

УДК 556.3+627

Рыбникова Людмила Сергеевна

доктор геолого-минералогических наук,
главный научный сотрудник
лаборатории экологии горного производства,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: luserib@mail.ru

Рыбников Петр Андреевич

кандидат геолого-минералогических наук,
заведующий лабораторией геоинформационных
и цифровых технологий в недропользовании,
Институт горного дела УрО РАН;
доцент кафедры инженерной экологии
Уральского государственного
горного университета,
620144, г. Екатеринбург,
ул. Куйбышева, 30
e-mail: ribnikoff@yandex.ru

Смирнов Александр Юрьевич

младший научный сотрудник
лаборатории геоинформационных и цифровых
технологий в недропользовании,
Институт горного дела УрО РАН;
преподаватель кафедры геодезии и кадастров
Уральского государственного
горного университета
e-mail: alexsm94@gmail.com

**ОРГАНИЗАЦИЯ
ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ
МЕРОПРИЯТИЙ
НА ШЛАМОХРАНИЛИЩАХ***

Аннотация:

Поверхностные источники загрязнения, оказывающие негативное влияние на грунтовые воды, – это до 70 – 80 % накопители прудкового типа: шламо-, хвостохранилища, пруды-накопители. Шламоохранилища представляют собой гидротехнические сооружения, основной задачей которых служит отстаивание суспензии под действием силы тяжести, фильтрация и последующее безопасное хранение твердой фазы отходов. Независимо от выбора конкретного способа строительства шламоохранилищ в каждом из типовых видов ограждающих дамб и оснований предусматриваются решения, направленные на максимальную минимизацию фильтрации. Немаловажное влияние на режим фильтрации оказывает пространственное положение дамбы по отношению к окружающему рельефу. Целью данной статьи являлся анализ механизмов фильтрации вод через тело дамбы шламоохранилища, организа-

DOI: 10.25635/2313-1586.2022.02.104

Rybnikova Liudmila S.

Doctor of Geological and Mineralogical Sciences,
Chief Researcher of Laboratory of mining ecology,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: luserib@mail.ru

Rybnikov Petr A.

Candidate of Geological
and Mineralogical Sciences,
Head of the Laboratory of geoinformation and
digital technologies in subsoil use,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS;
Associate Professor,
Department of Environmental Engineering,
Ural State Mining University,
620144 Ekaterinburg, 30 Kuibysheva Str.
e-mail: ribnikoff@yandex.ru

Smirnov Alexander Yu.

Junior Researcher,
Laboratory of geoinformation and
digital technologies in subsoil use,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS;
Lecturer, Department of Geodesy and Cadasters,
Ural State Mining University
e-mail: alexsm94@gmail.com

**ORGANIZATION OF ANTI-FILTRATION
MEASURES AT TAILING DAMS**

Abstract:

Up to 70-80% of surface pollution sources that have a negative impact on groundwater are pond-type storage tanks: sludge, tailings, and storage ponds. Sludge storage facilities are hydraulic structures, the main task of which is to settle the suspension under the action of gravity, filtration and subsequent safe storage of the solid waste. Regardless of the choice of a specific method for the construction of sludge storage facilities, in each of the special types of enclosing dams and foundations, solutions are provided aiming at minimizing filtration. An important influence on the filtration regime is exerted by the spatial position of the dam in relation to the surrounding relief. The purpose of this article is to analyze the mechanisms of water filtration through the body of the sludge storage dam, the organization of anti-filtration measures in order to reduce the spread of pollution of industrial effluents. It considers the advantages and disadvantages of impervious screens of various types,

* Статья подготовлена в рамках Госзадания № 075-00412-22 ПП, тема 2 (2022 – 2024) (FUWE-2022-0002) рег. №.1021062010532-7-1.5.1.

ции противофильтрационных мероприятий с целью уменьшения распространения загрязнений накопителей протоктов. Показаны преимущества и недостатки грунтово-пленочных экранов различного типа, способы их организации; особенности применения систем дренажа в основании и низовом откосе дамбы.

Ключевые слова: шламохранилище, устойчивость дамбы, фильтрация, противофильтрационные экраны, мониторинг.

ways of organizing; features of the use of drainage systems in the base and downstream slope of the dam.

Key words: tailings, sludge storage, dam stability, filtration, impervious screens, monitoring.

Введение

Горная и металлургическая отрасли являются фундаментом промышленности любого государства, поскольку без них невозможно производство высокотехнологичных изделий, и, как следствие, успешное развитие экономики страны в целом. Однако данные отрасли оказывают существенное антропогенное воздействие на окружающую среду, значительно меняя ландшафты и экосистемы. На этапах добычи и обогащения полезных ископаемых возникает большое количество отходов производства, которые можно подразделить на следующие виды: газово-пылевые, твердые и жидкие фазы (в том числе в виде суспензий). При этом интенсивность самореабилитации горнопромышленных территорий крайне низка и может занимать от десятков до сотен лет в зависимости от степени агрессивности поллютантов. Вопросы захоронения, утилизации и переработки таких отходов занимают важное место в геоэкологических исследованиях.

