

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ОЧИСТКИ ВОДЫ, СОДЕРЖАЩЕЙ АНТРОПОГЕННЫЕ ПРИМЕСИ

Представлены результаты исследований процессов биопредочистки, первичного озонирования воды и ее совместной обработки различными окислителями в сочетании с УФ-облучением, фильтрования через гранулированно-волоконистые слои и глубокой очистки на осветлительно-сорбционных фильтрах. Приведены разработанные новые и усовершенствованные технологии очистки природных вод, содержащих антропогенные примеси.

Введение

В условиях ухудшения качества природных вод под воздействием антропогенной нагрузки на водоисточники и ужесточения требований к степени ее очистки [1, 2] дальнейшее усовершенствование существующих и разработка новых технологий водоподготовки с целью повышения санитарно-гигиенической надежности является актуальной задачей.

Изучение процессов биопредочистки, первичного озонирования воды и ее совместной обработки различными окислителями в сочетании с УФ-облучением, фильтрованием через гранулированно-волоконистые слои и глубокой очистки на осветлительно-сорбционных фильтрах проводилось нами в период с 1995 по 2011 гг. на цветных и мутных водах поверхностных источников в условиях действующих водопроводных (гг. Вологда, Кишинев) и водозаборных сооружений (г. Ростов-на Дону), а также в лаборатории очистки природных вод НИИ ВОДГЕО и

Ж.М. Говорова*,
доктор технических наук, профессор кафедры водоснабжения, ФГБОУ ВПО Московский государственный строительный университет

Центре инноваций в области водоснабжения и водоотведения ОАО «Мосводоканал НИИпроект» [3-5].

Результаты и их обсуждение

Биологическая предочистка. В разработанных комбинированных сооружениях, состоящих из биореактора и контактного фильтра с плавающей пенополистирольной загрузкой, исходная вода предварительно обогащается кислородом воздуха, а затем поступает в толщу волокнистой или волокнисто-гранулированной загрузки биореактора. Загрузка биореактора, характеризующаяся высокоразвитой поверхностью, служит носителем для закрепления активных микроорганизмов, поглощающих из воды растворенные органические загрязнения.

При анализе обрастаний и осадка в пробах воды обнаруживался детрит, множество мелких криптоноад (*Cryptomonas sp.*, *Rhodomonas sp.*), обломки панцирей диатомовых водорослей (*Synedra*, *Navicula*, *Melosira*). Среди организмов зоопланктона были отмечены *Chydorus ovalis* и *Chydorus sp.*

Экспериментами на природной воде р. Вологда было установлено, что достижение 10 %-го эффекта безреагентной очистки воды по пермангантной окисляемости, химическому потреблению кислорода и азоту аммоний-

* Адрес для корреспонденции: fonsvit@bk.ru

ному при разной степени наполнения (φ) корпуса биореактора капроновыми нитями наблюдается через 1,5-2 ($\varphi = 0,2$), 2,5-3,5 ($\varphi = 0,15$) и от 3 до 8 сут ($\varphi = 0,1$) (рис. 1).

Речная вода: $T = +8^\circ\text{C}$; $\text{ПО}_0 = 7,6-8,4$ мг/л; $\text{ХПК}_0 = 26-31,4$ мг/л; $\text{NH}_4\text{O} = 0,55-0,65$ мг/л. Максимальное снижение (до 20-35 %) в исходной воде значений этих показателей при температуре воды $+8^\circ\text{C}$ фиксировалось при степени наполнения $\varphi = 0,15-0,20$.

Обработка экспериментальных данных с использованием ЭВМ позволила получить расчетные зависимости для определения эффективности снижения хлоропоглощаемости воды, продолжительности «зарядки» ($t_{\text{зар.}}$) и полезной работы ($t_{\text{полезн.}}$) биореактора между промывками.

$$\frac{\text{ХП}}{\text{ХП}_0} = 0,96 - 0,02T - 0,22\varphi + 0,01v, \quad (1)$$

