

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 628.161.2

ПОДГОТОВКА ВОДЫ ДЛЯ ХОЗЯЙСТВЕННО-ПИТЬЕВЫХ ЦЕЛЕЙ ИЗ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДОЕМОВ С ОГРАНИЧЕННЫМ ДЕБИТОМ

Ж.М. Говорова¹, А.П. Свинцов², А.Р. Коэн³

¹ Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет

Ярославское шоссе, д. 26, Москва, Россия, 129337

^{2,3} Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, д. 6, Москва, Россия, 117198

Подготовка питьевой воды для хозяйственно-питьевых целей из поверхностных водоемов с ограниченным дебитом и формирующимся под воздействием природных и антропогенных факторов качеством воды является одной из первоочередных задач. Рассмотрены методы предподготовки воды (безреагентное удаление фитопланктона на префилт্রে с плавающей загрузкой и комплексное воздействие окислителей), экспериментально подтверждена их роль в повышении эффективности процессов коагулирования воды. Рассмотрены усовершенствованные технологии водоподготовки и приведены результаты их промышленной апробации.

Ключевые слова: поверхностный водоем, антропогенная нагрузка, предподготовка воды, фитопланктон, префилтър с плавающей загрузкой, окислители, коагулирование, технологическая схема

Введение

В районах с дефицитом пресных вод проблема обеспечения малых населенных пунктов питьевой водой является особенно острой. В этих случаях альтернативой высокзатратной организации привозной питьевой воды может быть обоснованное с санитарно-гигиенической экономической точки зрения использование в качестве источников хозяйственно-питьевого водоснабжения небольших пресных озер, питаемых родниковыми подземными водами с ограниченным дебитом, и водоемов, образующихся в результате зарегулирования небольших водотоков.

В то же время при использовании таких водоисточников выбор и обоснование технологической схемы водоподготовки и поиск необходимых инвестиций на

приобретение дорогостоящих оборудования и реагентов является сложной научно-практической задачей [1]. Для ее решения требуется выполнить анализ динамики изменения качества исходной воды; определить возможность применения наиболее рациональных технологий водоочистки для малых водопроводов; обосновать менее энергозатратные методы и сооружения подготовки воды на первой стадии ее очистки; определить на основании натуральных исследований исходные данные для проектирования промышленных станций водоподготовки и выполнить технико-экономическое обоснование.

Объект исследований

Специфика формирования качества воды в водоисточниках с ограниченным дебитом изучалась нами на примере озера, расположенного в южной части Западно-Сибирской равнины (рис. 1), являющегося единственным местным поверхностным водоисточником для населенного пункта с числом жителей до 8,0 тыс. человек. Допустимый отбор воды из озера на хозяйственно-питьевое водоснабжение по санитарным условиям составляет $\sim 600 \text{ м}^3/\text{сут}$, его наибольшая протяженность достигает 1,5—2 км, а максимальная глубина — до 3,5 м.



а

б

Рис. 1. Вид на озеро: а) загрязнение береговой полосы; б) ковшевой водоприемник
[Lake view a) pollution of the coastal strip; b) feeding inlet]

Озерная вода характеризуется цветностью от 23 до 115 град. Мутность в зависимости от волновых процессов и размыва берегов, глубины воды в озере изменяется от 4 до 27,3 мг/л, перманганатная окисляемость — от 7,5 до 27,9 $\text{мгO}_2/\text{л}$. Щелочность воды достигает 7,5—8,8 ммоль/л, рН колеблется от 7,8 до 9,9. Качество озерной воды формируется под воздействием природных и антропогенной факторов. Поступление с недостаточно очищенными хозяйственно-бытовыми сточными водами, ливневым и талым стоком с поверхности водосбора большого количества органических загрязнений и биогенных веществ приводит к эвтрофикации поверхностного водоисточника, которое сопровождается избыточным развитием фитопланктона и цветением воды. Численность микроводорослей в отдельные периоды года достигает 60—100 тыс. кл/мл, а биомасса — до 20 мг/л. Массовое развитие и отмирание микроводорослей приводит к повышению ко-

личества взвесей в воде, увеличению цветности, концентрации органических соединений и численности бактерий, развитию гнилостных процессов и появлению в воде неприятных запахов и привкусов интенсивностью до 3—4 баллов, продуцируемых некоторыми актиномицетами и плесневыми грибами [8; 10].

