

ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ЗАЩИТЕ ЗАКРЫТЫХ ДРЕНАЖЕЙ ОТ ХЕМОГЕННОГО ЗАИЛЕНИЯ

Одной из широко известных причин выхода из строя дренажей является их хемотропное заиливание в условиях высокого содержания в дренируемых водах железа, кальция или марганца. Настоящая статья посвящена проблемам заиливания дренажных систем марганцем. Высокое содержание марганца в поверхностных, грунтовых и подземных водах характерно для многих регионов Российской Федерации. В частности, воды с высоким содержанием марганца широко распространены в бассейне р. Кама, где расположен Воткинский гидроузел, водоприемная способность коллекторно-дренажной системы грунтовых плотин которого в настоящее время значительно снижена из-за обильного загрязнения всех ее элементов гидроокислами марганца.

Вопросы деманганации воды, а также предотвращения заиливания нерастворимыми соединениями марганца элементов систем водоподготовки наиболее подробно рассматриваются для использования в системах водоснабжения. Данные о проведенных ранее исследованиях марганцевого заиливания элементов дренажных систем напорных гидротехнических сооружений в литературных источниках не обнаружены. Однако многое указывает на аналогичность физических и химических процессов, происходящих при наличии в воде избыточного количества ионов марганца и ионов железа. В обоих случаях отложение рудных соединений происходит при наличии свободного кислорода. Таким образом, представляется вполне обоснованным рассматривать в качестве аналога марганцевого заиливания факторов, активизирующих процессы заохоривания в условиях высокого содержания ионов железа в дренируемых водах. А для решения вопросов деманганации воспользоваться рекомендациями, разработанными для борьбы с заохориванием дренажных систем.

Причиной заохоривания закрытого дренажа и обратного фильтра железистыми соединениями является сочетание целого комплекса природных и техногенных факторов. В общем виде интенсивность заохоривания λ_{Fe} в трубах и грунтовом материале придренной зоны и обратного фильтра является функцией следующих факторов [4]:

$$\lambda_{Fe} = f(Fe^{2+}, O_2, pH, Eh, rH, v, h_n), \quad (1)$$

где $\lambda_{Fe} = \frac{dP}{dt}$ - интенсивность образования наилка;

P – вес (объем) отложившихся в трубах железистых соединений;

t – время;

Fe^{2+} - концентрация ионов железа в дренируемой воде;

Eh - окислительно-восстановительный потенциал;

pH – показатель концентрации ионов водорода в воде;

rH – показатель давления недиссоциированных водородных ионов в грунтовой воде: $rH = Eh/0,029 + 2pH$;

O_2 – содержание кислорода;

h_n – степень подтопления дренажа;

v – скорости движения воды в трубах,

$v = f(i, D_{\text{вн}}, q)$;

i – уклон дренажных линий;

$D_{\text{вн}}$ – диаметр дренажных труб;

q – расход дренажного стока.

В опубликованных результатах исследований даются неоднозначные оценки влияния вышеперечисленных природных и техногенных факторов на степень заиливания дренажа соединениями железа. Кроме того, степень влияния этих факторов может значительно варьировать в зависимости от химического состава дренажных вод, условий взаимодействия железистых и кислородосодержащих вод, конструкций дренажных устройств, их гидравлических характеристик и др.

По итогам выполненного анализа литературных источников можно выделить следующие факторы, влияющие на степень заиливания дренажа железистыми соединениями:

- Основным условием возможности выпадения в осадок и заиливания дренажа соединениями железа и марганца является присутствие кислорода. При наличии ионов железа в дренируемой воде кислород

вызывает процессы окисления и гидролиза с образованием осадка из окислов железа. В отсутствии кислорода реакция прекращается.