где ХП , ХП_0 – хлоропоглощаемость исходной и очищенной воды, соответственно,

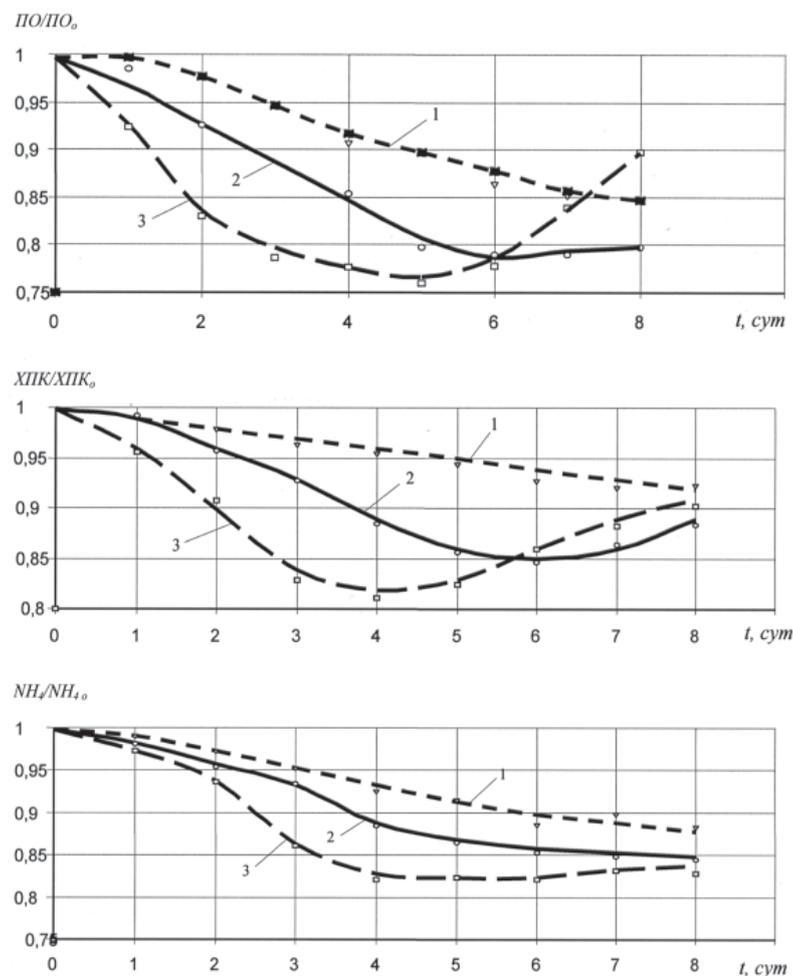


Рис. 1. Эффективность снижения перманганатной окисляемости (ПО), химического потребления кислорода (ХПК) и удаления аммонийного азота (NH_4) при различной степени наполнения (φ) биореактора с волокнистой насадкой: 1 – $\varphi = 0,1$; 2 – $\varphi = 0,15$; 3 – $\varphi = 0,2$

мг/л; T – температура воды, $^\circ\text{C}$; v – скорость фильтрования, м/ч.

Формула (1) справедлива для условий работы биореактора с момента его полной «зарядки» при изменении температуры исходной воды в интервале от $+4$ до $+12^\circ\text{C}$, $\varphi = 0,1-0,2$ и $v = 2-8$ м/ч.

$$t_{\text{зар.}} = \frac{19,5v^{0,4}}{T^{0,9}\varphi^{0,2}t_{\text{конт}}^{0,2}\text{ПО}^{0,33}}, \quad (2)$$

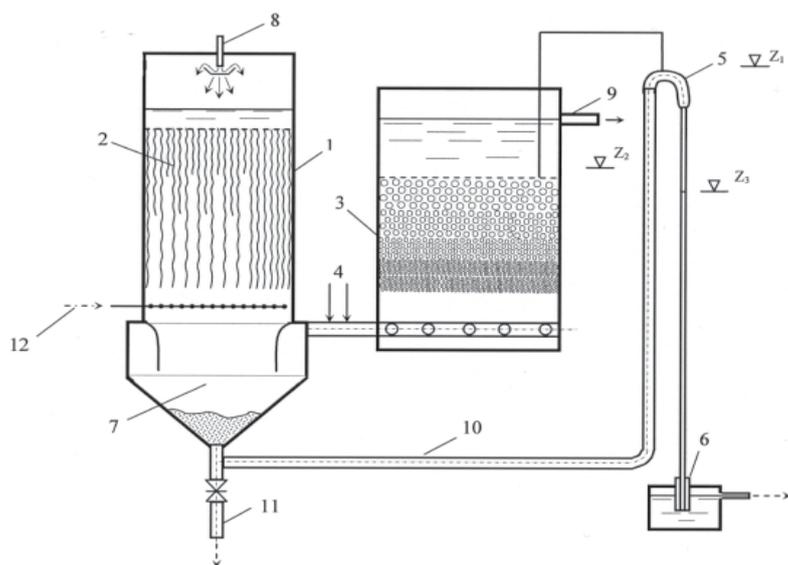
$$t_{\text{полезн.}} = \frac{3,3 \cdot 10^3 t_{\text{конт}}^{0,32}}{T^{0,34}v^{0,63}\varphi^{0,48}\text{ПО}^{0,6}}, \quad (3)$$

где ПО – перманганатная окисляемость, мг/л; $t_{\text{конт.}}$ – продолжительность контакта воды с загрузкой, ч.

Формулы (2) и (3) справедливы для условий работы биореактора на исходной воде, характеризующейся повышенной окисляемостью – от 8 до 18 мг/л, диапазоном изменения ее температуры от $+2,5$ до $+12^\circ\text{C}$ и при продолжительности контакта воды с загрузкой от 3 до 9 мин.

Результаты исследований по эффективности работы комбинированного сооружения «биореактор-контактный фильтр с плавающей загрузкой (КФПЗ-1)» (рис. 2) представлены в табл. 1. Скорость фильтрования воды в опытах изменялась от 3 до 8 м/ч. Доза 5 %-го раствора коагулянта – сернокислого алюминия по $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, составляла 20-30 мг/л. Загрузка из капроновой нити была выполнена с уменьшающейся по ходу движения воды степенью наполнения от 0,15 до 0,07. Полученные кривые кинетики выноса загрязнений при промывке комбинированного сооружения «биореактор-КФПЗ-1» и исследованные режимы химической регенерации волокнистой загрузки с использованием 5 %-го раствора медного купороса позволили определить требуемую интенсивность промывки – 12 л/с.м², при которой основная масса загрязнений удаляется в течение 5–7 мин.

Оценка эффективности применения на первой ступени биореакторов-префильтров с плавающей загрузкой для безреагентной предочистки воды от фитопланктона проводилась в сентябре–октябре 2008 г. на стенде, смонтированном на р. Дон (рукав Большая Каланча) с производительностью по очищаемой воде до 50 м³/сут. Вода в этот период характеризовалась повышенным содержанием органического вещества (биомассой) от 16,04 до 98,44 мг/л, наличием фитопланктона (представленного преимущественно сине-зелеными водорослями) от 9,68 до 30,72 тыс. кл/мл, цветностью 35-50 град., окисляемостью 6,4-3,9 мг/л



← **Рис. 2.** Конструкция комбинированного сооружения «биореактор-контактный фильтр с плавающей загрузкой (КФПЗ-1)», оборудованного системой гидроавтоматической промывки.

