustainability.* 2018. V. 10. No. 2. Article 86. doi: 10.3390/su10010086
29. Roy P.K., Kumar D., Ghosh M., Majumder A. Disinfection of water by various techniques – comparison based on experimental investigations // *Desalination Water Treat.* 2016. V. 57. No. 58. P. 28141–28150. doi: 10.1080/19443994.2016.1183522
30. Sun X., Liu J., Ji L., Wang G., Zhao S., Yoon J.Y., Chen S. A review on hydrodynamic cavitation disinfection: The current state of knowledge // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 737. Article No. 139606. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139606