

ВЛИЯНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ НАРУШЕНИЙ НА УРОВЕНЬ ФИЛЬТРУЮЩИХСЯ ВОД И СОСТОЯНИЕ НАСЫПНОГО ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СООРУЖЕНИЯ

Д. А. Максимов

Горный институт — обособленное подразделение Федерального исследовательского центра
«Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия

Аннотация: Рассмотрены механизмы влияния фильтрационного нарушения на состояние насыпного гидротехнического сооружения (ГТС) опосредованно через влияние на положение и геометрию депрессионной кривой, классически определяемую по результатам измерений воды в пьезометрах. Рассмотренные механизмы были продемонстрированы на примере насыпной дамбы хвостохранилища обогатительной фабрики горнорудного предприятия Мурманской области. На основании сравнения депрессионной кривой, полученной по результатам измерений глубины воды в пьезометрах, и кривой, полученной по результатам визуального и геофизического обследования дамбы, было продемонстрировано искажение депрессионной кривой в теле выбранной дамбы на участках фильтрационных нарушений. Кривая, полученная по результатам визуального и геофизического обследования, показала лучшую детализацию, чем кривая, полученная классическим методом. При этом геометрия полученных кривых имеет участки сильного расхождения, вызванные воздействием фильтрационных нарушений, что приводит к непрогнозируемому и неконтролируемому классическими методами изменению депрессионной кривой, в результате способному привести к нарушению критериев безопасности и разрушению ГТС. Кроме того, в статье продемонстрировано влияние фильтрационного нарушения на уровень фильтрующихся вод, характеризуемый депрессионной поверхностью, при отсыпке, восстановлении или укреплении элементов ГТС. Так после восстановления уступа рассмотренного ГТС при постепенной консолидации и кольматации восстановленной полки в зоне фильтрационного нарушения, происходило постепенное повышение уровня фильтрующихся вод на вышележащих уступах. Изменение уровня воды в пьезометрах, расположенных на вышележащей полке, привело к превышению проектных критических значений, что подразумевает риск разрушения ГТС.

Ключевые слова: гидротехническое сооружение, дамба, фильтрационные нарушения, депрессионная кривая, устойчивость.

Для цитирования: Максимов Д. А. Влияние фильтрационных нарушений на уровень фильтрующихся вод и состояние насыпного гидротехнического сооружения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5–1. – С. 280–291. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_280.

Impact of impaired permeability on percolating water level and on condition of rock-fill hydrotechnical facility

D. A. Maksimov

Mining Institute Kola Science Centre RAS, Apatity, Russia

Abstract: The article considers the mechanisms of impaired permeability impact on the rock-fill hydrotechnical facility quality indirectly, through the influence on the position and geometry of the depression curve classically determined from the results of water measurements in piezometers. The considered mechanisms are demonstrated in terms of the dam at the tailings pond of a dressing plant at a mine in the Murmansk Region. The comparison of the depression curve obtained from the water depth measurements in piezometers and the curve from the visual and geophysical survey of the dam points at the distortion of the depression curve in the body of the test dam in the areas of impaired permeability. The curve obtained by the visual and geophysical survey offers better detailing than the classical method curve. At the same time, the geometry of the obtained curves contains strong disagreement sections due impaired permeability effects, which leads to classically unpredictable and uncontrollable changes in the depression curve, resulting in failure to meet the safety criteria and in collapse of the dam. Furthermore, the article demonstrates the effect of impaired permeability on percolating water level characterized by the depression plane during filling, restoration or reinforcement of the components of the hydrotechnical facility. For instance, after restoration of the test dam bench, with gradual consolidation and mudding of the restored bench in the zone of impaired permeability, the level of percolating water progressively increased on the upper benches. The changed water level in the piezometers located on the overlying bench exceeded the critical design values, which implied the risk of failure of the hydrotechnical facility.

Key words: hydrotechnical facility, dam, impaired permeability, depression curve, stability.

For citation: Maksimov D. A. Impact of impaired permeability on percolating water level and on condition of rock-fill hydrotechnical facility . *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5–1):280–291. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_51_0_280.