- Критерии степени опасности заохривания дренажа в зависимости от содержания ионов Fe^{2+} в грунтовых водах и pH среды:

Степень опасности заохривания дренажа	Содержание Fe^{2+} , мг/л	pH
Отсутствует	< 3	3,5 – 6,5
Слабая	3 – 5	4,7 – 7,4
Средняя	5 – 8	4,3 – 7,2
Сильная	8 – 14	4,3 – 7,7
Очень сильная	> 14	4,3 – 7,7

- Имеются различные мнения о влиянии величины pH на степень заохривания дренажа. Часть исследователей считает, что в кислой среде опасность заохривания дренажа намного больше, чем в нейтральной и слабокислой. Однако имеются и противоположные данные.
- Для окисления железа необходимы более низкие, чем для марганца, значения окислительно-восстановительного потенциала Eh . Так при величине $pH = 5,0$ окисление железа может начаться уже при $Eh = 450 \text{ mV}$. Эти значения не являются абсолютными, а зависят от концентрации других веществ в воде.
- Исследования работы мелиоративных дренажей показали, что вероятность заохривания увеличивается при уклонах дренажных линий $i < 0,004$. В то же время, имеются данные, что в мелиоративных трубчатых дренах и небольших трубчатых коллекторах при частичном заполнении поперечного сечения и уклоне менее 5% не наблюдается даже частичная самоочистка дрен.
- Отложение железистых соединений в полостях труб наблюдаются при скоростях движения воды менее $0,3 - 0,4 \text{ м/с}$.
- Затопление дренажных устьев h_n обеспечивает уменьшение доступа кислорода в полость дренажного коллектора. Вероятность заохривания увеличивается при $h_n = 0$.

При распространении рекомендаций по дренажному обустройству в условиях высокого содержания железа в воде на дренажные системы, работающие в условиях высокого содержания марганца, необходимо учитывать имеющиеся различия в происходящих процессах, а также малую изученность явления кольматажа дренажей напорных гидротехнических сооружений нерастворимыми соединениями марганца.

Можно предположить, что интенсивность отложения марганцевородных соединений λ_{Mn} в элементах дренажных систем в целом зависит от тех же факторов, что и интенсивность отложения железистых соединений, и может быть описана выражением (2), аналогичным выражению (1), приведенному для λ_{Fe} :

$$\lambda_{Mn} = f(Mn^{2+}, O_2, pH, Eh, rH, v, h_n), \quad (2)$$

- Марганец выпадает в осадок в присутствии кислорода в результате процессов, аналогичных процессам образования железистых соединений. В отсутствии кислорода реакция прекращается.
- Для окисления марганца необходимы более высокие, чем для железа, значения окислительно-восстановительного потенциала Eh . Например, при величине $pH = 5,0$ окисление марганца может начаться при $Eh > 700 \text{ mV}$. Эти значения не являются абсолютными, а зависят от концентрации других веществ в воде.
- В ряде работ по водоподготовке указывается, что для успешного протекания процесса окисления марганца требуются значения $pH = 10,0 - 11,5$, а при более низких значениях pH рекомендуется применение уже не кислорода, а более энергичных окислителей (хлора, озона и др.) с большим избытком их в реакции.

Данные о влиянии вышеперечисленных факторов на степень заилиения дренажа марганцевородными отложениями, приведенные на основе анализа литературных источников, могут быть дополнены результатами исследований состояния грунтовых сооружений гидроузла Воткинской ГЭС, выполняемых специалистами ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» при непосредственном участии автора с 1999 г. и по настоящее время:

- Воды, фильтрующиеся через тело грунтовой плотины Воткинской ГЭС, преимущественно слабнокислые, подземные воды – нейтральные или слабощелочные. В ходе обследований не было выявлено вод, относящихся к сильноокислым ($pH = 4 - 3$) или сильнощелочным ($pH > 10$). Однако интенсивное заилиение дренажа марганцевородными отложениями свидетельствует о том, что реакция по окислению марганца протекает как в слабнокислой, так и в слабощелочной средах.