Шламохранилища представляют собой гидротехнические сооружения, основной задачей которых служит отстаивание суспензии под действием силы тяжести, фильтрация и последующее безопасное хранение твердой фазы отходов. Хотя конструкции и технологические решения дамб шламохранилищ существенно проще сооружений гидроэнергетики, учет геологических, гидрогеологических и гидрологических, инженерно-технических условий района их размещения является не менее важным, а в ряде случаев и критическим в развитии сценариев распространения загрязнения. Пренебрежение данными факторами на этапе проектирования может привести к катастрофическим последствиям, начиная от попадания компонентов-загрязнителей в водоносные горизонты, вплоть до размыва тела дамбы [1, 2, 3].

Подземные воды являются одним из важнейших видов водных ресурсов, необходимых для устойчивого развития человечества. Для ряда стран вопросы обеспечения водными ресурсами надлежащего качества стоят более остро, чем энергетические или политические проблемы [4]. Стоит отметить, что для жизнедеятельности человека важен не столько количественный, сколько качественный показатель воды. Наряду с этим подземные воды крайне чувствительны к антропогенной нагрузке, особенно к последствиям воздействия горного и металлургического производства.

Зачастую ущерб от загрязнения подземных вод промышленными объектами горного и металлургического цикла сопоставим с затратами на выпуск основной продукции [4, 5]. В данном контексте особенно актуальным становится решение проблемы выбора рациональных мер по ликвидации или предотвращению загрязнения подземных вод. Для обеспечения данных условий при проектировании и эксплуатации шламохранилищ необходимо понимать суть гидрогеологических и миграционных процессов; использовать более совершенные средства защиты подземных вод; внедрять эффективные системы мониторинга (в том числе геоинформационного), основанные на изученности района размещения шламохранилища; корректировать и уточнять прогнозные оценки сценариев распространения загрязнения на основе данных оперативного мониторинга.

Водоохранные мероприятия могут быть подразделены на *профилактические*, направленные на предотвращение загрязнения, и *активные*, направленные на локали-

зацию, восстановление и реабилитацию качества подземных вод в условиях распространяющегося загрязнения [4]. Исходя из того, что меры по профилактике загрязнения подземных вод в разы дешевле активных мероприятий, основной упор должен делаться именно на них. Проектирование шламохранилищ с запасом прочностных характеристик, применяемых инженерных решений и профилактических мероприятий в конечном счете оказывается наиболее выгодным для природопользователя. Активные мероприятия, в свою очередь, являются следствием уже случившихся аварийных ситуаций и указывают на серьезные ошибки в управленческих решениях или конструктивных особенностях дамбы.

Целью данной статьи являлся анализ механизмов фильтрации вод через тело дамбы шламохранилища, организации противофильтрационных мероприятий с целью уменьшения распространения загрязнения накопителей промстоков.

Противофильтрационные мероприятия на шламохранилищах

Ложа оснований шламохранилищ практически никогда не бывают полностью водонепроницаемыми в силу того, что они конструктивно выполняются из земляных материалов. Дамбы обваловывания возводятся насыпным способом из суглинистых материалов либо намываемых шламов. Если для шламовых амбаров (неглубоких ям до 5 м и размерами до 100 м, используемых для складирования отходов бурения в нефтегазовой промышленности) можно использовать даже бетонные основания, добиваясь максимальной изоляции суспензий, то затруднительно представить шламохранилище с забетонированным ложем в десятки и сотни гектаров.

Нужно отметить, что суспензия состоит из жидкой и твердой фазы. С предприятий такую суспензию перекачивают по шламопроводам в шламохранилища. Жидкая фаза суспензии является побочным продуктом производства, и во многом необходима для транспортировки по трубопроводам. Таким образом, получается, что конечной целью использования шламохранилищ является удаление жидкой фазы из шламовой пульпы и захоронение именно твердой фазы шлама. Конечно, вода из шлама может удаляться и посредством испарения, но для ускорения процесса обезвоживания используют фильтрацию либо системы отвода осветленной воды (которая, в свою очередь, перекачивается назад на предприятие и участвует в оборотном цикле).

Возникает закономерный вопрос: зачем в таком случае необходимы противофильтрационные мероприятия, если фильтрация в том числе помогает отвести от шлама жидкую фазу. Необходимо это по двум причинам.

Во-первых, фильтрация в шламохранилищах происходит не только через ложе, но и через тело дамбы (рис. 1). Увеличение скорости фильтрации и объема фильтрата приводит к изменению межпорового давления, что, в свою очередь, приводит к внутренней деформации дамбы и изменению прочностных характеристик – ее нестабильности. Процесс протекает за счет сжатия воды в порах отдельных минералов, сжатия отдельных частиц либо приводит к их перегруппировке в более компактные конфигурации [6].