Результаты исследований и их обсуждение

Для извлечения из воды фитопланктона, продуктов его жизнедеятельности и деструкции обычно на действующих водопроводных станциях предусматривается ее предварительная обработка высокими дозами хлора (до 6—10 мг/л) и пропускание воды через микрофильтры и дисковые сита с последующим реагентным осаждением и фильтрованием [5; 6; 9]. Однако предварительное хлорирование воды, разрушая стенки клеток планктона, лишает его плавучести, в то же время приводит к обогащению воды растворенной органикой, ухудшению ее органолептических свойств, образованию в ней большого количества хлорорганических соединений, присутствие которых в питьевой воде жестко регламентировано соответствующими нормативами. Последующая после этого реагентная обработка с использованием коагулянтов и флокулянтов повышенными дозами приводит к их перерасходу.

Повысить эффективность очистки воды из маломощных водоемов после ее коагулирования позволяет в ряде случаев применение флотации. Но при этом необходимо учитывать, что в результате флотации образуется в большом количестве способный к загниванию, плохо уплотняющийся и сильно обводненный осадок с влажностью 99—99,5%, последующее обезвоживание и утилизация которого вызывают трудности.

Применение микрофильтров и дисковых фильтров требует значительных эксплуатационных затрат при условии обеспечения гарантированной степени очистки воды от фитопланктона.

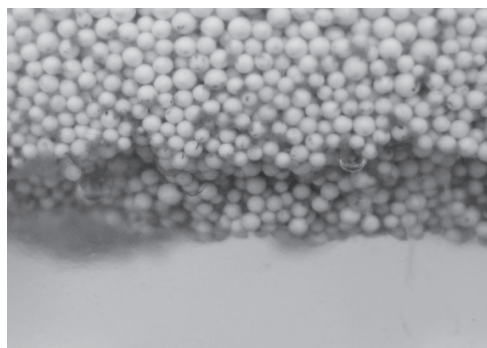
Альтернативой этим методам является задержание фитопланктона в слоях плавающей загрузки префильтра при безреагентном фильтровании воды снизу вверх и промывке загрузки сверху вниз.

Исследованиями эффективности задержания водорослей, содержащихся в исходной воде при разных скоростях восходящего фильтрования через плавающую пенополистирольную загрузку на модели префильтра (рис. 2), было установлено, что при скоростях фильтрования до 40—50 м/ч достигается эффект удаления водорослей по биомассе — до 45,1—48,7%. Снижение скоростей фильтрования до 30 м/ч позволяет повысить эффект очистки по биомассе соответственно до 49,9—52,6% при ее количестве в исходной воде до 26,2—66 мг/л и количестве клеток организмов до 14—30,7 тыс. кл/мл.

Кривые выноса задержанной в загрузке префильтра биомассы за фильтроцикл, количества водорослей и взвешенных веществ в течение промывки осуществляемой с разными интенсивностями при разных значениях грязеемкости слоя загрузки к концу фильтроцикла указывают на то, что основная масса задержанных загрязнений выносятся при интенсивностях промывного потока от 25 до 35 л/с·м² в первые 5—6 мин. промывки.



а



б

Рис. 2. Модель префильтра: а) вид сбоку; б) фрагмент плавающей загрузки с задержанными водорослями
 [Model prefilter: a) side view; b) fragment of the floating load of detainees algae]

Использование на последующем этапе подготовки воды окислителей в технологическом процессе обосновывается их ролью в обеспечении эффективности последующих процессов коагуляции и флокуляции примесей в исходной воде. Изучение этих процессов проводилось на цветной воде искусственно зарегулированного участка реки Малая Карла.