Введение

Одними из страшнейших катастроф на протяжении последних лет являются аварии на насыпных гидротехнических сооружениях (ГТС). Такие аварии приводят к значительному ущербу окружающей среде, экономике региона и страны в целом, инфраструктуре региона расположения, а также к многочисленным человеческим жертвам, потере имущества, иногда даже к уничтожению множества населенных пунктов [1, 2]. Так, например, в результате аварии на хвостохранилище горнорудной компании *Sórgregó do Feijão* (Бразилия), произошедшей 25 января 2019 г., выплеснулись про-

мышленные отходы объемом 12 млн м³ [3, 4]. В результате аварии погибло 259 человек и еще 11 человек числились пропавшими без вести. Выплеснувшиеся в результате аварии хвосты привели к повреждениям объектов горнорудного предприятия, жилых домов, рек, в том числе, являющихся источником питьевой воды, моста, железнодорожных путей и другой инфраструктуры [5].

В связи с огромным ущербом, наносимым авариями на насыпных ГТС, их безопасности уделяется особое внимание. Проводятся работы по регулярному мониторингу сооружений, контролю критериев безопасной работы,

надзору, проектированию и расчетам контролируемых параметров.

Одним из основных контролируемых параметров является положение депрессионной кривой в теле сооружения. От положения депрессионной кривой зависит кривая скольжения — определяемая при проектировании линия или семейство линий, для которых рассчитывается коэффициент и критерии устойчивости, характеризующие состояние отдельных уступов или ГТС в целом.

Вместе с тем, кроме процессов, которые могут быть описаны положением депрессионной кривой, существуют и локальные фильтрационные процессы, возникающие в результате фильтрационных нарушений.

В работе насыпных ГТС важную роль играет баланс удерживающих и сдвигающих сил, действующих на отдельные частицы материала сооружения. Соотношение этих сил постоянно изменяется по различным причинам: изменения в технологических процессах, изменение параметров фильтрационных потоков, применение противофильтрационных средств и других. В отдельных случаях баланс сил может измениться таким образом, что сдвигающие силы на отдельном участке сооружения превысят удерживающие. Такое нарушение баланса сил приводит к выносу фильтрационным потоком самых мелких частиц сооружения (рис. 1, а). При этом вынос частиц происходит не во всем теле ГТС, а концентрируется на отдельных очагах, которые могут быть связаны, например, с имеющимися фильтрационными неоднородностями в теле сооружения — неоднородностями фильтрационных свойств материала сооружения (рис. 1, б). Вынос частиц материала сооружения приводит к снижению противофильтрационных свойств в оча-

гах выноса, что, в свою очередь, ведет к концентрации на них фильтрационных потоков, это еще больше усиливает дисбаланс удерживающих и сдвигающих сил, действующих на частицы материала сооружения. В результате происходит дальнейший вынос уже более крупных частиц материала сооружения в очаге нарушения, а также рост этого нарушения по направлению к основанию ГТС (см. рис. 1, а, б). Происходит формирование фильтрационного нарушения.

Такие локальные фильтрационные процессы могут приводить к появлению протечек и другим явлениям, которые могут являться причиной порядка 31 % всех аварий на насыпных ГТС [7]. Обычно, говоря о локальных фильтрационных нарушениях, говорят о них как об отдельном явлении, и об их влиянии на состояние насыпного ГТС. Однако такие нарушения, кроме влияния на сооружение сами по себе, влияют и на положение депрессионной кривой. Поэтому в данной статье рассмотрим влияние фильтрационных нарушений на состояние насыпного ГТС через влияние на фильтрационные процессы, характеризующиеся положением депрессионной кривой, что будет продемонстрировано на примере насыпной дамбы хвостохранилища горнорудного предприятия Мурманской области.

