

Д.В. Рудаков, Т.И. Перкова

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГЛИНИСТЫХ ЭКРАНОВ В ОСНОВАНИЯХ ОТСТОЙНИКОВ МИНЕРАЛЬНЫХ ШАХТНЫХ ВОД

Проведен комплекс лабораторных исследований и численного моделирования фильтрации минерализованных вод в глинистых грунтах в условиях их суффозии. Разработана численная модель водного баланса в отстойнике, которая учитывает динамические изменения свойств суглинистого экрана под влиянием химической суффозии. Путем инверсного моделирования установлен кинетический параметр интенсивности химических реакций рассолов с суглинками.

ОЦІНКА ЗМІН ПРОНИКНОСТІ ГЛИНИСТИХ ЕКРАНІВ В ОСНОВАХ ВІДСТІЙНИКІВ МІНЕРАЛІЗОВАНИХ ШАХТНИХ ВОД

Проведено комплекс лабораторних досліджень та чисельного моделювання фільтрації мінералізованих вод у глинистих грунтах в умовах їх суфозії. Розроблено чисельну модель водного балансу у відстійнику, яка враховує динамічні зміни властивостей суглинного екрана під впливом хімічної суфозії. Шляхом інверсного моделювання встановлено кінетичний параметр інтенсивності хімічних реакцій розсолів з суглинками.

EVALUATION OF PERMEABILITY CHANGES OF CLAYEY SCREEN BELOW IMPOUNDMENTS OF MINERALIZED MINE WATER

Laboratory studies and numerical simulation have been carried out for mineralized solute flow in clays affected by suffusion. This, in turn, leads to increasing permeability of loam and changes its physical and mechanical properties. The numerical water balance model developed for an impoundment considers time-dependent changes of clayey screen properties due to chemical suffusion. The kinetic parameter of the chemical reaction rate between salutes and clayey loam has been estimated by inverse modeling.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка месторождений полезных ископаемых сопровождается интенсивным водоотливом шахтных вод различной минерализации. Согласно практике последних десятилетий дренажные воды локализируются в отстойниках, прудах-накопителях, основания которых часто выполнены из грунтов низкой проницаемости [1 – 4].

Однако подобные геотехнические объекты проектировались согласно нормативным документам, в которых должным образом не учтено совокупное влияние гидродинамических и физико-химических факторов, изменяющих свойства пород, их способность локализовать жидкие отходы. Вопросы кинетики взаимодействия шахтных вод с грунтами оснований таких сооружений не уделялось должного внимания.

Длительный опыт эксплуатации отстойников в Криворожском бассейне и Западном Донбассе свидетельствует об интенсификации фильтрационных потерь из водоотстойников. Они приводят к нарушению структуры породы и снижению ее прочностных характеристик: угла внутреннего трения и удельного сцепления. В свою очередь, миграция минерализованных шахтных вод в верхней части массива горных пород способствует растворению и выщелачиванию солей, сначала стенок пор, затем – легкорастворимых карбонатных частиц, и суффозионному выносу продуктов коагуляции. Это приводит к увеличению проницаемости вмещающих пород, фильтрационным деформациям массива, определяемым наличием провалов на поверхности земли в зоне влияния отстойников.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Проблема фильтрационных потерь шахтных вод из отстойников и активизации суффозии и карста особенно актуальна для центральной части Криворожского бассейна, где компактно размещены несколько отстойников. Минерализация шахтных вод в отстойнике в балке Свистуново в месте сброса изменялась от 20 до 30 г/л. Однако вследствие слабой суффозионной устойчивости грунтов основания происходили утечки шахтных вод. С 1976 по 1978 гг. размыв и химическая суффозия экрана повлекли за собой утечку более 21 млн м³ минерализованных вод, что способствовало формированию суффозионно-карстовых воронок и впадин на территории с. Новоселовка (рис. 1).

Вопросы утечек через глинистый экран и последующего формирования «фильтрационных бугров» детально рассмотрены в [1] и Н.Н. Веригиным. В [1] приведены формулы для определения коэффициента фильтрации в зависимости от состава и размера частиц, деформации сечений пор, фильтрационных ходов и т.д. Эти расчет-

ные схемы содержат много эмпирических соотношений, требующих лабораторного подтверждения.