Вначале исследовалось воздействие окислителей, коагулянта — оксихлорида алюминия марки «Аква-Аурат™10» (ОХА) и флокулянта — «Праестол 650 TR» на устойчивость коллоидных частиц дисперсной фазы испытуемой воды. Для этого исходная вода подвергалась обработке воды отдельно озоном (O_3), пероксидом водорода (H_2O_2), гипохлоритом натрия ($NaOCl$) и комплексному воздействию H_2O_2 и O_3 . Затем определялась оптимальная доза ОХА путем пробного коагулирования окисленной воды по стандартной методике в интервале доз коагулянта (D_k): от 5 до 50 мг/л по Al_2O_3 , и флокулянта (D_f) от 0,05 до 0,5 мг/л. Кинетическую устойчивость частиц взвеси в воде до и после ее совместной обработки окислителями оценивали по изменению величины ζ -потенциала, определяемого методом амперометрии по микроэлектрофоретической подвижности коллоидных частиц в электрическом поле.

Сравнение процесса перезарядки ζ -потенциалов коллоидных частиц для одной и той же цветной исходной воды, предварительно обработанной разными окислителями в определенных комбинациях их доз и концентраций, а затем — раствором ОХА с D_k от 5 до 50 мг/л по Al_2O_3 и флокулянта с $D_f = 0,5$ мг/л, выявило степень влияния отдельных окислителей на процессы коагуляции примесей. Наиболее существенное влияние на снижение доз коагулянтов оказала предварительная совместная обработка воды озоном и пероксидом водорода.

Полученные результаты исследований подтвердили технологическую целесообразность предварительного окисления цветных природных поверхностных вод с использованием O_3 и H_2O_2 или $NaOCl$ перед ее коагулированием.

Необходимость проведения исследований процессов коагулирования и флокулирования маломутных цветных вод после применения окислителей обусловлена спецификой формирования физико-химического состава воды в водоемах с ограниченным дебитом, внедрением новых типов коагулянтов и флокулянтов в последние годы и недостаточной изученностью влияния сильных окислителей (гипохлорит натрия, раствор оксидантов, пероксид водорода, перманганат калия и др.) на процессы коагуляции природных и техногенных примесей.

Характеристика качества вод, на которых изучались процессы коагуляции и флокуляции приведена в табл. 1.

Таблица 1

Показатели качества исходной воды из разных водоисточников
[Indicators of source water quality from different water sources]

| Показатель | Водоисточник | | Модельный раствор |
|--|-----------------|-------------|-------------------|
| | озеро Старое | р. М. Карла | |
| Запах, баллы | 3—4 | 2—3 | 3—4 |
| Мутность, мг/л | 4—27,3 | 40—93 | 2,2—22,9 |
| Цветность, град. | 23—115 | 250—320 | 26—170 |
| Перманганатная окисляемость, mgO_2/l | 5,5—19,8 (27,9) | 12—19,7 | 7,4—8,2 |
| Азот аммонийный, мг/л | 0,4—0,7 | 2—4,8 | 1,8—2,2 |
| pH | 7,8—9,8 | 7,1—8,2 | 7,8—8,5 |
| Щелочность, мг-экв/л | 3,9—8,0 (15,6) | н/опр | 1,8—3 |
| Окислительно-восстановительный потенциал, мВ | 122,4 | 31 | 244—442 |

В опытах в качестве коагулянта применялся 4%-ный раствор ОХА (Аква-Аурат™18). Дозы по Al_2O_3 назначались в пределах от 2,5; 5,0; 7,5; 10; 15 до 20 мг/л. Пробное коагулирование производилось по стандартной методике. Результаты пробного коагулирования по эффективности отстоенных вод из разных водоисточников по мутности, цветности и перманганатной окисляемости показали, что интервал требуемых доз коагулянта для таких вод лежит в пределах от 10 до 30 мг/л по Al_2O_3 . Величины Eh и ζ -потенциала в испытуемом диапазоне доз коагулянта достигали своих максимальных значений соответственно +320 и +40 мВ.

В практике очистки природных поверхностных вод большее распространение получают высокомолекулярные синтетические флокулянты с молекулярной массой равной $10^4 \div 10^7$, в том числе «Праестол» и полиДАДМАХ.