1 – биореактор; 2 – волокнистые носители микроорганизмов; 3 – КФПЗ-1; 4 – ввод реагентов (резервный); 5 – сифон отвода промывной воды и осадка с отмершей биомассой; 6 – зарядное устройство; 7 – осадкоприемник биомассы; 8 – подача исходной воды; 9 – отвод очищенной воды; 10, 11 – отвод промывных вод и осадка; 12 – подача воздуха

Таблица 1

Эффективность очистки воды на комбинированном сооружении «биореактор – контактный фильтр с плавающей загрузкой (КФПЗ-1)»

Показатель	Исходная вода	Очищенная вода после	
		биореактора	КФПЗ-1
Цветность, град.	46-54	44-52	18-20
Мутность, мг/л	2,2-3	1,4-2,4	0,1
Хлоропоглощаемость, мг/л	1,1-2	0,9-1,3	не опр.
Перманганатная окисляемость, мг/л	8,0-9,2	6,4-7,8	4,8-5
Азот аммонийный, мг/л	0,6-0,68	0,55-0,6	0,52-0,6
Химическое потребление кислорода, мг/л	22,8-26,4	20,6-24,6	16,4-18
Растворенный кислород, мг/л	6,8-7,2	4,2-6,8	не опр.

и малой мутностью (до 6,4–9,5 мг/л). Температура речной воды изменялась от +20 до +12 °С. В качестве загрузки модели напорного биореактора-префильтра диаметром 200 мм применялся вспененный полистирол марки ПСВ с толщиной слоя $l = 0,4$ м и крупностью гранул $d_{cp} = 1-6$ мм. Результаты исследований представлены в *табл. 2*.

Процесс преозонирования исследовался на воде рек Волга, Днепр и Вологда. Было установлено, что их эффективное обесцвечивание при изменяющейся в широком диапазоне цветности от 35 до 130 град. достигается при дозах озона от 2 до 3,5 мг/л.

При цветности воды в р. Вологда 70–106 град., концентрации азота аммонийного 1,75 мг/л, неионогенных поверхностно-активных веществ до 6 мг/л, окисляемости перманганатной до 14,7 мг/л и температуре воды +3 °С озонирование на первой стадии обработки с дозой озона до 3,5 мг/л и времени контакта до 12 мин в контактной колонне позволило снизить цветность без применения коагулянта на 55–68 %.

Таблица 2

Эффективность работы биореактора-префильтра на речной воде

№ п/п	Скорость фильтрования, м/ч	Биомасса		Фитопланктон	
		Кол-во орг. вещества, мг/л	Эффект очистки, %	Кол-во организмов, тыс.кл/мл	Эффект очистки, %
1.	—	98,44*	—	28,32*	—
	5	11,98	87,8	8,14	71,3
	15	31,40	68,1	19,50	31,1
2.	—	66,64*	—	30,72*	—
	30	31,60	52,6	15,98	48,1
	50	34,16	48,7	19,00	38,1
3.	—	26,45*	—	18,24*	—
	35	13,24	49,9	10,12	44,5
4.	—	34,20*	—	14,20*	—
	50	18,76	45,1	10,46	26,3
5.	—	16,04*	—	9,68*	—
	30	7,8	50,2	7,4	23,5

Примечание: * речная вода

Таблица 3

Эффективность УФ-облучения (УФ) и совместной обработки воды р. Вологда озоном и УФ-облучением (УФ+Оз)

Показатели	Исходная вода	Обработанная вода					
		$Q_v = 0,043 \text{ м}^3/\text{ч}$ $t_{\text{эксп.}} = 56 \text{ с}$		$Q_v = 0,031 \text{ м}^3/\text{ч}$ $t_{\text{эксп.}} = 71 \text{ с}$		$Q_v = 0,009 \text{ м}^3/\text{ч}$ $t_{\text{эксп.}} = 267 \text{ с}$	
		УФ	УФ+Оз	УФ	УФ+Оз	УФ	УФ+Оз
Перманганатная окисляемость, мг/л	8,2	5,9	4,4	4,84	3,4	3,76	2,9
АПАВ, мг/л	4,7	3,2	2,8	2,6	1,5	1,3	0,6
Мутность, мг/л	28,8	28,4	28,2	27,3	25,6	19,5	17,8
Цветность, град.	52,2	48,7	38,1	43,4	35,3	39,2	18,6

Примечание: условные обозначения: Q_v – расход воды; $t_{\text{эксп.}}$ – время экспозиции; АПАВ – анионоактивные поверхностно-активные вещества. Источник УФ-излучения – лампа ДРТ-400; доза озона 3 мг/л, время контакта 10 мин.

При совместной обработке воды, содержащей антропогенные примеси, озоном и УФ-облучением эффективность очистки по различным показателям по сравнению с применением одного УФ-облучения повышалась на ~ 7-15 % (табл. 3).

Совместная обработка пероксидом водорода (H_2O_2) с дозой 3 %-го раствора 10 мг/л и УФ-облучением воды, характеризующейся цветностью 90 град. и содержанием нефтепродуктов 1,5 мг/л, анионоактивных поверхностно-активных веществ (АПАВ) 1,4 мг/л и фенолов 0,9 мг/л, обеспечивала обесцвечивание воды на 56 %, очистку ее от нефтепродуктов на 67 % и АПАВ – на 86 %.