Методы

К основным методам контроля за положением депрессионной кривой в теле насыпного ГТС относят измерения уровня воды в пьезометрических скважинах различной конструкции, выполняемые различными методами — от ручных измерителей («хлопушек») до современных автоматизированных датчиков. Каждое ответственное насыпное ГТС оборуду-

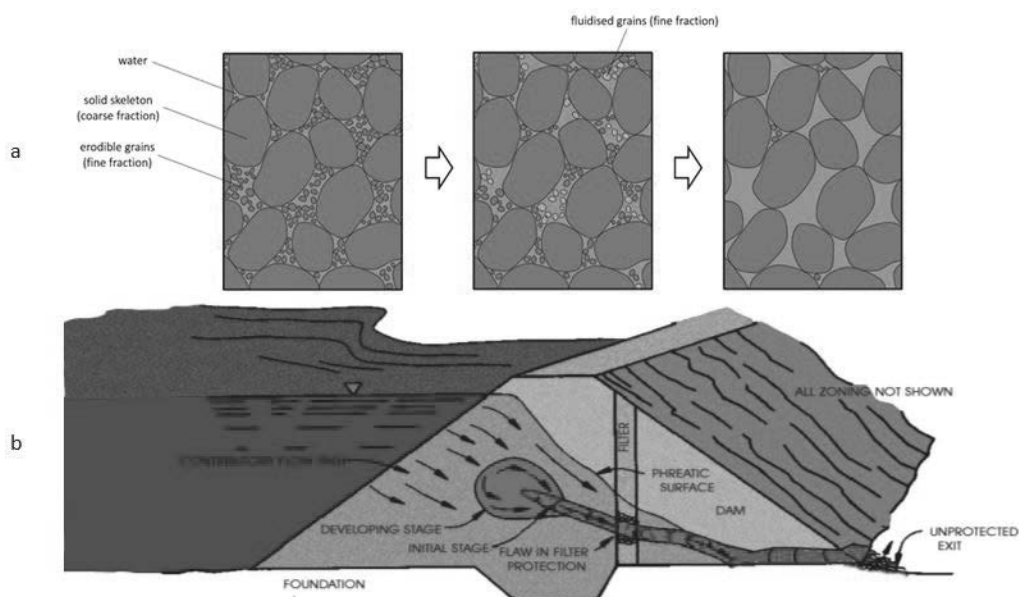


Рис. 1. Формирование фильтрационного нарушения [6]
 Fig. 1. Formation of a filtration violation [6]

ется сетью пьезометров, которые располагаются створами, перпендикулярными оси сооружения. Расположение как самих створов, так и пьезометров в этих створах определяется при проектировании ГТС и зависит от расчётного положения уровня депрессионной кривой, характера фильтрации, параметров сооружения и требований нормативных актов. Также важными параметрами пьезометров являются глубина их забоя и фильтра, так как при недостаточной глубине фильтра пьезометр не сможет определять уровень фильтрующейся воды, которая будет находиться глубже. При слишком большой глубине пьезометра столб воды в фильтровой колонне будет слишком велик, и под действием силы тяжести столба воды будет создаваться избыточное давление в нижней части фильтра пьезометра, что будет приводить к обратной инфильтрации воды из пьезометра в тело ГТС и к значительным погрешностям в работе такого пьезометра.

Однако даже правильно спроектированная и установленная пьезометрическая сеть, измерения на которой выполняются регулярно и точно, может быть неспособна отразить локальные фильтрационные процессы, происходящие в теле сооружения. В таком случае на помощь приходят другие методы изысканий, такие, как геофизическое и визуальное обследование.

Геофизические методы широко применяются при контроле различных параметров работы насыпных ГТС, таких, как положение депрессионной кривой, наличие локальных нарушений, зон неоднородностей, разуплотнения, скорости фильтрационных потоков и многих других. К одним из таких геофизических методов относится георадарное зондирование, которое на основании отражения испускаемых электромагнитных волн от границ материала ГТС с разными электромагнитными свойствами позволяет определять зоны неоднородностей, фильтра-

ционные нарушения, пустоты, а также проследить фильтрационные потоки непрерывно, на всем протяжении георадарного профиля [8, 9].

Еще одним методом, который может быть использован при наблюдении за фильтрационными потоками в теле насыпного ГТС, является визуальное наблюдение. Само по себе визуальное обследование не решает проблему получения данных о положении депрессионной кривой и глубине фильтрующей внутри сооружения воды. Однако визуальные наблюдения позволяют характеризовать фильтрационные процессы, проявляющиеся на поверхности сооружения: выходы и скопления фильтрующихся вод, протечки, обратная инфильтрация и другие. Кроме того, такое обследование позволяет по различным проявлениям на поверхности сооружения характеризовать процессы, происходящие в его теле. Так, например, при визуальном обследовании с использованием ряда специальных индикаторов и, зная механизмы проявления тех или иных процессов на поверхности, можно выявлять зоны фильтрационных нарушений [10]. Кроме того, визуальные наблюдения позволяют фиксировать изменения в работе ГТС, отсыпку, восстановление, технические и технологические работы, которые могут повлиять на фильтрацию и работу сооружения.