Помимо конструктивных решений при строительстве, речь о которых пойдет далее, к области оперативного управления можно отнести поддержание определенного уровня воды в шламохранилище. Для этих целей используются водосбросные сооружения. Полное или частичное осушение пруда применяют в случае аварийных ситуаций, когда есть риск разрушения дамбы из-за интенсивной фильтрации с выносом твердых частиц грунтов, разрушения верхового откоса из-за перетекания, оползания склонов и т.д. [7].

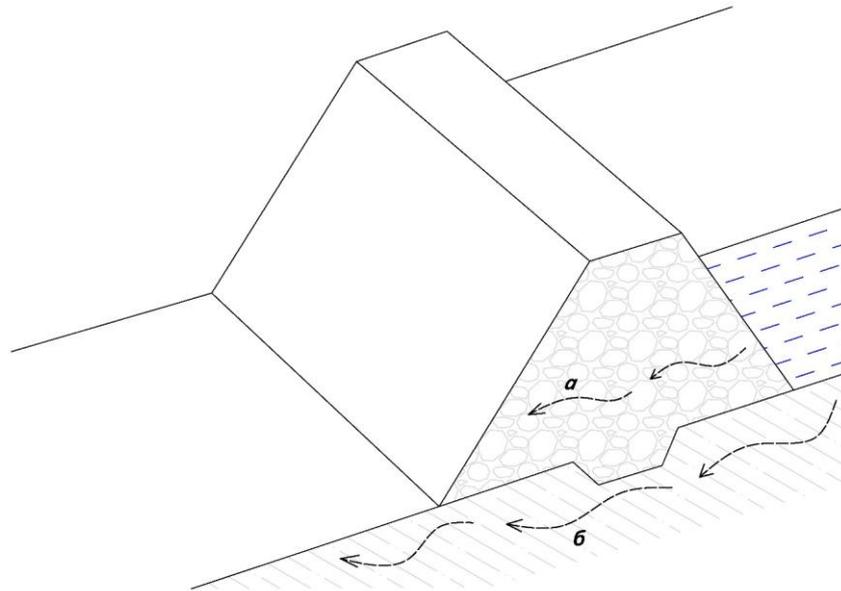


Рис 1. Протекание фильтрации через:
a – ограждающую дамбу; *б* – ложе шламохранилища

Также стоит упомянуть про одну из разновидностей шламохранилищ – гидроотвалы (рис. 2). При субаэральном способе отстаивания (способе намыва) шлам разливают с низкой скоростью по одному из участков пляжа шламохранилища: наливается слой пульпы толщиной до 10 см, который под силой тяжести медленно стекает в пруд-отстойник. Когда налив слоя завершен, точки сброса переносят на другой участок пляжа, оставляя воду во вновь отложенном слое стекать и испаряться. Когда шлам в намывном слое становится ненасыщенным, капиллярное всасывание в мелкозернистых частицах шлама вызывает усадку и уплотнение слоя [8].

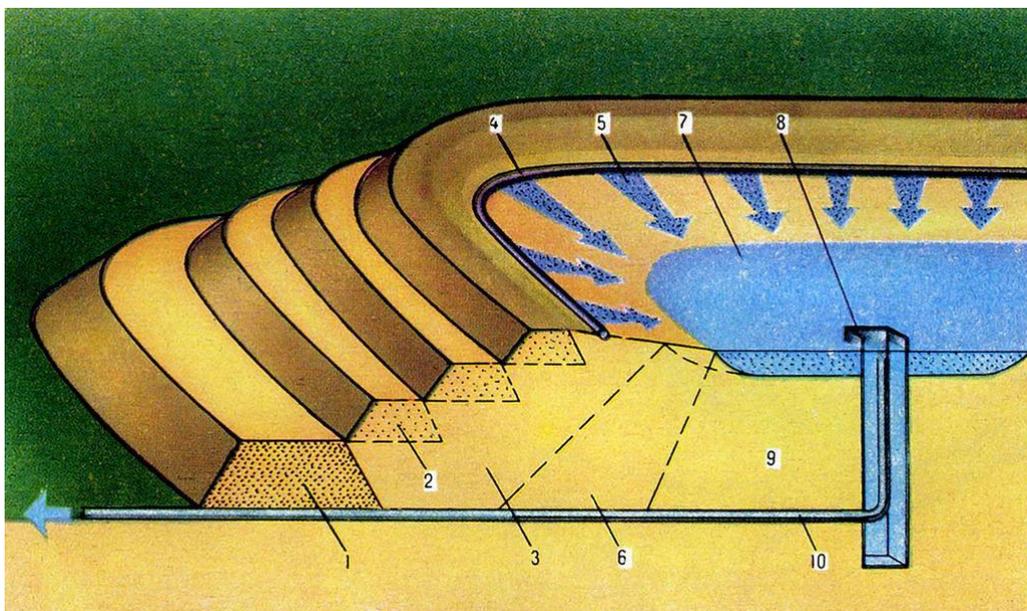


Рис. 2. Схема основных элементов гидроотвала:
1 – первичная дамба обвалования (дамба начального обвалования);
2 – дамбы последующего обвалования, возводимые поярусно;
3 – упорная призма, состоящая из наиболее крупнозернистых фракций намываемого грунта;
4 – намывной пульповод на эстакаде; *5* – пляж (поверхность между дамбой обвалования и прудком); *6* – промежуточная зона; *7* – прудок (прудок-отстойник), обеспечивающий водоосветление и водоснабжение; *8* – водосбросный (водозаборный) колодец;
9 – ядро (центральная зона); *10* – водосбросная труба [13]