Весьма эффективным технологическим приемом при наличии в исходной воде хлорорганических и фосфорорганических пестицидов оказалось совместное использование озона и пероксида водорода. Так, при содержании в исходной воде пестицида 2,4-Д до 180 мкг/л и цветности до 80 град., предварительная обработка воды 3 %-м раствором H_2O_2 с дозой 10 мг/л позволила снизить требуемую дозу озона с 16 мг/л до 6-8 мг/л. При этом эффект очистки воды по 2,4-Д составил 50-60 %. Снижение содержания фосфорорганических пестицидов при их начальной концентрации 250 мкг/л и цветности воды 70 град. обеспечивалось на 50–80 % при уменьшении необходимой дозы озона с 18 до 8 мг/л.

Обработка воды сильными окислителями требует соответствующего обоснования в каждом конкретном случае с учетом возможного образования побочных продуктов реакции, зачастую более токсичных, чем исходные. Поэтому на последующих стадиях очистки воды в состав технологической схемы целесообразно включать фильтро-

вальные сооружения с комбинированными инертно-сорбционными загрузками.

Фильтрация через гранулированно-волоконистые слои. Впервые предложенная автором комбинированная гранулированно-волоконистая загрузка скорых фильтров [3] особенно перспективна при значительных колебаниях концентраций взвешенных веществ в очищаемой воде.

Для оценки процессов, происходящих в комбинированной загрузке толщиной x при фильтровании воды через нее в течение некоторого промежутка времени t , были построены экспериментальные кривые кинетики послойного осветления воды, описываемые в общем виде функцией типа $C/C_0 = f(x, t)$.

На основании результатов технологического моделирования в условиях действующих водопроводных сооружений г. Кишинев были получены безразмерные комплексы, отражающие зависимости эффектов осветления воды в нижнем гранулированном C_1/C_0 и верхнем волоконистом C_2/C_1 фильтрующих слоях от структурных свойств загрузки, скорости фильтрования и потерь напора к концу фильтроцикла:

$$\ln \frac{C_1}{C_0} = 9,47 - 1,48 \ln \left(\frac{l_n}{vt} \right) + 0,99 \ln \left(\frac{d_n}{vt} \right) + 0,92 \ln \left(\frac{h_n}{vt} \right), \quad (4)$$

$$\ln \frac{C_2}{C_1} = 5,1 - 1,32 \ln \left(\frac{l_{\text{вн}}(1-\varepsilon)}{vt} \right) + 1,22 \ln \left(\frac{4,75 \cdot 10^{-3} \sqrt{(1-\varepsilon)}}{vt} \right) + 0,03 \ln \left(\frac{h_{\text{вн}}}{vt} \right), \quad (5)$$

где C_0, C_1, C_2 – концентрация взвешенных веществ в исходной воде, после волоконистого и гранулированного пенопластового слоя загрузки, соответственно, мг/л; $d_{\text{п}}$ – диаметр гранул пенопласта, мм; $h_{\text{п}}, h_{\text{вд}}$ – потери