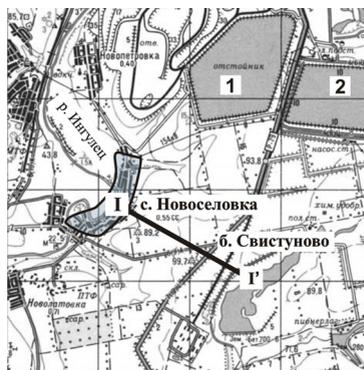


Рис. 1. Обзорная карта района исследований (М 1:100000): 1, 2 – отстойники ЮГОКа и НКГОКа «Войково» и «Объединенное»

Применяемые на практике модели фильтрации и миграции рассолов через водоупорные экраны основаны, как правило, на представлениях сплошной пористой среды [5] и не учитывают должным образом движение солей через трещины различного раскрытия.

Фильтрационные деформации грунта изучены в работах В.С. Истоминой, С.В. Избаша, А.Н. Патрашева, Е.А. Замарина, а также Ю.М. Шехтмана. Однако их результаты основаны на схеме одномерной линейной и радиальной фильтрации малокоцентрированных смесей жидкости с взвешенными твердыми частицами. Модели трещиноватопористой среды не учитывают структурные изменения пород при миграции рассолов, которые сопровождаются реакциями растворения.

Поэтому целью данной работы является комплексная количественная оценка параметров суффозии глинистых грунтов при фильтрации через них шахтных вод переменной плотности путем выполнения лабораторных исследований и численного моделирования. Предложенная методика позволяет прогнозировать влияние фильт-

рационных потерь минерализованных шахтных вод на устойчивость нарушенного массива горных пород и обосновывать технологические решения безопасных условий функционирования отстойников с целью предупреждения фильтрационных деформаций.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Предварительный прогноз развития суффозии в связных грунтах возможен путем определения гранулометрического состава и показателей физических свойств грунта. С этой целью выполнены опыты по установлению гранулометрического состава связного грунта методом отмучивания в приборе Сабанина и коэффициента фильтрации в стандартизированном приборе трехосного сжатия. Исходным материалом служил грунт, отобранный из экранирующего слоя ложа водоотстойника в балке Свистуново в районе с. Новоселовка (см. рис. 1).

Метод Сабанина основывается на зависимости между диаметром частиц и скоростью их падения в воде, которая рассчитывается по формуле Стокса. По стандартной методике [7] выделены фракции частиц определенных размеров и определено их количественное содержание в анализируемом грунте. Результаты анализа приведены на рис. 2.

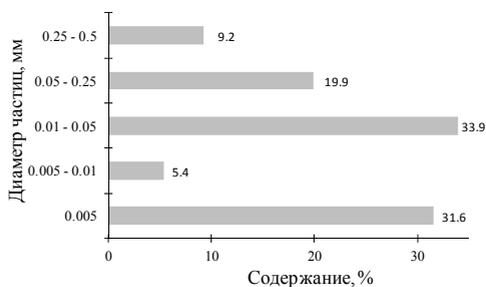


Рис. 2. Гистограмма гранулометрического состава глинистого грунта

Согласно результатам в исследуемом грунте содержится: песчаной фракции

(0,05 – 0,5 мм) – 29,1%; глинистой фракции (<0,005 мм) – 31,6%; пылевой фракции (0,005 – 0,05 мм) – 39,3%. По гранулометрическому составу, согласно зависимости Ферре, анализируемый грунт относится к суглинку глинистому.

Суффозию можно удовлетворительно объяснить, учитывая средние в гидравлическом отношении диаметры пор в глинистых грунтах

$$d_{cp}^0 \approx 3,1 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot \nu}{n_0}}, \text{ мм}, \quad (1)$$

где k – коэффициент фильтрации, см/с;

ν – кинематический коэффициент вязкости, см²/с;

$n_0 = n - n_m$ – активная пористость грунта с максимальной молекулярной влажностью $W_m > 3\%$;

n – геометрическая пористость;

$n_m = (\delta \cdot W_m) / \delta_g$ – объем пор, занятый связанной водой объемной массой δ_g .