- Уклон дренажного коллектора грунтовой плотины № 2 $i = 0,0037 - 0,0275$. Принятые в конструкции дренажа величины уклонов не достаточны для обеспечения выноса марганцеворудного наилка из полости дренажных труб.
- Подтопление дренажных отверстий, аналогично подтоплению дренажных устьев, снижает интенсивность их заиливания марганцеворудными отложениями. Так донные дренажные отверстия, постоянно находящиеся ниже уровня воды, не заилены. В то же время большая часть отверстий, находящихся в зоне переменного уровня воды, полностью или частично заилены.

Таким образом, определяющими факторами марганцевого загрязнения дренажа, уменьшающими его работоспособность, являются:

- Высокие (до 18 мг/л) концентрации ионов марганца в дренируемых подземных водах. При этом концентрации, относимые по классификации степени опасности заохривания к слабым, также необратимо снижают работоспособность дренажа, приводя к закупорке дренажных отверстий марганцеворудными отложениями.
- Совместное отведение закрытым дренажным коллектором кислородсодержащих фильтрационных вод и подземных вод с высоким содержанием марганца.
- Струйный излив воды в полость коллектора через многочисленные дренажные отверстия при малых значениях расхода, ведущий к дополнительному насыщению воды кислородом воздуха.
- Расположение дренажных отверстий в зоне переменного уровня воды в коллекторе.
- Малые уклоны дренажного коллектора.
- Подпорный режим движения потока в дренажном и отводящем коллекторах. В зонах подпора коллектора создаются благоприятные условия для выпадения в осадок, формирования и накопления марганцеворудных отложений.
- При подпоре коллектора на величину диаметра трубы, стенки которой покрыты марганцеворудными отложениями, отложения продолжают формироваться по всей поверхности трубы – от стенок к центру.
- Строительный мусор, ПГС, песчаные частицы, просыпавшиеся или оставленные в ходе строительства в полости дренажного коллектора, не только способствуют образованию застойных зон, но и являются ядрами, на которых более интенсивно происходит формирование марганцеворудных отложений.

Приведем характерное сечение на примере грунтовой плотины № 2 на участке от ПК 35+82,97 до ПК 42+62, дренажная система в которой выполнена в виде наклонного дренажа, сопрягающегося в нижней части с дренажной призмой, в центральной части которой находится отводящая труба. Дренирование основания плотины осуществляется посредством траншеи-прорези, выполненной в связных грунтах, пролегающих непосредственно под дренажем плотины. Схема дренажа и принцип его работы в условиях высокой концентрации марганца в подземных водах приведены на рис. 1.

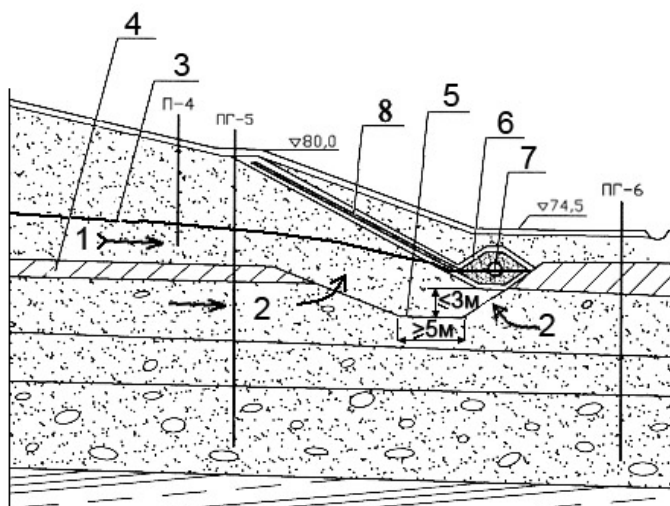


Рис. 1. Схема дренажа грунтовой плотины № 2:

- 1 – кислородсодержащие воды, фильтрующиеся через тело грунтовой плотины;
 2 - марганецсодержащие подземные воды напорного горизонта; 3 – поверхность депрессии; 4 – покровные суглинки; 5 – траншея-прорезь, выполненная в покровных суглинках, для разгрузки напорных вод; 6 - обратный фильтр закрытого дренажа состоит из 1-го слоя фильтра (по проекту: дробленый гравий 0,25 – 10 мм, фактически: гравий разноразмерный 0,10 – 20 мм) и 2-го слоя фильтра (по проекту гравий 5 – 30 мм, фактически: галечник 5 – 40 мм); 7 – дренажный коллектор;
 8 – наклонный дренаж.