Результаты

Первый механизм влияния фильтрационных нарушений на положение депрессионной кривой в теле ГТС и, соответственно, на состояние и надежность сооружения связан с перераспределением фильтрующихся вод. Так, фильтрационное нарушение является областью со сниженными противофильтрационными свойствами, что

приводит к «разгрузке» через область нарушения вод, фильтрующихся на смежных с нарушением участках. В связи с таким перераспределением вод положение депрессионной кривой на участках, смежных с нарушением, меняется. При этом изменение положения депрессионной поверхности происходит непредсказуемо, и, как правило, не может быть проконтролировано пьезометрической сетью ГТС в силу ее высокой дискретности: створы пьезометров отстоят друг от друга на сотни метров, в то время как размеры локальных нарушений редко превышают первые десятки метров.

На рис. 2 представлен график изменения уровня фильтрующихся вод вдоль оси дамбы хвостохранилища горнорудного предприятия, рассматриваемого в качестве примера [11]. Результаты предыдущих исследований свидетельствуют о наличии локальных фильтрационных нарушений на выбранном насыпном ГТС [11 – 13].

График на рис. 2 построен по данным георадарного профиля вдоль оси дамбы, уровень воды на которой был прослежен с привязкой к имеющимся пьезометрическим скважинам.

Как видно из рис. 2, уровень фильтрующихся вод претерпевает существенные изменения на относительно небольших участках дамбы. Например, был выделен ряд зон, на которых отмечается существенное понижение уровня фильтрующихся вод (Зоны II), что объясняется фильтрационными нарушениями [11]. Кроме того, видно, что уровень воды претерпевает существенные изменения не только в зависимости от расстояния от начала дамбы, но и от времени проведения измерений. Так, существенная разница в графиках изменения уровня воды по данным, полученным 2 и 9 ноября, может быть объяснена существенным изменением

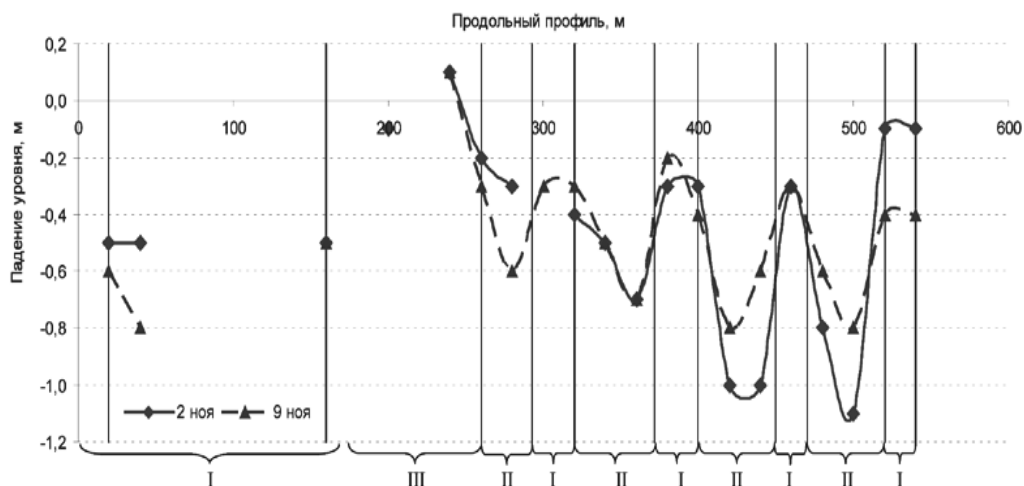


Рис. 2. Изменение уровня воды вдоль уступа дамбы к значениям 24 декабря 2012 года [11]
 Fig. 1. Change in water level along dam bench as against the values as of December 24, 2012 [11]

уровня фильтрующейся воды, произошедшим за представленную неделю.