С целью адекватного учета фильтрационных свойств пород основания выполнены стабилометрические испытания суглинка глинистого в приборе трехосного сжатия производства компании VJTech Ltd. В эксперименте использовался образец грунта нарушенной структуры, объемной массой 1,47 г/см³ и пористостью 45%. Далее образец длиной 0,075 м и площадью поперечного сечения 0,001 м² помещался в камеру стабилометра. Камера заполнялась водой для воссоздания природного горизонтального давления в массиве, равному 100 кПа, а с помощью вертикального штока передавалась осевая нагрузка на образец грунта, которая составила 50 кПа. Образец, всесторонне обжатый в камере, насыщался в течение 2 сут. После полного насыщения фиксировался расход через равные промежутки времени 10 мин. После 8 ч с момента начала фильтрации расход установился, и коэффициент фильтрации суглинка при движении пресной воды составил 0,02 м/сут, что свидетельствует о недостаточной водоудержи-

вающей способности грунта основания для предотвращения фильтрационных утечек.

Согласно расчетам средние в гидравлическом отношении диаметры пор суглинка глинистого составляют 0,004 мм, что может способствовать выносу частиц меньшего диаметра фильтрационным потоком. Их содержание в грунте составляет порядка 31% (рис. 2).

Для исследования физико-химических изменений емкостных свойств суглинистого грунта в основании отстойника выполнены эксперименты в условиях высоких градиентов миграции минерализованных вод.

Экспериментальная установка состоит из следующих элементов: корпуса с пробкой, трубки, резервуара с водой, рейки-линейки. Пластмассовый корпус в форме цилиндра высотой 10 см и площадью 16,6 см² снизу ограничен сеткой с диаметром отверстий порядка 0,2 мм, а сверху герметично закрыт пробкой. К пробке подсоединены трубка для подвода воды из резервуара в цилиндр и трубка воздуховода, которая служит для свободного подъема и стабилизации уровня. Резервуар с водой фиксировался на рейке-линейке, оборудованной специальными приспособлениями для свободного перемещения вверх или вниз по ней, с целью создания заданного градиента напора.

Суть опыта сводилась к помещению в цилиндр глинистого грунта нарушенной структуры, дальнейшему его уплотнению и насыщению, и собственно к процессу фильтрации через образец высотой 7 см пресной и минерализованной рудничной воды, отобранной непосредственно в месте сброса в отстойник. Давление на грунт передавалось ступенями и составило 0,5 кгс/см². Через фиксированные промежутки времени замерялся расход при гидравлических градиентах 2; 7; 12; 17; 22 и 26, соответствующих диапазону градиентов в основании отстойника в балке Свистуново.

По завершении опыта вычислены скорость фильтрации v и расход Q через образец грунта пресной и минерализованной

шахтной воды в зависимости от градиента (рис. 3).

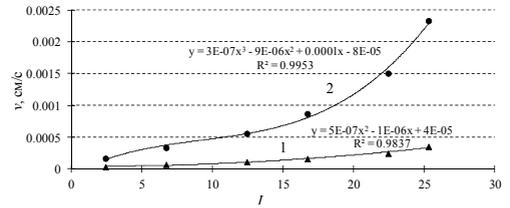


Рис. 3. Зависимость скорости фильтрации v пресной 1 и шахтной воды 2 от гидравлического градиента I

Установлено, что скорость фильтрации возрастает в 2 – 14 раз по мере увеличения гидравлического градиента и изменяется от $3,51 \cdot 10^{-5}$ до $3,53 \cdot 10^{-4}$ см/с при движении пресной воды от $1,67 \cdot 10^{-4}$ до $2,33 \cdot 10^{-3}$ см/с – при фильтрации минерализованной воды.