Поток марганецсодержащих подземных вод, поступающий из основания плотины в дренаж через дренажную прорезь, увеличивает нагрузку на дренаж, и, в условиях подпорного движения потока, приводит к интенсивному формированию марганцевых отложений. Выполненная в 2006 г. прочистка полостей коллектора от марганцевых отложений показала, что при использованной технологии выполнения работ, очистки и восстановления водоприемной способности закольматированных дренажных отверстий не произошло.

Частичная или полная закупорка полостей дренажных труб, кольматаж водоприемных отверстий в трубах и стыковых зазоров между ними, защитных фильтров и придренной области грунта марганцевородными отложениями ведет к уменьшению водоприемной способности дренажа, частичному или полному выходу его из строя. Полное перекрытие полости коллектора на одном из участков уже имело место в 2004 г. и привело к затоплению смотрового колодца и выходу фильтрационных вод на поверхность.

Неблагоприятное влияние марганцевого колматажа дренажа и придренной зоны ГТС приводит к подъему поверхности депрессии, что в свою очередь может снизить устойчивость откосов и существенно повлиять на безопасность грунтового сооружения.

На участке ПК 38+65 – ПК 40+65 (СК-5 – СКО-4) в апреле – июне 2004 г. выполнена реконструкция дренажного коллектора с устройством нитки дублирующего дренажа. Дублирующая нитка проходит над трассой проектного дренажа, труба асбестоцементная, перфорированная, $D_{\text{внутр}} = 47$ см, $D_{\text{внешн}} = 54$ см, уклон 0,003.

Первое включение в работу дублирующего дренажа отмечено в октябре 2006 г. Группа наблюдений Воткинской ГЭС зафиксировала появление воды в новом коллекторе на участке СК-4а - СК-4в и несколько дальше. Глубина воды в трубе (4а-4в) СК-4а составляет 3,5 см при уровне воды в колодце ниже устья трубы. В СК-4в вода течет из-под трубы через незагерметизированный стык ввода в колодец. Повышение уровня грунтовых вод свидетельствует о снижении пропускной способности основной нитки дренажного коллектора и вероятности образования «пробки» из марганцевородных отложений на участке СКО-4 – СК-4а.

Концентрация ионов марганца в местах вновь появившегося стока: СК-4а – 1,27 мг/л, СК-4в – 0,92 мг/л. При достаточно низком содержании марганца и периоде работы дренажа не более одного месяца уже отмечен слой марганцевого наилака толщиной 2 мм. Малый диаметр дублирующей нитки дренажа усложнит его промывку, а закупорка дренажных отверстий полностью выведет его из строя так же, как и основной дренажный коллектор, что свидетельствует о необходимости выполнения работ по очистке от твердых отложений основной трубы.

Устройство разгрузочных скважин, относительно направления движения напорного потока, значительно ниже траншеи-прорези обуславливает низкую эффективность их действия и не способствует снижению нагрузки на дренаж.

Высокий уровень воды в водных объектах, расположенных на территории поймы грунтовой плотины № 2, способствует подтоплению отводящей воду сети и, собственно, дренажных коллекторов, приводя к снижению скоростей движения потока в их полости.