Следующий цикл осаждения на первоначальном участке начинается до того, как шлам высохнет до состояния пыления и станет подвержен переносу ветром. Система дренажа предотвращает накопление лишней жидкости и отводит слитую воду в пруд-осветлитель либо в оборотную систему водоснабжения предприятия. По мере увеличения накопленных хвостов в гидроотвале количество воды, собираемой из хвостохранилищ системой дренажа, уменьшается, но дренаж по-прежнему обеспечивает минимальное гидравлическое давление в основании, тем самым снижая потенциальные потери воды в окружающую среду.

Во-вторых, отсутствие перехвата фильтрата приводит к попаданию поллютантов в грунтовые воды и близлежащие поверхностные водоемы. Так, до 70 – 80 % поверхностных источников загрязнения, оказывающих негативное влияние на грунтовые воды, – накопители прудкового типа: шламо-, хвостохранилища, пруды-накопители [4]. Главные усилия противофильтрационных мероприятий направляются на недопущение или максимальное сокращение утечек загрязнений в подстилающие водоносные горизонты.

Снижение скорости фильтрации

Несмотря на то что шламоохранилища конструктивно могут отличаться, рассмотрим устройство ограждающей дамбы (рис. 3) на примере наиболее распространенного вида – дамбы обваловывания (насыпной плотины) с дренажем в нижнем бьефе, применяемой для химически неагрессивных стоков – преимущественно пресной воды, обогащенной теми или иными компонентами (например, ионами тяжелых металлов).

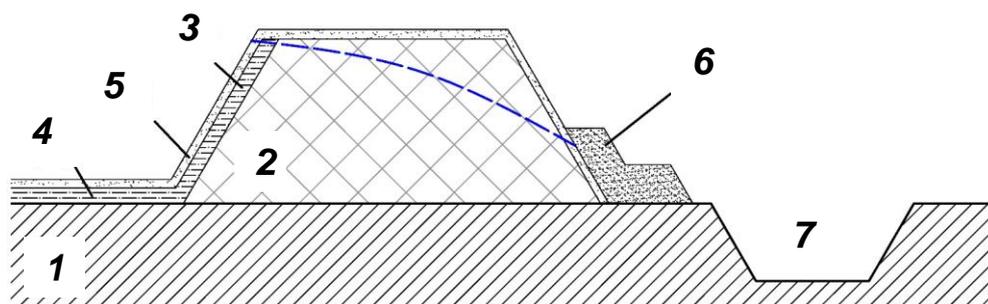


Рис. 3. Разрез дамбы обваловывания с системой дренажа в нижнем бьефе

Изначально расчищается и подготавливается площадка подошвы плотины 1, возводится насыпная плотина 2. Со стороны верхового откоса устраивают экран 3 и понур 4 – противофильтрационные устройства, предназначенные для ослабления фильтрации через дамбу и, соответственно, основание. В качестве более дешевой альтернативы вместо экранов может применяться технология намыва хвостов. Сверху отсыпается защитный слой 5. Параллельно ведутся работы по сбору фильтрата. Говоря о внутрипоровом давлении жидкости в теле дамбы, стоит упомянуть, что оно рассчитывается по формуле касательных напряжений Кулона-Мора, согласно чему можно рассчитать градиенты давления [6].

Как можно заметить (рис. 4), нижняя часть низового откоса является уязвимым местом, через которое может происходить выход фильтрационных вод. Для того чтобы не допустить выноса материала и, как следствие, потери устойчивости, сооружают дреназирующую (упорную) призму 6 (см. рис. 3). Фильтрат, в свою очередь, собирается в дренажном канале 7 (см. рис. 3) и отводится на доочистку либо в систему оборотного водоснабжения.

Проблема минимизации фильтрационных потерь может быть эффективно решена уже на стадиях изысканий и проектирования за счет обоснованного выбора участка размещения площадки шламоохранилища. При выборе площадки принято учитывать

свойства проницаемости, а также мощность покровных отложений участка. Однако учет гипсометрического положения шламохранилища (положения относительно окружающего рельефа и, как следствие, уровня грунтовых вод) также является крайне важным.

