

РОЛЬ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОЛОГИЯХ ОЧИСТКИ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Докт. техн. наук, доц. СЕДЛУХО Ю. П., асп. ЛЕМЕШ М. И.

Белорусский национальный технический университет

Подавляющее большинство населенных пунктов Беларуси обеспечивается водой из подземных источников. Как правило, подземные воды, являясь высококачественными в санитарно-бактериологическом отношении, содержат повышенные концентрации растворенного железа, которое может находиться в сочетании с другими веществами, концентрации которых превышают установленные нормы (марганец, аммонийный азот, уголекислота, сероводород, метан, и др.). Однако более 50 % централизованных систем водоснабжения городов и большинство сельских населенных пунктов не имеют станций обезжелезивания, хотя вода там не соответствует санитарным нормам. Поэтому главной проблемой обеспечения населения Беларуси водой требуемого качества является проблема водоподготовки.

В практике обезжелезивания подземных вод наибольшее распространение получили аэрационные методы. В Беларуси и ряде других стран с середины 60-х гг. прошлого столетия практически повсеместно применяется метод упрощенной аэрации с последующим фильтрованием в напорном или безнапорном вариантах. Он является наиболее изученным и рекомендуется для применения при содержании железа в исходной воде до 10 мг/л (в том числе закисного – не менее 70 %), сероводорода – до 0,5 мг/л, pH – не менее 6,8 и щелочности – более $(1 + \text{Fe}^{2+}/28)$ [1].

Несмотря на многочисленные исследования этого метода, обращает на себя внимание существенный разброс ограничений его применимости по приведенным и ряду других показателей (аммонийный азот, окисляемость, диоксид углерода, марганец и др.). Это свидетельствует о сложности протекающих процессов и взаим-

ном влиянии на них состава обрабатываемой воды [2–4].

Многие ученые уже в первых исследованиях аэрационных методов обезжелезивания подземных вод отмечали существенное влияние на их эффективность стихийно развивающихся биологических процессов [4, 5]. На насадках контактных градилен, в толще или на поверхности фильтрующих загрузок образовывались скопления железобактерий, которые, как правило, проявляли каталитический эффект и способствовали повышению эффективности процесса обезжелезивания. Специалисты фирмы «Дегремон» отмечают, что «...нельзя четко определить границу между чисто химическим и биологическим окислением и многие сооружения первого типа эффективно работают за счет роста микроорганизмов» [6, 7].

Несмотря на эти факты, участие микроорганизмов в процессах обезжелезивания долго недооценивалось, а их влияние на технологические и конструктивные параметры станций обезжелезивания в большинстве случаев не учитывается до сих пор. Все кинетические константы и параметры безреагентных (аэрационных) методов определяются, исходя из реакций и процессов чисто химического окисления железа [2–5].

Характеристика типичного биоценоза подземных вод. В последние годы значительно вырос интерес исследователей к биологическим методам очистки подземных вод, в первую очередь к биологическому удалению железа и марганца [8–12]. К железобактериям относятся различные группы одноклеточных, кокковых и нитчатых видов микроорганизмов, общим для которых является способность в присутствии

растворенного кислорода окислять закисное железо с образованием на своей поверхности его окислов в виде чехлов или капсул. Наиболее часто на станциях обезжелезивания встречаются представители родов *Gallionella*, *Leptothrix*, *Crenothrix*, *Siderocapsa* [10–12].

Степень развития тех или иных видов железобактерий и механизм окисления железа зависят от состава обрабатываемой воды и условий протекания технологического процесса. Так, *Gallionella* способна расти на минеральной среде без органических веществ и получать энергию в процессе окисления закисного железа. Выход энергии у нее настолько мал, что для синтеза 1 г клеток микроорганизмов необходимо выделять 500 г гидроокиси железа [10]. У представителей рода *Leptothrix* окисление железа связано с действием перекиси водорода, выделяющейся в метаболических процессах при окислении органических веществ. *Siderocapsa* окисляет железо в результате разложения железоорганических комплексов, например соединений с гумусовыми веществами [10].

Относительно механизма накопления оксидов железа известно, что он включает в себя процессы как биологической природы (окислительные), так и небиологической (сорбционные) [13].