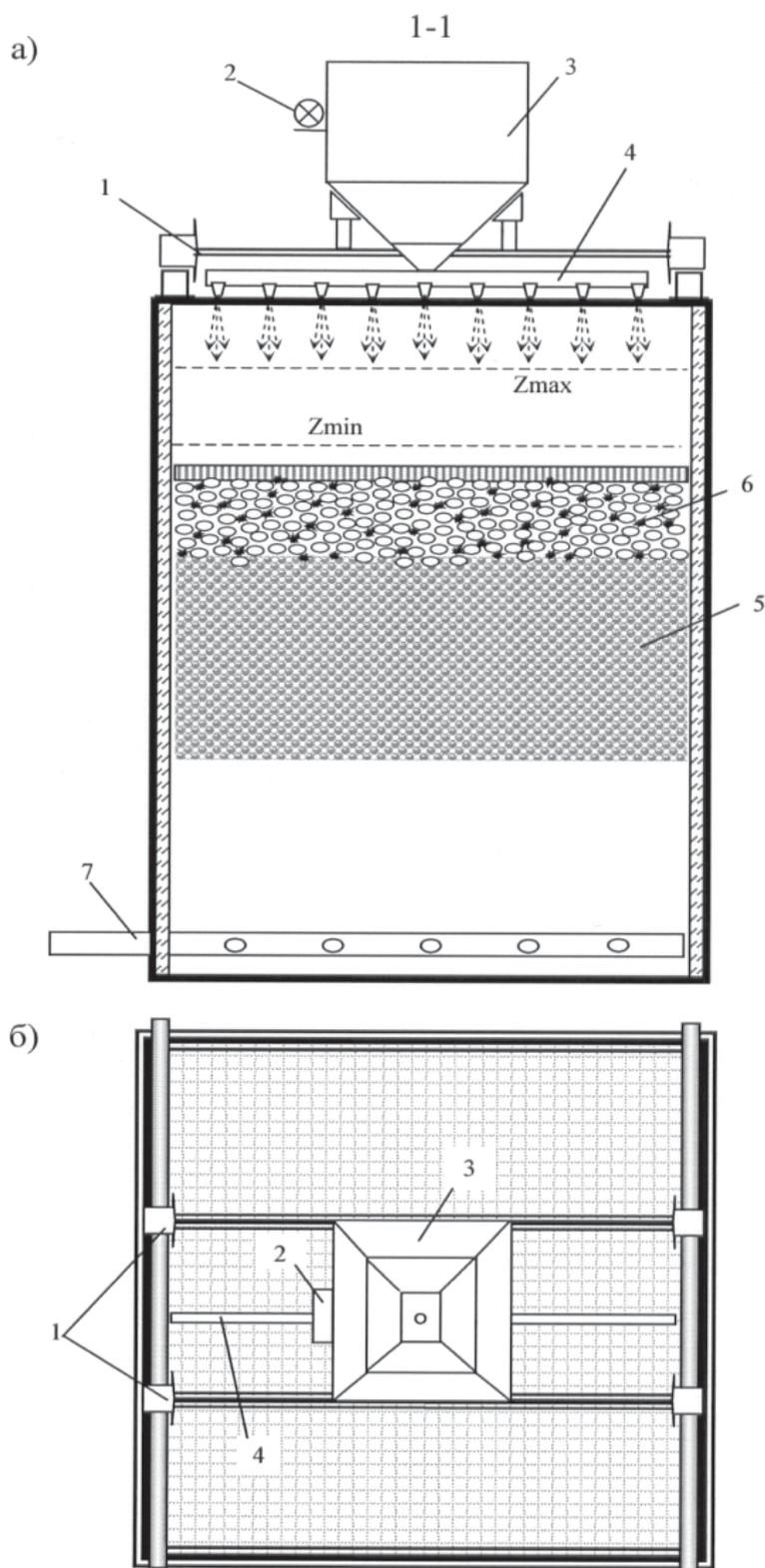


Рис. 3. Фильтр с осветлительно-сорбционной загрузкой и системой подачи и распределения сорбента: а – разрез; б – вид сверху 1 – передвижная рама; 2 – компрессор; 3 – емкость для замачивания и дозирования сорбента; 4 – распределительная гребенка; 5 – осветлительная инертная загрузка; 6 – комбинированная осветлительно-сорбционная загрузка; 7 – дренажная система; Z_{max} – уровень воды в начале промывки фильтра; Z_{min} – уровень воды в конце промывки, при котором осуществляется ввод сорбента

напора в гранулированном и волокнистом слоях толщиной l_{II} и $l_{ВЛ}$, соответственно, м; t – продолжительность фильтроцикла, ч; ε – коэффициент сжатия волокон; v – скорость фильтрации, м/ч.

Формулы (4) и (5) справедливы для безреагентного фильтрования суспензий с минеральной взвесью при $t = 6-13$ ч, C_0 до 250 мг/л и C_2 до 5–10 мг/л с параметрами гранулированного пенопластового ($d_{II} = 1-1,8$ мм; $l_{II} = 0,7-1$ м; $m = 0,4-0,5$) и волокнистого ($d_{ВЛ} = 1-2$ мм; $l_{ВЛ} = 1,1-0,45$ м; $\varphi = 0,2-0,3$; $m = 0,45-0,55$) слоев. Отклонение расчетных значений C_1/C_0 и C_2/C_1 от экспериментальных при указанном интервале варьирования параметров фильтрования и загрузки не превышало 8–15 %.

Промывка гранулировано-волокнистой загрузки осуществляется нисходящим потоком очищенной воды из надфильтрового пространства. Результаты исследований показали, что относительное расширение комбинированного слоя, при котором происходит отмывка загрузки, составляет от 15 до 20 % при интенсивности 18–22 л/с.м². Основная масса загрязнений при этом удаляется в течение первых двух минут.

Глубокая доочистка воды в осветлительно-сорбционном слое. В разработанной конструкции фильтра с осветлительно-сорбционной загрузкой (рис. 3) исходная вода фильтруется в направлении снизу вверх через инертную плавающую загрузку, в верхний слой которой на финишной стадии промывки периодически по мере необходимости вводится сорбционный мелкозернистый материал. Разработанный способ ввода мелкогранульного сорбента в толщу плавающей полимерной загрузки позволяет формировать комбинированный слой требуемой высоты и выводить после окончания фильтроцикла отработанный сорбционный материал за пределы корпуса фильтра вместе с промывной водой.

Адсорбционная способность комбинированного слоя фильтрующей загрузки осветлительно-сорбционных фильтров и взаимное влияние его составляющих определяется в большей степени сорбционными характеристиками активного углеродного материала.

Проведенные исследования подтвердили известные данные о том, что минимально необходимое время достижения адсорбционного равновесия для веществ с низкой молекулярной массой составляет 10 мин, для высокомолекулярных веществ, обуславливающих цветность природных вод – 15 мин. На основании построенных изотерм адсорбции для цветности, перманганатной окисляемости и азота аммонийного были рассчитаны

таны константы адсорбционного равновесия k и β , определены технологические характеристики сорбентов, рекомендуемых для извлечения отдельных антропогенных загрязнений, представленных в табл. 4.

Было установлено, что при скоростях фильтрования 5–7 м/ч эффективность реагентной очистки воды, содержащей органические вещества, на фильтре с инертно-сорбционной загрузкой на 10–20 % ниже, чем на двухслойном фильтре со стационарным слоем угля на второй ступени (табл. 5).

Исследования процесса *реагентного извлечения высокоустойчивой коллоидной взвеси и нефтепродуктов* на осветлительно-сорбционных фильтрах проводились также на воде поверхностного ливневого стока, близкого по составу к природным водам в техногенных районах. Результаты показали, что после безреагентного отстаивания и последующей обработки воды флокулянтами «Праестол» или ВПК-402 с дозами от 0,3 до 1 мг/л мутность воды снижается с 15–80 до 0,5–3 мг/л, а содержание нефтепродуктов с 5–7 до 0,2–0,1 мг/л. Скорость фильтрования в опытах составляла 5–6 м/ч, толщина каждого из слоев загрузки – 1,6 м, диаметр гранул пенополистирола и сорбента не превышал 1–2 мм.

Приведенные выше результаты исследований отдельных технологических процессов и сооружений явились основой для разработки новых и усовершенствования существующих технологических схем водоочистки при наличии тех или иных примесей антропогенного происхождения в исходной воде с различной их концентрацией.