Оценка работы существующей конструкции дренажа грунтовой плотины № 2 Воткинской ГЭС в условиях марганцевого загрязнения, анализ влияния природных и техногенных факторов на интенсивность заиливания дренажа марганцевородными отложениями в условиях подпорного движения потоков обогащенных марганцем вод показали необходимость выполнения ряда неотложных мероприятий и разработки технических решений, направленных на решение следующих проблем:

- Очистить полость дренажа от марганцевородных материалов.
- Очистить полость дренажа от песчано-гравийного материала и мусора (опалубки, посторонних предметов, камня).
- Снизить интенсивность поступления марганцевых вод в дренаж путем организации дополнительной разгрузки напорного потока.
- Организовать раздельное отведение потоков дренажных и напорных грунтовых вод.
- Установить на предварительно очищенных подводящих участках трубы коллектора в смотровых колодцах водосливы с тонкой стенкой, поддерживающие уровни воды в коллекторе выше дренажных отверстий из которых происходит высачивание фильтрующихся вод.
- Установить пьезометры на расстоянии 1 м выше и ниже трассы дренажного коллектора для контроля положения уровня воды в дренажной призме.

Таким образом, основные принципы конструирования дренажа, работающего в условиях потенциального заиливания марганцевородными отложениями, определяются созданием режимов работы дренажа, препятствующих или минимизирующих протекание процессов окисления в дренируемых водах и образование нерастворимых марганцевородных соединений, приводящих к заиливанию дренажных систем. Основные, выделенные возможные направления конструктивных решений, приведены на блок-схеме (рис. 2):



Рис. 2. Основные принципы конструирования дренажа, работающего в условиях потенциального заиления марганцевородными отложениями

- активные решения, к которым относятся раздельное отведение марганецсодержащих и кислородсодержащих дренажных вод и создание анаэробных условий работы дренажных устройств;
- пассивные решения – продление срока службы ГТС путем создания в дренажных конструкциях резервных и дополнительных объемов, аккумулирующих марганцевородные отложения.

Применив вышесказанное к конкретным условиям грунтовой плотины № 2 Воткинской ГЭС, можно констатировать, что реконструкция дренажного обустройства должна вестись по двум направлениям. Одно из направлений предполагает восстановление нормальных условий работы существующего дренажа и разработку комплекса эксплуатационных мероприятий. Второе - фактическое выключение из работы существующего закрытого дренажного коллектора, включая его дублирующую часть, и замену существующей конструкции дренажа на более эффективную в условиях высокого содержания марганца в воде.

Первое направление нельзя отнести к восстанавливающим ремонтным мероприятиям, поскольку существующая конструкция предусматривает совместное отведение закрытым дренажным коллектором кислородсодержащих фильтрационных вод и подземных вод с высоким содержанием марганца. Как показал опыт эксплуатации, данная схема ведет к необратимому выходу из строя закрытого дренажа.

Таким образом, оба направления дренажного обустройства предполагают существенную реконструкцию дренажного обустройства грунтовой плотины. Все технические решения требуют существенных капитальных затрат на их реализацию из-за большой материалоемкости, необходимости использования специальных машин, механизмов, квалифицированных специалистов подрядных организаций, большого объема земляных работ, необходимости проведения работ в обводненных грунтах и т.д.

Наиболее оптимальными и целесообразными для условий марганцевого загрязнения дренажных вод были признаны следующие варианты дренажного обустройства, а также их взаимосочетания:

1. Пригрузка низового откоса плотины слоем ПГС с постепенным выводом из эксплуатации закрытого дренажа в результате его кольматации марганцевородными отложениями.
2. Схема водообустройства участка поймы, примыкающего к грунтовой плотине № 2, направленная на интенсификацию разгрузки напорного горизонта и уменьшению нагрузки на закрытый дренаж.
3. Лучевой дренаж, дренирующий напорный марганецсодержащий горизонт, снижающий пьезометрические уровни напорного горизонта.
4. Система вертикальных скважин, дренирующая напорный марганецсодержащий горизонт и снижающая его пьезометрический уровень.