В основе биологических процессов лежит перекисный механизм – детоксикация H_2O_2 , образующегося в процессе дыхания у широкого круга гетеротрофных аэробных микроорганизмов [13].

Процесс сорбции имеет в основе физико-химическую природу и в значительной мере обусловлен химическим составом и свойствами поверхностных структур клетки. Он включает связывание ионов железа внеклеточными экзополимерами (капсулы, слизистые слои, чехлы), клеточной стенкой, цитоплазматической мембраной и в незначительном количестве – некоторыми структурными элементами цитоплазмы (после их транспорта в клетку с участием сидерофоров). Следует отметить, что накопление оксидов железа в значительном количестве происходит только на поверхности клеток [13].

Технологические особенности развития биоценоза в сооружениях водоподготовки. По результатам обследования многих станций обезжелезивания, работающих по методу

упрощенной аэрации с фильтрами, промывка которых производится нехлорированной водой, в большинстве из них обнаруживаются железобактерии. Свидетельством этого является их большое количество в промывной воде и образовавшихся отложениях на поверхности, а также в толще фильтрующих загрузок. Причиной развития железобактерий является их наличие практически во всех исследованных водозаборных скважинах, возможность поступления через систему аэрации, из водоводов и создающиеся благоприятные условия протекания биологических процессов [8–12].

На станции обезжелезивания в г. Новополюкче в период выполнения пусконаладочных работ было обнаружено, что часть поверхности фильтрующей загрузки покрылась тонким слоем гранул шарообразной формы. Анализ показал, что в смыве с 1 г верхнего слоя загрузки фильтров содержится $3,8 \cdot 10^9$ клеток железобактерий в виде сильно орудненных кокков [8].

При проведении исследований на станции водоподготовки в Ravnik (Северная Хорватия) также обнаружено, что важную роль в процессе удаления железа, марганца и аммиака играют биологические процессы [14]. Анализы показали, что на 1 г песчаных частиц приходится $2,4 \cdot 10^6$ клеток железо- и марганцеокисляющих бактерий, $5 \cdot 10^6$ – клеток аммиакоокисляющих бактерий, $3,3 \cdot 10^5$ – нитрифицирующих бактерий [14].

Железобактерии в процессе своего развития образуют на поверхности зерен фильтрующего материала бактериальную пленку. Она может развиваться как в толще загрузки, например щебеночной, так и преимущественно на ее поверхности, при использовании песка. В последнем случае возникает «феномен роста загрузки» [8, 12], характеризующейся увеличением толщины слоя фильтрующего материала. Он проявляется при длительной эксплуатации фильтра за счет роста биомассы железобактерий на поверхности гранул загрузки и зародышевых зернах переизмельченного фильтрующего материала. При этом образуются достаточно прочные гранулы с плотностью, меньшей плотности песка, которые представляют собой гранулированный слой биологически активной загрузки. При его достаточной толщине весь процесс изъятия железа может завершаться в

этом слое, а фильтрующий материал при этом выполняет функцию поддерживающего слоя [8, 15].

Влияние основных факторов на развитие и протекание биологических процессов. Окисление и осаждение железа – динамический процесс, на который сильно воздействуют гидравлические характеристики фильтра, скорость фильтрования, концентрации железа и растворенного кислорода, pH среды, окислительно-восстановительный потенциал (Eh), температура воды, наличие других веществ (в том числе марганца, аммиака, органических веществ и др.).

В [12] отмечается, что для биологического удаления железа в процессе фильтрования следует поддерживать следующие граничные условия: $pH \geq 6,0$; $Eh \geq \sim 15$ мВ, а для биологического удаления Mn – $pH \geq 6,5$; $Eh \geq 250$ мВ [12].

Отмечается, что окислительно-восстановительный потенциал, требуемый для удаления Fe, достигается, как правило, в результате предварительной аэрации. После удаления железа Eh повышается до значений, требуемых для удаления марганца [12]. Таким образом, удаление железа и марганца происходит последовательно. Сначала удаляется железо, что создает условия для микробиологического удаления Mn [9, 12].