Таблица 4

Ориентировочная область и условия применения активных углей в зависимости от структуры и размеров молекул антропогенных веществ, адсорбируемых из природных вод

№ п/п	Адсорбируемые вещества из водных растворов	Размер молекул адсорбируемых веществ, нм	Предпочтительный размер пор адсорбентов	Примеры сорбентов	Время контакта, не менее, мин.
1.	Азот аммонийный, азот нитритный, фенол, хлороформ (низкомолекулярные соединения)	0,63	Микропоры $0,6 < \tau < 1,6$ супермикропоры $\tau < 1,6$	АГ-3, АГ-ОВ, МАУ-100	10-12
2.	Гуминовые кислоты, нефтепродукты, СПАВ (высокомолекулярные соединения)	> 1,8	Мезопоры $1,6 < 200$	СГН-30	15-20
3.	Смесь низкомолекулярных (азот аммонийный) и высокомолекулярных веществ (нефтепродукты, СПАВ)	0,6-1,8 и более	Микро- и мезопоры 0,6-200	АГ-3, МАУ-100	15-20

Примечания: толщина комбинированного слоя загрузки 0,75–0,95 м, крупность зерен инертного материала 0,5–1,5 мм.

Таблица 5

Эффективность работы комбинированного сооружения (ФПЗ+СорбФ) и осветлительно-сорбционного фильтра (ОСФ)

Показатель	Исходная вода	Очищенная вода после сооружений	
		ФПЗ + СорбФ	ОСФ
Цветность, град.	43,5	15,6	18,5
Запах, баллы	3	отс.	отс.
Фенол, мкг/л	0,9	0,49	0,54
Перманганатная окисляемость, мг/л	12,8	4,2	4,7
Азот аммонийный, мг/л	0,69	0,19	0,28

Примечание: ФПЗ – фильтр с плавающей загрузкой ($l_{\text{п}} = 1,5$ м, $d_{\text{п}} = 0,7–1,2$ мм); СорбФ – фильтр со стационарным слоем активированного угля ($l_{\text{г}} = 1,5$ м, $d_{\text{г}} = 1–1,2$ мм).

Для цветных холодных маломутных вод, в которых постоянно присутствуют антропогенные примеси, предложена технологическая схема, предусматривающая биопредочистку, озонирование воды с последующим реагентным осветлением и сорбцией на активированном угле и ее обеззараживание. Преимуществом такой технологии является: снижение нагрузки на очистные сооружения за счет частичного удаления из воды антропогенных загрязнений на биореакторе; рациональное использование сорбента после контактного осветления воды на первой ступени фильтра в инертном слое плавающей загрузки; повторное использование промывной воды после второй ступени фильтра для промывки первой ступени, позволяющее сократить расходы электроэнергии, промывной воды и затраты на уплотнение и обезвоживание осадка промывных вод.

При непродолжительном периоде появления в природной воде антропогенных загрязне-

ний (до 3 месяцев в году) и относительно высоких температурах воды (средние и южные регионы России) эффективность работы биореактора с насадкой для прикрепленных микроорганизмов повышается, а необходимость в стационарном адсорбере отпадает. В таких случаях, при соответствующем обосновании может применяться взамен озонирования первичное хлорирование воды с малыми дозами и преаммонизацией, а заключительная стадия обработки воды осуществляться на осветлительно-сорбционном фильтре. В условиях длительного периода низких температур очищаемых вод ($T \leq +4^\circ\text{C}$) схема может быть дополнена контактной камерой хлопьеобразования с зернистой средой, а биореактор исключен.

Для уточнения области применения такой технологии были проведены испытания нескольких вариантов схем с различным набором водопроводных очистных сооружений на воде р. Волга (водозабор с. Пристанное Саратовской обл.), характеризующейся малой мутностью (до 11 мг/л), цветностью до 60 град., перманганатной окисляемостью до 14,7 мг/л, наличием нефтепродуктов (до 0,55 мг/л), АПАВ (до 1 мг/л) и других антропогенных загрязнений. Результаты исследований представлены в табл. 6.

В других опытах, при дозе озона 5,4 мг/л, дозах растворов сернокислого алюминия 20 мг/л с концентрацией рабочего раствора 5 %

Ключевые слова:

интенсификация, антропогенные примеси, технологии, биологическая предочистка, преозонирование, окислители, осветлительно-сорбционный фильтр

и полиакриламида 0,4 мг/л, цветность уже на первой стадии обработки воды озоном снижалась с 50-65 до 22 град., содержание АПАВ с 3,2 до 0,4 мг/л, окисляемость уменьшилась с 10,4 до 6,2 мг/л, а затем, после фильтрования – до 3,2 мг/л. Содержание железа общего в очищенной воде не превышало 0,3 мг/л при его начальной концентрации 1,4 мг/л.

Более высокий эффект очистки был достигнут при фильтровании частично очищенной воды через комбинированную осветлительно-сорбционную загрузку. Режимы озонирования и коагулирования были близки к предыдущему фильтроциклу – доза сорбента марки СГН-30 составляла 25-33 мг/л. Температура воды в этом опыте не превышала $+2,2^\circ\text{C}$.

Возможность расширения области применения другой технологии изучалась на речной воде с добавлением в нее компонентов антропогенного происхождения. Эффективность очистки воды по такой схеме (табл. 7) оценивалась по физико-химическим и бактериологическим показателям.