Главное достоинство предлагаемых решений заключается в том, что данные варианты позволяют решить проблему дренажного обустройства плотины № 2 кардинальным образом. Сравнительный анализ предлагаемых технических решений выполнен в табл. 1.

Выводы:

1. Выполнен комплексный анализ причин и факторов, обуславливающих нарушение эффективной работы дренажа в условиях высокого содержания марганца в дренируемых водах.
2. Разработаны основные принципы конструирования дренажа, работающего в условиях потенциального марганцевого заиления.
3. Для конкретных условий работы ГТС Воткинской ГЭС на основе учета особенностей проявления марганцевородного заиления конструкции дренажа разработано четыре варианта дренажного обустройства, реализация которых позволит повысить надежность грунтовых плотин ВотГЭС, проведено сопоставление эффективности предложенных вариантов.

Список литературы

1. **Кулаков В. В., Сошников Е. В., Чайковский Г. П.** Обезжелезивание и деманганация подземных вод: Учебное пособие - Хабаровск: ДВГУПС, 1998. – 100 с.
2. **СНиП 2.04.02-84*.** Водоснабжение. Наружные сети и сооружения.- М.: ГП ЦПП, 1996 - 128 с.
3. **Сотников В.И.** Рудообразование в океанах. Новосибирский государственный университет // Соросовский образовательный журнал, 1998, № 7, с. 77 – 82.
4. **Алехин В.И., Панов Б.С., Ишуткина А.А.** Донецкий государственный технический университет. Вернадский о геохимической истории марганца в осадочных толщах.
5. **Мурашко А.И., Сапожников Е.Г.** Защита дренажа от заиления. Ураджай. Минск. 1978.
6. **Гинц А.В., Гусакова И.Н., Лопатина М.Г., Фисенко В.Ф.** Проблема хемотропного заиления дренажа грунтовых плотин Воткинской ГЭС. - // Материалы конференции РАО ЕЭС России, декабрь, 2005.
7. **Лопатина М.Г.** Оценка влияния марганцевородного загрязнения на фильтрационные свойства грунтового материала тела и обратного фильтра плотины № 2 Воткинской ГЭС.- // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. т. 246. 2007. С. 30-37.

Таблица 1

**Сравнительный анализ предлагаемых технических решений по дренажному обустройству грунтовой плотины № 2 ВотГЭС,
эффективному в условиях высокого содержания марганца в дренируемых водах**

№ п/п	Наименование	Основные технические решения	Основной достигаемый эффект	Недостатки
1.	Пригрузка низового откоса плотины слоем ПГС	Изменение конструкции дренажного обустройства грунтовой плотины с заменой закрытого дренажа на наклонный	Продление срока службы ГТС за счет увеличения времени кольматажа дренажного элемента	Ограничение по времени работоспособности пригрузки. Значительные объемы земляных работ. Выход из строя проектного дренажа
2.	Водообустройство поймы к грунтовой плотины № 2	Изменение условий транзита дренируемых вод и облегчение условий работы закрытого дренажа	Локальное понижение пьезометрических уровней напорного горизонта, облегчение условий работы закрытого дренажа	Низкая эффективность ввиду малого понижения пьезометрических уровней. Сложность производства работ на заболоченных территориях.
3.	Лучевой дренаж	Раздельное дренирование кислородсодержащих фильтрационных и марганецсодержащих напорных вод с самотечным отводом	Понижение пьезометрических уровней напорного горизонта, уменьшение поступления в закрытый дренаж количества марганецсодержащих вод	Сложность производства работ в водонасыщенных грунтах. Сложность контроля работы протяженных дренажных линий под защитой гидрозамка.
4.	Система вертикальных скважин	Раздельное дренирование кислородсодержащих фильтрационных и марганецсодержащих напорных вод с механическим водоподъемом	Понижение пьезометрических уровней напорного горизонта, уменьшение поступления в закрытый дренаж количества марганецсодержащих вод	Необходимость механического водоподъема для снижения пьезометрических уровней напорного горизонта ниже закрытого дренажа.