Влияние изменения скорости фильтрования и исходной концентрации железа на эффективность биологического окисления рассмотрено в [15]. Произведены исследования и сравнение двух вариантов окисления железа: физико-химическое окисление и комбинированное физико-химическое и биологическое окисление железа. Отмечается, что комбинированный метод физико-химического и биологического окисления железа позволяет повысить эффективность на 5–6 % по сравнению с физико-химическим окислением [15].

Увеличение скорости фильтрования сильнее воздействует на работу фильтра, чем увеличение исходной концентрации железа. Исследование проводилось при трех различных скоростях фильтрования (9,43; 18,86; 28,29 м/ч) и четырех различных исходных концентрациях железа (1, 2, 3, 4 мг/л). Отмечается, что увеличение исходной концентрации железа в 4 раза при одной и той же скорости фильтрования не

изменяет эффективности удаления железа, в то время как увеличение скорости фильтрования в 3 раза снижает эффективность удаления железа на 13 % [15]. Данные исследований приведены на рис. 1, 2, где показано протекание процесса окисления железа в зависимости от изменения исходной концентрации железа и скорости фильтрования.

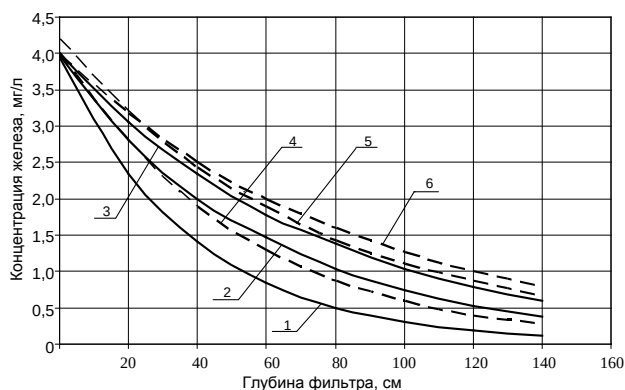


Рис. 1. Изменение содержания железа по глубине загрузки при различных скоростях фильтрования (м/ч): 1, 4 – $v = 9,43$; 2, 5 – $18,86$; 3, 6 – $28,29$; — — — комбинированное физико-химическое и биологическое окисление; - - - - физико-химическое

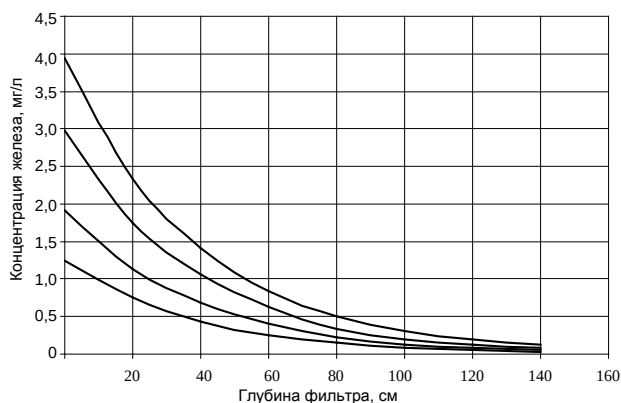


Рис. 2. Изменение концентрации железа по глубине фильтра при различных исходных концентрациях железа в условиях биологического окисления и скорости фильтрования 9,43 м/ч

Многочисленные исследования показывают возможность и гибкость биологических процессов приспосабливаться к новым условиям, демонстрируют применимость и преимущества одновременного биологического удаления Fe, Mn, NH_4 из подземных вод разного состава [15]. Влияние аммиака на процесс обезжелезивания при их совместном удалении становится существенным только при высоких исходных

концентрациях аммиака (более 2 мг/л) и увеличении скорости фильтрования [15].

При окислении железа биологическим методом отмечается, что осадки характеризуются более плотной структурой, по сравнению с осадками при чисто физико-химическом окислении [7]. Благодаря этому объем образующихся осадков меньше, следовательно, частота промывки фильтров становится ниже и уменьшается количество промывных вод. На рис. 3 показаны осадки, полученные в результате биологического (рис. 3а) и физико-химического окисления железа (рис. 3б). При биологическом окислении железа осадок содержит большое количество экзополимеров, образованных в результате жизнедеятельности *Gallionella ferruginea*. Он представлен в виде хлопьев разнообразной формы. Осадок, образующийся в физико-химических процессах, представлен одиночными мелкими частицами или их группами [16].