Исходная вода (см. табл. 1) подвергалась предварительному прехлорированию с дозой по активному хлору 2,5 мг/л и коагулированию 4—5%-ным раствором СА. В результате опытов рабочая доза коагулянта была установлена в пределах от 22 до 36 мг/л.

В дополнение к коагулянту использовали флокулянт — «Праестол 650TR» и органический коагулянт — полиДАДМАХ. Добавление последнего в виде 0,01%-го раствора с установленной требуемой дозой 0,4 мг/л позволило уменьшить требуемую рабочую дозу СА с 36 до 22 мг/л без существенного ухудшения качества воды по перманганатной окисляемости при улучшении его по цветности и мут-

ности. Потеря устойчивости коллоидной системы при этом подтверждалась перезарядкой и увеличением ζ -потенциала. Сопоставление эффективности полиДАДМАХ с флокулянтом «Праестол 650TR» показало, что в случае его применения с дозой коагулянта 22 мг/л эффект последующего отстаивания воды по основным показателям качества оказался несколько выше. Однако при этом рабочая доза его оказалась почти в 5 раз выше по сравнению с флокулянтом марки «Праестол 650 TR».

Анализ усовершенствованных в последние годы технологий подготовки воды из водоисточников с повышенными антропогенными нагрузками, предложенных авторами [3] показал, что при использовании в качестве водоисточников эвтрофированных водоемов с ограниченным дебитом зачастую повышаются требования к их санитарно-гигиенической надежности.

Полученные результаты исследований процессов предподготовки воды перед подачей ее на основные сооружения позволили разработать усовершенствованную технологическую схему (схема 1) подготовки питьевой воды из маломощных водоисточников [2]. Она отличается от известных применением в ее составе префильтров с плавающей загрузкой, окислителей, коагулянтов и флокулянтов, двухступенных осветлительно-сорбционных фильтров (ОСФ) и обеззараживания ультрафиолетовым-излучением с ультразвуком и раствором гипохлорита натрия. Формирование слоя комбинированной загрузки в ОСФ осуществлялось путем введения мелкогранульного сорбента в верхний слой пенополистирола на последней стадии его промывки [7].



Рис. 3. Станция подготовки питьевой воды: а) осветлительный двухступенный фильтр с инертными загрузками; б) контактная колонна постозонирования воды; в) сорбционный фильтр
 [Station potable water a) clarification two-stage filter with inert downloads; b) contact the column of polotnyany water; c) a sorption filter]

При значительных постоянных антропогенных нагрузках на водоисточник схему приходится дополнять постозонированием и сорбцией (схема 2). При этом в двухступенных контактных фильтрах используются только инертные загрузки. На рисунке 3 представлены фрагменты станции подготовки питьевой воды производительностью до 600 м³/сут.

Разработанная технологическая схема с двухступенным последовательным фильтрованием воды (схема 3) и предварительным вводом раствора гипохлорита натрия с дозами по активному хлору от 5,8 до 8,8 мг/л, коагулированием с дозами первичного коагулирования 3%-го раствора ОХА от 10 до 15 мг/л, и вторичного (в ряде фильтроциклов) — от 6,4 до 7 мг/л с добавлением флокулянта «Праестол 653 TR» в количестве до 0,5 мг/л позволяет обеспечить глубокую степень очистки воды не только по мутности и цветности, но по железу и марганцу, снижение которого, как и остаточного алюминия, происходило благодаря наличию в составе загрузки фильтра второй ступени катализатора-сорбента МС [4].

Область применения предложенных усовершенствованных технологий по схемам 1—3 приведена в табл. 2, а основные технико-экономические показатели в ценах 2012 года — в табл. 3 [2].