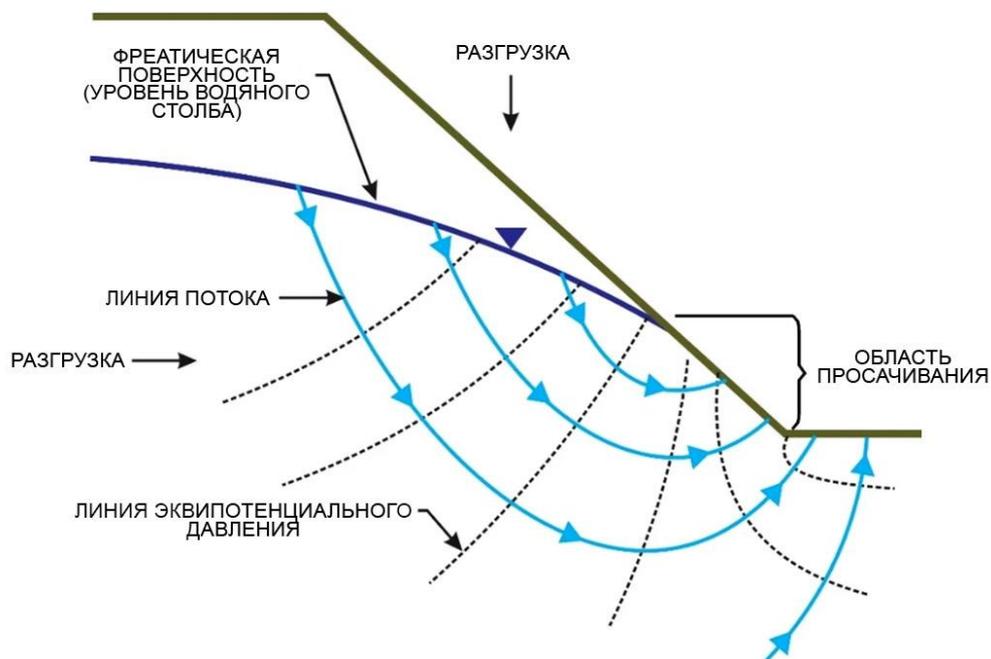


Рис. 4. Изменение градиента давления в пределах низового откоса дамбы (по К. Л. Morton [6])

Так, положение шламохранилища в зависимости от рельефа местности можно подразделить на следующие типы: равнинные, овражные, пойменные, косогорные (рис. 5) [7].

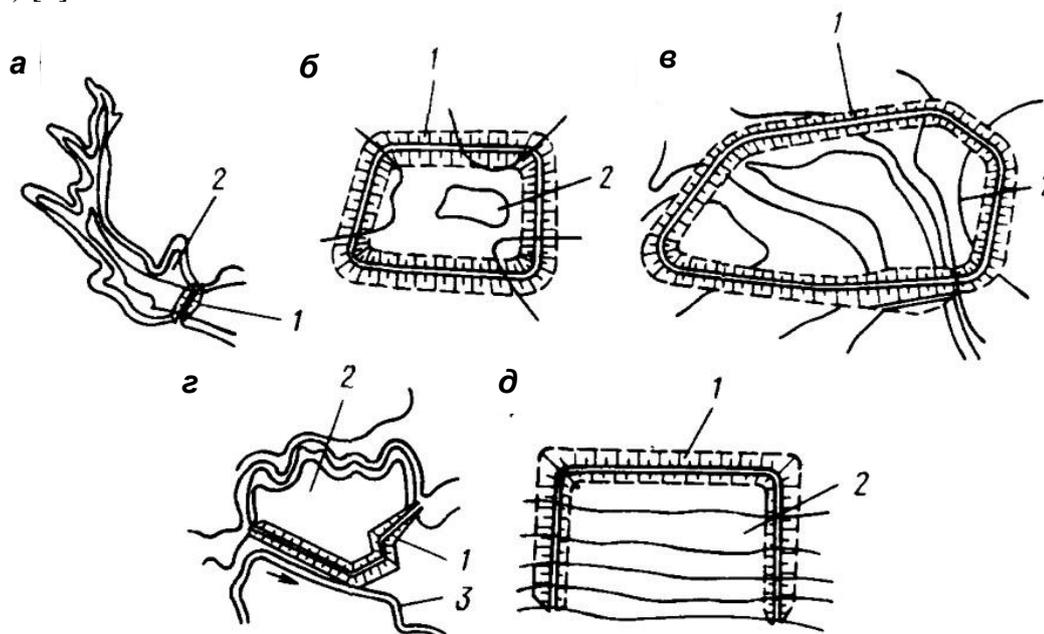


Рис. 5. Типы шламонакопителей и хвостохранилищ:
а – овражное; б – равнинное; в – овражно-равнинное; г – пойменное; д – косогорное;
1 – дамба; 2 – ложе хранилища; 3 – река [7]

Из вышеуказанной типизации становится очевидно, что, например, размещение шламохранилища в естественных понижениях рельефа (балках, речных долинах, логах) провоцирует развитие боковой фильтрации в сторону с более низкими отметками. К сожалению, практика проектирования накопителей промышленных стоков часто игнорирует это обстоятельство: шламохранилища и другие виды прудов-накопителей располагают в верховьях сухих логов и балок, вблизи водоразделов, тем самым «подвешивая» их по отношению к уровню подземных вод, лишь провоцируя большую фильтрацию [4, 9].