На рис. 4 представлены основные сооружения в единой технологической схеме очистки природных вод с повышенными мутностью и антропогенной загрязненностью. В отличие от известных, предлагаемая технология позволяет гибко реагировать на возможное появление в воде примесей антропогенного характера; эффективно использовать окислительную мощность озона и воздействие ультрафиолета с после-

Таблица 6

Эффективность технологических схем очистки воды р. Волга

№ п/п	Показатели	Исходная вода	Очищенная вода		
			1 схема	2 схема	3 схема
1.	рН	7,6–7,9	7,3	7,6	7,7
2.	Перманганатная окисляемость, мг/л	9,9–14,7	11	7,4	3,4
3.	Химическое потребление кислорода, мг/л	24,2–34	н/опр.	19,7–18,1	9,4–10,6
4.	Мутность, мг/л	3,6–11	н/опр.	отс.	отс.
5.	Цветность, град.	32–60	17	9,1	1,5
6.	Сухой остаток, мг/л	123–156	123–156	102–134	н/опр.
7.	Нефтепродукты, мг/л	0,38–0,55	н/опр.	0,35	н/опр.
8.	АПАВ, мг/л	0,9–1	0,18–0,2	0,15	0,1–0,16
9.	Азот аммонийный, мг/л	0,71	0,62	0,54	0,4
10.	Нитриты, мг/л	0,04	0,014	0,011	0,008
11.	Нитраты, мг/л	3,3–5	н/опр.	2,2–4	0,6–2,6
12.	Медь, мг/л	0,35	н/опр.	0,071	0,045
13.	Сульфаты, мг/л	33,7–41,7	20,6	27,2–29,8	21–32,7
14.	Хлороформ, мкг/л	17,2–25,3	н/опр.	16–19,5	2,65
15.	Четыреххлористый углерод, мкг/л	4	н/опр.	5,3	отс.

Примечание: условные обозначения: 1 схема: БР+О₃(1); 2 схема: БР+О₃(1)+К+ФПЗ; 3 схема: БР+О₃(1)+К+СФ+О₃(2)+ЦФ, где БР – биореактор; О₃(1) – первичное озонирование; К – коагулирование; ФПЗ – фильтр с плавающей пенополистирольной загрузкой; СФ – скорый фильтр с кварцевой загрузкой; О₃(2) – вторичное озонирование; ЦФ – цеолитовый фильтр доочистки.



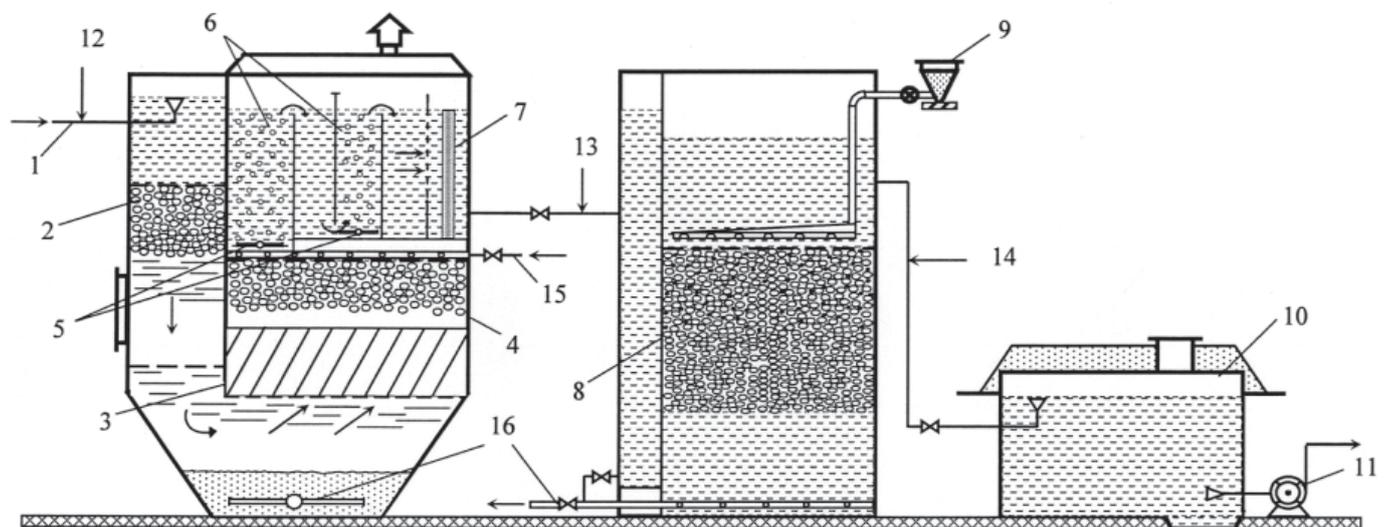
Таблица 7

Эффективность очистки природных вод, содержащих антропогенные примеси

№ п/п	Показатели	Значения показателей		СанПиН 2.1.4.1074-01
		на входе	на выходе	
1.	Цветность, град.	68,5-71,1	7,7-12,8	20
2.	Мутность, мг/л	15-20	0-0,5	1,5
3.	pH	7,7-8,1	7-8	6-9
4.	Перманганатная окисляемость, мг/л	11,6-11,9	8-5,6	5
5.	Фенолы, мг/л	0,094	0	0,001
6.	Нефтепродукты, мг/л	0,64-1,1	0,06-0,2	0,1
7.	АПАВ, мг/л	1,7	0,3	0,5
8.	Медь, мг/л	3,8-5,5	0,15-0,75	1
9.	Цинк, мг/л	4,8-5	2,9	5
10.	Кадмий, мг/л	0,176	0,11	0,001
11.	Железо, мг/л	0,54-0,73	0,15	0,3
12.	Марганец, мг/л	0,19	0,03	0,1
13.	Алюминий, мг/л	0,08-1,04	0,04	0,5
14.	Общее микробное число, ед/мл	160-180	5-10	50

↓ **Рис. 4.** Технологическая схема глубокой очистки природных вод средней мутности, содержащих антропогенные примеси.