Таблица 2

Область применения технологий подготовки питьевой воды
[The scope of technologies of preparation of drinking water]

| Наименование | Технологические схемы | | |
|--|-----------------------|-----------|----------|
| | схема 1 | схема 2 | схема 3 |
| Производительность, тыс. м ³ /сут | 250—1000 | 1000—5000 | 250—5000 |
| Запах, баллы | 2—3 | 3—4 | 2—3 |
| Мутность, мг/л | 5—30 | 5—30 | 50 |
| Цветность, град. | 25—150 | 25—150 | 180 |
| Перманганатная окисляемость, мгО ₂ /л | 10—12 | 15—20 | 12—15 |
| Железо общее, мг/л | 1—3 | 1—2 | 2—3 |
| Марганец, мг/л | 0,1—0,2 | 0,1—0,2 | 0,5—1,0 |
| Фитопланктон, тыс. кл./л | 14—35 | 14—35 | 15—30 |

Таблица 3

Технико-экономические показатели для станции водоподготовки
производительностью 1500 м³/сут.
[Technical and economic indicators for water treatment plant with a capacity of 1,500 m³/day]

| Наименование | Технологические схемы | | |
|---|-----------------------|---------|---------|
| | схема 1 | схема 2 | схема 3 |
| Капитальные вложения, тыс. руб. | 21871 | 26036 | 27734 |
| Эксплуатационные затраты, тыс. руб. | 8060 | 11466 | 12361 |
| Срок окупаемости, годы | 4 | 4 | 4 |
| Приведенные затраты, тыс. руб. | 13528 | 17975 | 19294 |
| Себестоимость подготовки воды, руб/м ³ | 14,7 | 20,9 | 22,6 |

Заключение

На примере нескольких поверхностных водоисточников с ограниченным дебитом выполнен анализ качества воды и определена их специфика. Выполненными экспериментальными исследованиями показана существенная роль пред-

подготовки воды, направленной на удаление водорослей и окисление органических загрязнений перед последующим коагулированием и флокулированием воды.

Предложены усовершенствованные технологические схемы подготовки питьевой воды из маломощных водоисточников в зависимости от диапазона концентраций загрязнений и определена их эффективная область применения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Говорова Ж.М., Журба М.Г.* Обоснование водоочистных технологий и их инвестирования. М., 2012. 176 с.
- [2] *Говорова Ж.М., Магомадов З.Р.* Подготовка воды из маломощных водоемов // Водоснабжение и санитарная техника. 2012. № 2. С. 62—70.
- [3] *Драгинский В.Л., Алексеева Л.П., Гетманцев С.В.* Коагуляция в технологии очистки природных вод. М., 2005. 571 с.
- [4] *Журба М.Г., Говорова Ж.М., Куликовский В.А., Гладкий А.И., Магомадов З.Р.* Подготовка питьевой воды из зарегулированных водоисточников с повышенным содержанием органических веществ // Водоснабжение и канализация. 2009. № 7. С. 43—49.
- [5] *Козлов М.Н., Арутюнова И., Ягунков С., Арбузов Р., Абрамов С., Басихин П.* Перспективный метод удаления фитопланктона // Вода. 2014. № 1. С. 18—25.
- [6] *Кульский Л.А.* Теоретические основы и технология кондиционирования воды: Процессы и аппараты. Киев: Наукова думка, 1983. 527 с.
- [7] *Покровский М.С., Говорова Ж.М.* Осветлительно-сорбционный фильтр // Водоснабжение и санитарная техника. 2000. № 7. С. 7—11.
- [8] *Скрябин А.Ю., Поповьян Г.В., Тронь И.А.* Микроводоросли как фактор, влияющий на органолептические свойства воды реки Дон // Водоснабжение и санитарная техника. 2015. № 8. С. 38—41.
- [9] Технический справочник по обработке воды / Л. Андриаирадо и др. Санкт-Петербург: Водоканал Санкт-Петербурга: Новый журн., 2007. 1696 с.
- [10] *Шевелева Н.Г., Воробьева С.С.* Состояние и развитие фито- и зоопланктона нижнего участка Ангары, прогноз формирования планктона в Богучанском водохранилище // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. 2009. Т. 2. № 3. С. 313—326.