Напротив, размещение шламохранилища на участке с «подпертым» режимом фильтрации в ограждающих дамбах является более рациональным решением, поскольку даже при аварийной ситуации сохранится возможность локализовать загрязнение в нижнем бьефе.

Говоря об этапе изысканий и проектирования, также нужно упомянуть о важности заблаговременной ликвидации всех разведочных скважин в ложе накопителя, поскольку это снижает эффективность всех последующих мероприятий (особенно на начальном этапе эксплуатации, когда еще не сформирован слой отложений достаточной мощности) [4, 10].

Противофильтрационные экраны

Помимо конструктивных решений, в целях предупреждения фильтрации через ложе и тело дамбы применяют противофильтрационные экраны. Их, в свою очередь, можно разделить на глинистые и грунтово-пленочные.

Хорошими фильтрационными свойствами обладают мелкодисперсные грунты – глины, тяжелые суглинки [7]. Толщина естественных глин может достигать до 3-х м. Применение таких экранов зачастую обусловлено геологическими особенностями района, поскольку при наличии глинистых отложений достаточной мощности шламохранилища стараются располагать в таких местах при условии выдержанности их мощности по всему периметру и применительно для нетоксичных и химически неагрессивных стоков.

В качестве альтернативного решения, когда естественные глины отсутствуют, применяются глинистые экраны мощностью в 30 см путем послойной укладки и уплотнения. Стоит отметить, что на больших участках добиться необходимого сочетания показателей плотности/влажности бывает затруднительно, из-за чего в глинистых экранах могут появляться трещины усыхания, что приводит к резкому увеличению проницаемости [4].

Основными недостатками таких экранов является их подверженность размыванию поверхностными стоками (что требует специальной защиты из каменной наброски) и химическая деградация грунтов под влиянием агрессивных стоков (например, рассолов каменных солей), что существенно снижает их противофильтрационные свойства.

Если мощность глинистых отложений недостаточна (а также для усиления стойкости глин) к ним могут добавляться различные добавки: битумы, бентонит, жидкое стекло, синтетические смолы, поверхностно-активные вещества (ПАВ), растворы солей (аналогичных по составу промстокам). Так, например, экспериментально установлено, что применение гидрофобных ПАВ приводит к возрастанию сил взаимодействия между глинистыми частицами, к самоуплотнению и снижению подвижности поровой воды [4].

Также в качестве мелкодисперсного материала может быть использована непосредственно хвостовая пульпа – используется технология последовательного намыва на заданных участках пруда, не требующая больших затрат. При грамотном формировании таких экранов существенно снижаются и даже полностью ликвидируются утечки жидкой фазы промстоков. Однако требуется чередование субаэральных и субаквальных условий намыва для более быстрого уплотнения осадка, сохранения пластичности экрана и предотвращения появления трещин усыхания [11].

Пленочные экраны применяются в сочетании с грунтовыми экранами как с системами дренажа, так и без них [9]. В качестве синтетических материалов используются полиэтиленовые пленки, асфальтобитум, асфальтополимербетон и др. Использование пленочных экранов без дренажа существенно ограничено и применяется для резер-

вуаров чистой воды либо прудов-накопителей промышленных стоков небольшой площади. Такие экраны укладываются между двумя слоями слабопроницаемых грунтов с добавками цемента, смол, битумов, бентонита, усиливающих противofильтрационные свойства грунтов и одновременно защищающих пленочное покрытие [4, 12].

В грунтово-пленочных экранах с системой дренажа (комбинированных системах) полимерная пленка укладывается не между глинами, а на слой песка для отвода фильтрующихся вод (рис. 6).