Для количественной оценки проницаемости суглинка глинистого, которая формируется за счет эффективной пористости, рассматривается объем грунта, помещенного в цилиндр $V_{zp} = 111$ см³ и плотностью $\gamma = 2,71$ г/см³. Согласно расчетам объемная масса грунта δ составила 1,53 г/см³, а общая пористость $n_0 = 43\%$. Объем грунта, занятый порами, $V_{пор} = n_0 \cdot V_{zp}$, $V_{пор} = 47,73$ см³. Пусть $n_{1,2} = (V_{расфв1,2} \cdot n_0) / V_{пор}$ – значение эффективной пористости при фильтрации пресной 1 и минерализованных вод 2, $V_{расфв1,2}$ – объем профильтровавшихся за все время опыта растворов 1 и 2.

Эффективная пористость исследуемого суглинка при фильтрации пресной воды n_1 составляет 2,7%. С повышением минерализации раствора до 30 г/л происходит увеличение порового пространства n_2 , доступного для движения растворов, до 8,7%. Вероятно, причина роста проницаемости под воздействием минерализованного раствора заключается в уменьшении толщины слоя связанной воды и увеличении порового пространства.

Предварительный прогноз изменения прочностных и деформационных свойств глинистых грунтов в ложе водоотстойника выполнен путем определения удельного сцепления c , угла внутреннего трения φ и модуля деформации E исходя из коэффи-

циента пористости грунта e и его влажности на границе текучести $W_L = 0,25$ [6]. Оцененные значения указанных геомеханических параметров приведены в таблице.

ОЦЕНЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ГРУНТА

Таблица

Геомеханический параметр	Показатель до фильтрации	Показатель после фильтрации	Относительное изменение, %
e	0,75	0,96	+28
c , кПа	23	15	-34
φ , град	21	17	-19
E , МПа	14	8	-42

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для оценки параметра химической суффозии в основании отстойника в балке Свистуново, согласно данным мониторинга, разработана численная модель, которая описывается уравнением баланса воды в отстойнике и учитывает динамические изменения фильтрационных свойств суглинистого экрана. Модель воспроизводит одновременную фильтрацию через поры и гидравлическое течение в расширяющихся со временем трещинах.

Разработанная модель основана на уравнении баланса воды в водоотстойнике

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = Q_{ув} + Q_{осн} + Q_{нв} + Q_{исп} + Q_{атм.ос}, \quad (2)$$

где $Q_{ув}$ – интенсивность сброса рудничных вод;

$Q_{осн}$ – расход через дно водоотстойника;

$Q_{нв}$ – боковой приток (отток) за счет взаимодействия с грунтовыми водами;

$Q_{исп}$ и $Q_{атм.ос}$ – расходы, обусловленные испарением и атмосферными осадками с учетом поверхностного стока;

$\Delta V \approx S \cdot \Delta h$ – изменение объема накопителя в течение времени Δt ;

Δh – соответствующее изменение уровня воды в отстойнике;

S – площадь поверхности воды.

Параметры S и V в зависимости от уровня воды h аппроксимируются с помощью усеченной пирамиды (рис. 4).

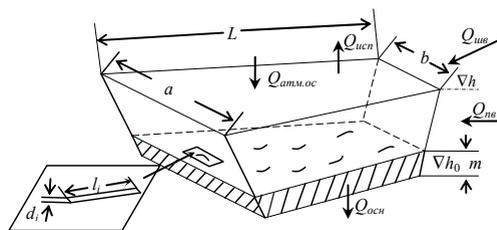


Рис. 4. Схематизация водоотстойника

Изменение проницаемости суглинков в дне водоотстойника под воздействием рассолов в реальных условиях происходит за счет увеличения количества трещин и промоин, площади их поперечного сечения. Такой процесс целесообразно моделировать путем выделения двух составляющих расхода через дно

$$Q_{осн} = Q_{осн,тр} + Q_{осн,гр}, \quad (3)$$

где $Q_{осн,гр} = S_{осн} \cdot K_{осн} \cdot I$ – фильтрационный расход через поры;

$S_{осн}$ – площадь дна;

$K_{осн}$ – коэффициент фильтрации ненарушенных суглинков при движении пресной воды;