Анализ результатов многих исследований подтверждает, что скорость биологического окисления значительно превышает скорость химического окисления железа. Промывка фильтров хлорированной водой действует угнетающе на протекающие процессы. Также отмечается, что биоценозы, формирующиеся естественным путем на загрузке фильтров, способны окислять органические формы железа [11].

Результаты исследований и опыт эксплуатации станций обезжелезивания показывают, что при активном протекании биологических процессов эффективность изъятия железа в течение фильтроцикла увеличивается, а глубина проникновения неокисленных форм железа в загрузку сокращается [12]. Таким образом, представляется нелогичным выводить фильтр на регенерацию при улучшении качества фильтрата и технологических параметров филь-

рующей загрузки. Но необходимость промывки фильтра диктуется предельными значениями потерь напора. При промывке фильтрующей загрузки с поверхности ее гранул удаляются аморфные отложения гидроокиси железа и часть наиболее активной биомассы железобактерий. Поэтому вначале следующего фильтроцикла качество фильтрата может быть существенно хуже. Таким образом, нарушается стационарность биологического процесса. Под стационарностью при этом понимается относительная стабильность процессов синтеза (прироста) и отмирания (удаления) избыточной биомассы железобактерий, что обеспечивается постоянством нагрузки на биопленку окисляемых форм железа и гидродинамических условий протекания биологического процесса. На его кинетических параметрах негативно сказываются резкие изменения скорости фильтрования, кислородного режима, степени изменения соотношения окисленных и неокисленных форм железа и ряд других факторов. Многие из них взаимосвязаны и определяются конструкцией фильтров. При необходимости попутного удаления избыточного содержания марганца организация биологического процесса еще в большей мере усложняется.

Таким образом, совмещение в одном аппарате двух совершенно разных процессов (биологического процесса изъятия и окисления железа и механического процесса фильтрования) не может быть решено оптимальным образом без ущерба одному из них. Поэтому наиболее перспективным представляется направление, при котором в отдельную ступень выделяется биореактор, обеспечивающий стационарность протекающих биологических процессов, и фильтр, позволяющий эффективно удалять образовавшиеся продукты биоокисления.

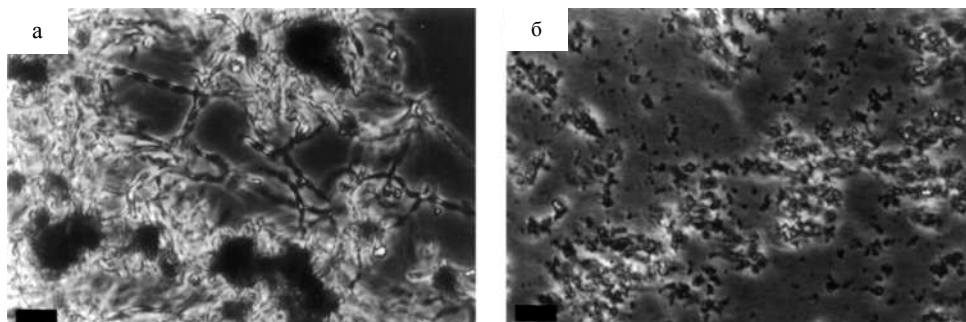


Рис. 3. Микроскопическое изображение осадка при: а – биологическом; б – физико-химическом окислении железа

Одна из первых попыток технологического разделения рассматриваемых процессов принята в конструкции безнапорной станции обезжелезивания, производство которой освоено Витебским предприятием «Полимерконструкция». В ней предусмотрено устройство специального аэрируемого биореактора, рабочая камера которого заполнена полимерной загрузкой с развитой поверхностью. Из биореактора вода поступает на самопромывающиеся фильтры с плавающей загрузкой. Опыт эксплуатации таких станций показал, что они обеспечивают более устойчивую работу при сложном составе обрабатываемой воды. При этом, наряду с эффективным удалением железа, происходит существенное снижение цветности, аммонийных солей, окисляемости и других соединений и газов.