WATER TREATMENT FOR HOUSEHOLD PURPOSES FROM SURFACE WATER BODIES WITH LIMITED DEBIT

Zh.M. Govorova¹, A.P. Svintsov², A.R. Kojen³

¹ Department of water Supply and sanitation
Moscow State University of Civil Engineering
Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, Russia, 129337

^{2,3} Department of Civil Engineering
Peoples' Friendship University of Russia
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

Water treatment for household purposes from surface water bodies with limited debit and that emerging under the influence of natural and anthropogenic factors of water quality is one of the priorities. Methods of pretreatment of water (the reagent-free removal of phytoplankton in the prefilter with

floating charge and the combined effect of oxidants) and experimentally confirmed their role in improving the efficiency of water coagulation process are considered. Advanced water treatment technologies are considered, and the results of their industrial testing are given.

Key words: surface water body, anthropogenic load, pretreatment of water, phytoplankton, prefilter with floating charge, oxidants, coagulation, technological outline

REFERENCES

- [1] *Govorova Zh.M., Zhurba M.G.* Obosnovanie vodoочистnyh tehnologij i ih investirovanija [Substantiation of water treatment technologies and their investments]. M., 2012. 176 p.
- [2] *Govorova Zh.M., Magomadov Z.R.* Podgotovka vody iz malomoshhnyh vodoemov [Production of drinking water from small-scale water reservoirs]. Vodosnabzhenie i sanitarnaja tehnika [Water supply and sanitary technique]. 2012. No. 2. Pp. 62—70.
- [3] *Draginskij V.L., Alekseeva L.P., Getmancev S.V.* Koagulyacija v tehnologii ochistki prirodnyh vod [Coagulation in natural water treatment technology]. M., 2005. 571 p.
- [4] *Zhurba M.G., Govorova Zh.M., Kulikovskij V.A., Gladkij A.I., Magomadov Z.R.* Podgotovka pit'evoj vody iz zaregulirovannyh vodoistochnikov s povyshennym soderzhaniem organicheskikh veshhestv [Preparation of drinking water from regulated water sources with high content of organic matter]. Vodosnabzhenie i kanalizacija [Water supply and Sewerage]. 2009. No. 7. Pp. 43—49.
- [5] *Kozlov M.N., Arutjunova I., Jagunkov S., Arbuзов R., Abramov S., Basihin P.* Perspektivnyj metod udalenija fitoplanktona [A promising method for removal of phytoplankton]. Journal Voda [Water Magazin]. 2014. No. 1. Pp. 18—25.
- [6] *Kul'skij L.A.* Teoreticheskie osnovy i tehnologija kondicionirovanija vody: Processy i apparaty [Theoretical foundations and technology of water conditioning Processes and apparatus]. Kiev: Naukova dumka [Kiev: Naukova Dumka]. 1983. 527 p.
- [7] *Pokrovskij M.S., Govorova Zh.M.* Osvetlitel'no-sorbcionnyj fil'tr [Clarification and sorption filters]. Vodosnabzhenie i sanitarnaja tehnika [Water supply and sanitary technique]. 2000. No. 7. Pp. 7—11.
- [8] *Skrjabin A.Ju., Popov'jan G.V., Tron' I.A.* Mikrovodorosli kak faktor, vlijajushhij na organolepticheskie svojstva vody reki Don [Microalgae as a factor influencing the organoleptic properties of the water of the Don river]. Vodosnabzhenie i sanitarnaja tehnika [Water supply and sanitary technique]. 2015. No. 8. Pp. 38—41.
- [9] *Tehnicheskij spravocnik po obrabotke vody* [Technical reference for water treatment]. L. Andriamirado i dr. Sankt-Peterburg: Vodokanal Sankt-Peterburga: Novyj zhurn. [Saint Petersburg: Water utility Saint Petersburg: the New Sib.]. 2007. 1696 p.
- [10] *Sheveleva N.G., Vorobyeva S.S.* Sostojanie i razvitie fito- i zooplanktona nizhnego uchastka Angary, prognoz formirovanija planktona v Boguchanskom vodohranilishhe [Status and development of phyto — and zooplankton of the lower portion of the Angara, the prediction of the formation of plankton in the Boguchany reservoir]. Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Serija: Biologija [Journal of Siberian Federal University. Series: Biology]. 2009. V. 2. No. 3. Pp. 313—326.