$I = (h - h_{осн}) / m_{осн}$ – градиент;

$h_{осн}$ – отметка дна;

$m_{осн}$ – мощность донного шара суглинков;

$Q_{осн,мр}$ – гидравлический расход через трещины, который определяется с помощью формул потока жидкости через канал [0] с учетом присутствия n групп каналов со средней шириной d_i , $i = 1, \dots, n$

$$Q_{осн,мр} = \frac{g}{12V} k_t k_f \sum_{i=1}^n k_{h,i} d_i^2 S_{f,i}. \quad (4)$$

Здесь k_t , k_f та $k_{h,i}$ – коэффициенты сопротивления, которые учитывают извилистость каналов, форму их поперечного сечения, режим и скорость течения в них соответственно; $S_i = d_i \cdot l_i$ – суммарная площадь каналов; l_i – их суммарная длина на площади дна.

Градиент I определяется на основании поточного уровня воды в отстойнике, формы дна, согласно отметкам рельефа, мощности экрана. Изменение площади суффозионных каналов $S_{мр}$ в основании отстойника оценено путем инверсного моделирования процессов, которые сопровождали заполнение отстойника в балке Свиштуново шахтными водами в 1976 – 1978 гг., и рассчитано согласно уравнению, которое описывает динамику расширения площади трещин во времени

$$\frac{dS_{мр}}{dt} = \sigma S_{мр}, \quad (5)$$

где σ – параметр интенсивности химических реакций расколов с суглинками.

Интенсивность сброса задавалась постоянной (рис. 5).

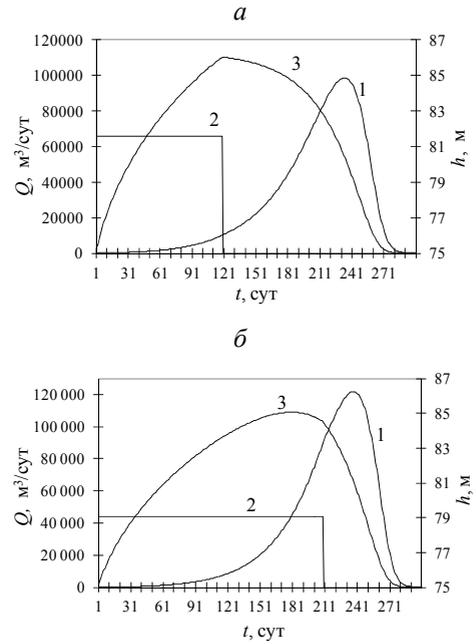


Рис. 5. Динамика фильтрационных утечек из водоотстойника в периоды: а – 22.03.1976 – 10.01.1977 гг.; б – 15.07.1977 – 13.04.1978 гг.; 1 – утечки из отстойника; 2 – расход Q сброса шахтных вод; 3 – уровень воды h

В условиях неполноты данных про уровень воды в этот период основным критерием адекватности модели отображенных процессов было полное опустошение отстойника к концу периода наблюдений и ограничение уровня воды максимальными отметками. Начальное распределение трещин по размеру для обоих периодов характеризуется диапазоном от 1 до 2 см с преобладанием мелких трещин. Согласно расчетам суммарная площадь их поперечного сечения увеличилась от 0,01 до 1% общей площади дна за каждый период эксплуатации накопителя.

Результаты моделирования показали, что наполнение отстойника 2, 3 сопровождается сначала небольшими, но постепенно возрастающими потерями шахтной воды I , преимущественно за счет гидравлической составляющей, которая увеличивается до

99,9% от общего расхода утечек спустя 5 – 6 мес. Уменьшение расхода сброса 2 на 40% после восстановления дна летом 1977 г. (рис. 5, б) практически не изменило термины осушения. Причем максимальные утечки I в этот период увеличились на 25% и достигли $q_{max} = 121772 \text{ м}^3/\text{сут}$ спустя 8 мес. Это свидетельствует о слабой суффозионной устойчивости суглинистого экрана отстойника.