ВЫВОД

Несмотря на доказанность массового стихийного проявления биологических процессов в системах водоснабжения [6, 10] и их положительной роли в технологиях водоподготовки, широкого распространения при решении конкретных задач очистки природных вод они не получили. Причиной этого является недостаточная изученность процессов биологического окисления извлекаемых веществ и определенная осторожность при их использовании в процессе подготовки питьевой воды. Являясь естественными природными процессами (в той или иной мере проявляющимися практически на всех ступенях водоподготовки, особенно при использовании аэрационных методов удаления железа, марганца, сероводорода и др.), биологические процессы не продуцируют каких-либо токсичных веществ или опасных для человека микроорганизмов. При правильной их организации и конструктивном оформлении, как правило, достигается микробиологически безупречное качество фильтрата и отпадает необходимость в дезинфекции очищенной воды [12].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Водоснабжение.** Наружные сети и сооружения: СНиП 2.04.02–84. – М.: Стройиздат, 1985. – 134 с.
2. **Обезжелезивание** подземных вод методом фильтрования / А. М. Перлина [и др.] // Научные труды АКХ. Водоснабжение. – 1968. – № 6.
3. **Николадзе, Г. И.** Обезжелезивание природных и оборотных вод / Г. И. Николадзе. – М.: Стройиздат, 1978. – 160 с.
4. **Золотова, Е. Ф.** Очистка воды от железа, марганца, фтора и сероводорода / Е. Ф. Золотова, Г. Ю. Асс. – М.: Стройиздат, 1975. – 175 с.
5. **Kittner, H.** Die Bemessung von Enteisungsfiltren / H. Kittner, A. Vasserwirtschaft // Wassertechnik. – 1968. – № 6.
6. **Технические** записки по проблемам воды: в 2 т.; пер. с англ.; под ред. Т. А. Карюхиной, И. Н. Чурбановой / К. Бараке [и др.]. – М.: Стройиздат, 1983. – 1064 с.
7. **Sogaard, Erik G.** Conditions and rates of biotic and abiotic iron precipitation in selected Danish freshwater plants and microscopic analysis of precipitate morphology / Erik G. Sogaard, Robin Medenwaldt, Joanna V. Abraham-Peskir // Water Research. – 2000. – № 10. – P. 2675–2682.
8. **Седлуха, С. П.** Биологический метод очистки подземных вод от железа / С. П. Седлуха, О. С. Софинская // Вода и экология. – 2001. – № 1. – С. 13–21.
9. **Hallberg, R. O.** Способ извлечения железа и марганца из грунтовых вод и биогеохимический процесс, лежащий в его основе / R. O. Hallberg // Вода и экология. – 2005. – № 3. – С. 44–54.
10. **Менча, М. Н.** Биологические помехи в работе систем питьевого водоснабжения / М. Н. Менча // Водные проблемы. – Минск: БНТУ, 2004. – С. 33–36.
11. **Менча, М. Н.** Железобактерии в системах питьевого водоснабжения из подземных источников / М. Н. Менча // Водоснабжение и санитарная техника. – 2006. – № 7. – С. 25–32.
12. **Czekalla, C.** Die biologische Enteisung und Entmanganung – Verfahrenstechnik und betriebliche Aspekte / C. Czekalla // Fachtechnik, Wasseraufbereitung, 4/97. – № 48. – S. 22–27.
13. **Терентьев, В. И.** Биотехнология очистки воды: в 2 ч. / В. И. Терентьев, Н. М. Павловец. – СПб.: Гуманитарика, 2003. – Ч. 1. – 272 с.
14. **Stembal, Tamara.** Removal of ammonia, iron and manganese from groundwaters of northern Croatia – pilot plant studies / Tamara Stembal // Process Biochemistry. – 2005. – № 40. – P. 327–335.
15. **Tekerlekopoulou, A. G.** Physico-chemical and biological iron removal from potable water / A. G. Tekerlekopoulou, I. A. Vasiliadou, D. V. Vayenas // Biochemical Engineering Journal. – 2006. – № 31. – P. 74–83.

Поступила 8.08.2007