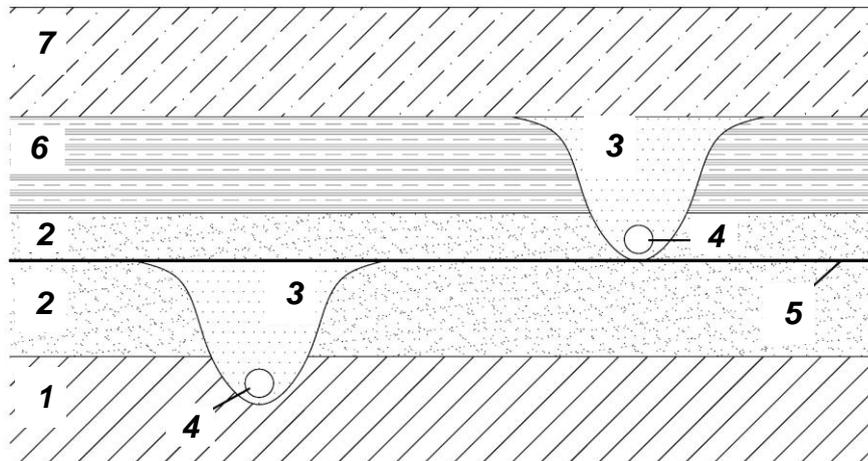


Рис. 6. Разрез ложа шламохранилища с грунтово-пленочным экраном

На естественное основание 1 укладывается песчаный слой 2 толщиной в 30 см, в котором оборудуются песчаные фильтры 3 с перфорированными трубами 4, обеспечивающие сбор и отвод фильтрата (рис. 7). На данное песчаное основание укладывается слой полимерной пленки 5, который, в свою очередь, вновь перекрывается песчаным слоем толщиной в 15 см с системой дренажных труб. В завершении наносится и уплотняется глинистый слой 6 толщиной в 30 см. После чего, в процессе эксплуатации шламохранилища, глинистый слой перекрывается шламовым илом 7, дополнительно усиливающим противofильтрационные свойства. Несмотря на высокую эффективность такой системы, главным недостатком грунтово-пленочных экранов с дренажем является их высокая стоимость при строительстве шламохранилища.



Рис. 7. Укладка дренажной системы.
Шламохранилище вольфрамового месторождения La Parilla, Испания [10]

Главными недостатками полимерных покрытий является их подверженность механическим повреждениям, чувствительность к растягивающим усилиям, трудность в обеспечении герметичности при больших площадях покрытий.

Заключение

Противофильтрационные мероприятия на гидротехнических сооружениях горной и металлургической промышленности крайне важны, поскольку от качества их организации непосредственно зависит безопасность захоронения хвостов, влияние на экосистемы и качество подземных вод.

Независимо от выбора конкретного способа строительства шламохранилища в каждом из типовых видов ограждающих дамб и оснований предусматриваются решения, направленные на максимальную минимизацию фильтрации.

В целях оперативного управления на шламохранилищах ведется мониторинг, задача которого – своевременное выявление развития процессов, способных привести к нарушению устойчивости дамбы, развитию эрозионных процессов, загрязнению поверхностных и подземных вод. Для этого по всему периметру шламохранилищ организуют наблюдательные створы, в границах которых размещают грунтовые марки, пьезометры, инклинометры и т.д. Переход к цифровым датчикам, позволяющим осуществлять передачу важнейших показателей в режиме реального времени, является перспективным направлением модернизации промышленности и развития научно-практической базы [6].

Успешное осуществление водоохраных мероприятий возможно только на базе эффективного мониторинга подземных вод в комплексе с непрерывно уточняемыми по его данным прогнозными оценками эволюции загрязнения, при этом схемы мониторинга должны тесно увязываться с конкретными водоохраными мерами [4].

Список литературы

1. Rybnikov P., Smirnov A., 2020. Quality analysis of the Earth remote sensing data in the surface runoff modeling for failure prediction at the tailing dumps. *E3S Web of Conferences*, Vol. 177, 8 p. DOI: 10.1051/e3sconf/202017706002.
2. Zongjie Lyu, Junrui Chai, Zengguang Xu, Yuan Qin, and Jing Cao, 2019. A Comprehensive Review on Reasons for Tailings Dam Failures Based on Case History. *Adv. in Civil Eng.*, Vol. 2019, 18 p. DOI: 10.1155/2019/4159306.
3. Guerra, M.B.B., Teaney, B.T., Mount, B.J. et al., 2017. Post-catastrophe Analysis of the Fundão Tailings Dam Failure in the Doce River System, Southeast Brazil: Potentially Toxic Elements in Affected Soils. *Water Air Soil Pollut*, Vol. 228. DOI: 10.1007/s11270-017-3430-5.
4. Мироненко В.А., Румынин В.Г., 1999. *Проблемы гидроэкологии: монография в 3-х томах. Том 3 (книга 1). Прикладные исследования*. Москва: Изд-во Московского государственного горного университета, 312 с.
5. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., 2021. Оценка факторов формирования гидросферы природно-технических систем (на примере верховьев бассейна реки Тагил, Свердловская область). *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 5 – 2, С. 257 – 272. DOI 10.25018/0236_1493_2021_52_0_257.
6. Morton, K.L., 2021. The Use of Accurate Pore Pressure Monitoring for Risk Reduction in Tailings Dams. *Mine Water Environ*, Vol. 40, P. 42 – 49. DOI: 10.1007/s10230-020-00736-0.
7. *Рекомендации по проектированию и строительству шламонакопителей и хвостохранилищ металлургической промышленности*, 1986. ВНИИ ВОДГЕО. Москва: Стройиздат, 128 с.
8. East D., Fernandez R., 2021. Managing Water to Minimize Risk in Tailings Storage Facility Design, Construction, and Operation. *Mine Water Environ*, Vol. 40, P. 36 – 41. DOI: 10.1007/s10230-020-00720-8.