Совпадение прогнозного времени и динамики осушения пруда получено при значении кинетического параметра $\sigma = (8 \pm 2) \cdot 10^{-3} \text{ 1/сут}$. В таких условиях размер промоин увеличивается на один-два порядка и достигает 20 см спустя 9 мес. с момента начала фильтрации. Достоверность полученных оценок подтверждается натурными исследованиями основания отстойника после фильтрационных утечек и результатами проведенных экспериментов В.А. Приклонским и В.М. Гольдбергом.

ВЫВОДЫ

Для прогноза развития суффозии в грунте, отобранном из экранирующего слоя лотка водоотстойника в балке Свистуново, при движении вод естественного компонентного состава выполнены эксперименты по установлению его гранулометрического состава и коэффициента фильтрации, который составил 0,02 м/сут. Определено, что для анализируемого грунта характерны средние в гидравлическом отношении диаметры пор порядка 0,004 мм, что может способствовать выносу частиц меньшего диаметра фильтрационным потоком.

Установлено, что с увеличением гидравлического градиента от 2 до 26, соответствующему диапазону градиентов в основании отстойников, скорость фильтрации шахтной хлоридно-натриевой воды с концентрацией солей до 33 г/л возрастает в 2 – 14 раз, что в 4 – 7 раз выше скорости фильтрации пресной воды и сопровождается увеличением пористости суглинка глинистого до 4 раз. На основании экспериментально оцененных параметров влажности и коэффициента пористости установлено снижение прочностных и деформационных свойств на 20 – 40%, что приводит к формированию суффозионных промоин в основании водоотстойника и снижает устойчивость массива.

Для оценки параметра химической суффозии в основании отстойника шахтных вод разработана численная модель, которая основывается на уравнении баланса воды в нем и воспроизводит одновременную фильтрацию через поры и гидравлическое течение в трещинах, расширяющихся со временем. Путем инверсного моделирования оценен параметр интенсивности химических реакций рассолов с суглинками, который составил $(8 \pm 2) \cdot 10^{-3} \text{ 1/сут}$, а также динамика утечек из отстойника.

Количественные оценки физико-химических изменений глинистых пород в основаниях отстойников минерализованных шахтных вод позволяют поддерживать безопасные условия функционирования отстойников и хвостохранилищ путем обоснования инженерных мероприятий по минимизации фильтрационных потерь из них, угрожающих потерей устойчивости породного массива.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП 2.06.05-84*. Плотины из грунтовых материалов. – Взамен СНиП 2.06.05-84; действующий от 1990-09-17. – М.: Госстрой СССР, 1991. – 143 с.
2. Водохранилища и водооградительные сооружения ГАЭС, ТЭС и АЭС / П.Д. Гавриш [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.
3. Евграшкина Г.П. Влияние горнодобывающей промышленности на гидрогеологические и почвенно-мелиоративные условия территорий: монография / Г.П. Евграшкина. – Д.: Монолит, 2003. – 200 с.
4. Истомина В.С. Фильтрационная устойчивость грунтов / В.С. Истомина. – М.: Госстройиздат, 1957. – 295 с.
5. Гидротехнические сооружения / Г.В. Железняков [и др.]. – М.: Стройиздат, 1983. – 543 с.
6. ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування. – чинний від 2009-07-01. – К.: ДП «Укрархбудінформ»: Мінрегіонбуд України, 2009. – 86 с. – (Нормативний документ Мінбуду України).

7. ГОСТ 5180-84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – Взамен ГОСТ 5180-75; действующий от 85-07-01. – М.: Стандартиформ, 2005. – 18 с. – (Межгосударственный стандарт).

8. Soil mechanics: level I; module 3 – USDA textural soil classification: study guide. – Washington, D.C.: National Employee Development Staff, Soil Conservation Service, United States Department of Agriculture, 1987.

9. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

ОБ АВТОРАХ

Рудаков Дмитрий Викторович – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой гидрогеологии и инженерной геологии Национального горного университета.

Перкова Татьяна Ивановна – к.т.н., ассистент кафедры гидрогеологии и инженерной геологии Национального горного университета.