1 – подача исходной воды; 2 – контактная камера хлопьеобразования; 3 – блок тонкослойного отстаивания; 4 – префильтр с плавающей загрузкой; 5 – система распределения озono-воздушной смеси; 6 – контактный резервуар; 7 – камера УФ-облучения; 8 – контактный осветлительно-сорбционный фильтр; 9 – устройство и система для приготовления и подачи сорбента; 10 – РЧВ; 11 – насос; 12 – подача раствора коагулянта; 13 – подача раствора флокулянта; 14 – подача раствора гипохлорита натрия; 15 – подача чистой воды на промывку; 16 – отвод промывной воды



дующей сорбцией продуктов озонлиза на активных углях; дает возможность работать в экономичном режиме, используя озон, ультрафиолет и сорбент только в случае необходимости.

Предложенные технологии с точки зрения их экологической и санитарно-гигиенической безопасности оценивались биотестированием воды на тест-объектах – пресноводных рачках *Daphnia magna* и *Ceriodaphnia dubia* с целью выявления ее токсичности. Исследовалась исходная вода, содержащая антропогенные примеси и прошедшая на разных стадиях очистку.

Острое токсическое воздействие определялось в течение 3 сут в нормальных лабораторных условиях ($T = +23\text{ }^{\circ}\text{C}$) и в условиях температурной перегрузки ($T = +36\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $+37\text{ }^{\circ}\text{C}$). В качестве примера в *табл. 8* представлены результаты токсикологических исследований. Биотестирование проб воды, обработанных озонem и ультрафиолетом, показало, что пробы, подвергавшиеся действию только озонem, не меняли токсичности в процессе обработки. Значение LC_{50} для этих проб равнялось $1/4$. Пробы, подвергавшиеся в дальнейшем комплексной обработке озонem и ультрафиолетом, характеризовались $LC_{50} = 1/16$. В процессе обработки токсичность воды изменялась незначительно. Оба вида обработки в данном режиме с разными концентрациями техногенных добавок не вызывали появления токсичных соединений.

Заключение

Полученные результаты исследований явились основой для определения параметров работы основных сооружений, входящих в состав каждой из предложенных технологических схем. Технологические

Таблица 8

Показатели токсичности исследуемой воды

№ п/п	Наименование пробы воды	ЛТ ₁₀₀ (час)				ЛТ ₅₀ (час)				ЛС ₅₀	ЛС ₀
		+23 °С		+37 °С		+23 °С		+37 °С		+23 °С	
		Д	Ц	Д	Ц	Д	Ц	Д	Ц	Д	
1.	исходная	3	2	2	1,5	2,5	1	1,5	1	1/8	1/16
	после префильтра	5	3	2,5	2,5	3,5	1,5	1,7	1,5	1/4	1/8
	после фильтра	28	24	20	15	15	10	4,5		1/2	1/4
2.	исходная	2,5	1,5	1,7	1,2	1,5	1	1,8	1	1/8	1/16
	после обработки озоном и ультрафиолетом	2	1,2	1,2	1	1	0,7	0,7	0,5	1/16	1/32
	после префильтра	2	1,5	1,5	1,2	1,2	1	1	1,7	1/8	1/16
	после фильтра	10	8	7	5,5	5	4	3,5	2,5	1/2	1/4

Примечание: Д, Ц – тест-объекты, соответственно, дафнии и чернодафнии; ЛТ₁₀₀ (час), ЛТ₅₀ (час) – время гибели всех и половины подопытных организмов в исследуемой воде; ЛС₅₀ – разбавление, при котором выживает 50 % тест-организмов; ЛС₀ – безвредное (не отличное от контроля разбавление исследуемой воды).

схемы, вошедшие в состав разработанного нами классификатора технологий очистки природных вод [4], следует рассматривать как базовые. Рекомендации к их внедрению на конкретном водоисточнике могут уточняться дополнительными экспериментальными изысканиями, проводимыми в наиболее неблагоприятные периоды года, когда качество воды в них существенно ухудшается под воздействием антропогенных факторов.

Литература

- СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2002.
- ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в

воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (с изменениями на 28 сентября 2007 года). Утв. Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 27.4.2003.

3. Говорова Ж.М. Обоснование и разработка технологий очистки природных вод, содержащих антропогенные примеси. Дис. ... докт. техн. наук. – М.: ФГУП НИИ ВОДГЕО, 2004. 400 с.

4. Журба М.Г. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: в 3 т. Т. 2. Очистка и кондиционирование природных вод. Изд. 3-е, перераб. и доп.: Учебное пособие / М.Г. Журба, Л.И. Соколов, Ж.М. Говорова. М.: Изд-во АСВ, 2010. 552 с.

5. Журба М.Г. Предпроектные испытания инновационных технологий водоподготовки и их влияние на обоснование инвестиций / М.Г. Журба, О.Б. Говоров, Ж.М. Говорова. // Водоснабжение и канализация. 2010. № 3-4. С.64-69.



J.M. Govorova

WATER TREATMENT WITH ANTHROPOGENIC IMPURITIES

The research on bio pretreatment process, primary ozonation with co-processing of various oxidants in combination with UV irradiation, filtration through granular-fibrous layers and deep cleaning at the

sorption-clarifying filters has been presented. New and improved technologies for purification of natural waters containing anthropogenic impurities have been discussed.

Key words: intensification, anthropogenic impurities, biological pre-treatment, ozonation, oxidizers, clarifying-sorption filter