9. Чуянов Г.Г., 1998. *Хвостохранилища и очистка сточных вод*. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 246 с.
10. Galera, J.M., de la Fuente, F., García, J. et al., 2021. Design and Construction of a Tailings Dam over an Ancient Tailings Facility at La Parrilla Mine. *Mine Water Environ*, Vol. 40, P. 63 – 73. DOI: 10.1007/s10230-021-00756-4.
11. Дашко Р.Э., Крысов О.Ю., Мольский Е.В., Петров Н.С., 1985. Изучение про- тивофильтрационных экранов шламоохранилищ жидких отходов калийного производ- ства. *Охрана окружающей среды калийных производств. Тр. ВНИИталургии*. Ленин- град, С. 73 - 83.
12. Dinchake W.G., 1984. A silcement/syntetic membrane liner for hazardous waste improvements. *Water Int.*, Vol. 9 - 2., P. 79 - 83.
13. Нурок Г.А., Лутовинов А.Г., Шерстюков А.Д., 1977. *Гидроотвалы на карье- рах*. Москва: Недра, 308 с.

References

1. Rybnikov P., Smirnov A., 2020. Quality analysis of the Earth remote sensing data in the surface runoff modeling for failure prediction at the tailing dumps. *E3S Web of Confer- ences*, Vol. 177, 8 p. DOI: 10.1051/e3sconf/202017706002.
2. Zongjie Lyu, Junrui Chai, Zengguang Xu, Yuan Qin, and Jing Cao, 2019. A Com- prehensive Review on Reasons for Tailings Dam Failures Based on Case History. *Adv. in Civ- il Eng.*, Vol. 2019, 18 p. DOI: 10.1155/2019/4159306.
3. Guerra, M.B.B., Teaney, B.T., Mount, B.J. et al., 2017. Post-catastrophe Analysis of the Fundão Tailings Dam Failure in the Doce River System, Southeast Brazil: Potentially Toxic Elements in Affected Soils. *Water Air Soil Pollut*, Vol. 228. DOI: 10.1007/s11270- 017-3430-5.
4. Mironenko V.A., Rumynin V.G., 1999. Problemy gidroekologii: monografiya v 3-kh tomakh. Tom 3 (kniga 1). *Prikladnye issledovaniya*. [Problems of hydroecology: a monograph in 3 volumes. Volume 3 (book 1). Applied research]. Moscow: Izd-vo Mos- kovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, 312 p.
5. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A., 2021. Otsenka faktorov formirovaniya gid-rosfery prirodno-tekhnicheskikh sistem (na primere verkhov'ev basseina reki Tagil, Sverdlovskaya oblast') [Assessment of the factors of formation of the hydrosphere of natural and technical systems (on the example of the upper reaches of the Tagil River basin, Sverdlovsk region)]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 5 – 2, P. 257 – 272. DOI 10.25018/0236_1493_2021_52_0_257.
6. Morton, K.L., 2021. The Use of Accurate Pore Pressure Monitoring for Risk Re- duction in Tailings Dams. *Mine Water Environ*, Vol. 40, P. 42 – 49. DOI: 10.1007/s10230- 020-00736-0.
7. Rekomendatsii po proektirovaniyu i stroitel'stvu shlamonakopitelei i khvos- tokhranilishch metallurgicheskoi promyshlennosti [Recommendations for the design and con- struction of sludge accumulators and tailings dumps of the metallurgical industry, 1986]. VNII VODGEO. Moscow: Stroiizdat, 128 p.
8. East D., Fernandez R., 2021. Managing Water to Minimize Risk in Tailings Storage Facility Design, Construction, and Operation. *Mine Water Environ*, Vol. 40, P. 36 – 41. DOI: 10.1007/s10230-020-00720-8.
9. Chuyanov G.G., 1998. Khvostokhranilishcha i ochistka stochnykh vod [Tailings dumps and wastewater treatment]. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 246 p.
10. Galera, J.M., de la Fuente, F., García, J. et al., 2021. Design and Construction of a Tailings Dam over an Ancient Tailings Facility at La Parrilla Mine. *Mine Water Environ*, Vol. 40, P. 63 – 73. DOI: 10.1007/s10230-021-00756-4.

11. Dashko R.E., Krysov O.Yu., Mol'skii E.V., Petrov N.S., 1985. Izuchenie protivofil'tratsionnykh ekranov shlamokhranilishch zhidkikh otkhodov kaliinogo proizvodstva. Okhrana okruzhayushchei sredy kaliinykh proizvodstv. [Study of anti-filtration screens of sludge storage facilities for liquid waste of potash production. Environmental protection of potash production]. Tr. VNIItalurgii. Leningrad, P. 73 - 83.

12. Dinchake W.G., 1984. A silcement/syntetic membrane liner for hazardous waste imrovements. *Water Int.*, Vol. 9 - 2., P. 79 - 83.

13. Nurok Г.А., Lutovinov A.G., Sherstyukov A.D., 1977. Gidrootvaly na kar'erakh [Hydraulic dumps at quarries]. Moscow: Nedra, 308 p.