Такие резкие неконтролируемые изменения уровня фильтрующейся воды приводят к существенному изменению положения депрессионной кривой в теле ГТС, что может послужить причиной нарушения устойчивости сооружения на данном локальном участке. На рис. 3 представлено положение депрессионных кривых на участке рассматриваемой дамбы, полученных по результатам измерений уровня воды в пьезометрах, а также по данным георадарных и визуальных наблюдений.

Депрессионная кривая, полученная по данным георадарного и визуального обследования, представленная на рис. 3, построена по характерным точкам, и отстоит от пьезометрического створа на 50 м вдоль оси дамбы. Точки 1, 3 и 4 определены по данным визуального наблюдения как место выхода и инфильтрации воды из тела и в тело ГТС; точка 2 получена по результатам георадарного профилирования; точка 5 взята по данным измерений уровня воды в пьезометре 4пз.

Из рис. 3 видно, во-первых, что депрессионная кривая, построенная по данным визуального и георадарного обследования, имеет больше точек, таким образом, более детально отражает происходящие в ГТС фильтрационные процессы. Во-вторых, видна разница между получившимися кривыми, что приводит к тому, что оценка устойчивости дамбы по депрессионной кривой, построенной по результатам измерений воды в пьезометрах, не отражает реального состояния ГТС уже на участке, отстоящем на 50 м от пьезометрического створа, особенно на участке 4–5 кривой. Такое расхождение в положениях депрессионных кривых и, соответственно, в устойчивости ГТС объясняется наличием локальных фильтрационных нарушений.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что локальные фильтрационные нарушения приводят к перераспределению потоков фильтрующихся вод в теле насыпного ГТС, приводя к локальным искажениям депрессионной кривой, что оказывает существенное влияние на состояние сооружения.

Кроме описанного выше механизма, локальные фильтрационные нарушения через их влияние на депрессионную кривую делают опасным

производство работ по отсыпке, восстановлению и укреплению откосов насыпных ГТС. Для демонстрации механизма влияния локального нару-

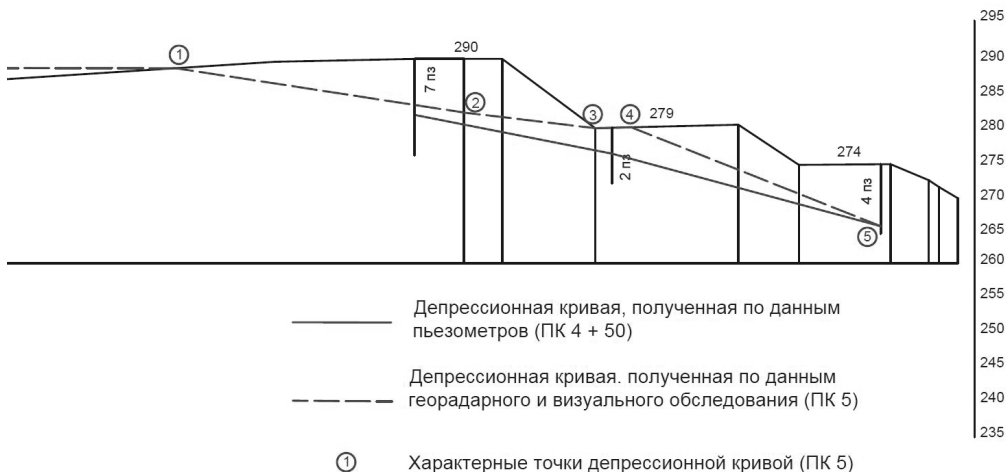


Рис. 3. Положения депрессионной кривой на 9 ноября
 Fig. 3. Depression curve by November 9

Май 2015 (вид с вышележащей полки)



Август 2015 (вид с вышележащей полки)



Май 2015 (вид сбоку)



Август 2015 (вид сбоку)



Рис. 4. Отсыпка нижнего уступа дамбы
 Fig. 4. Fill of bottom bench of dam

нения на положение депрессионной кривой при применении отсыпки и других работ рассмотрим пример влияния восстановления нижней полки выбранной в статье дамбы на уровень фильтрующихся вод. На рис. 4 представлены фотоснимки участков дамбы до и после восстановительных работ.

Как видно из рис. 4, до восстановления полки наблюдались размывы и выходы фильтрующихся вод на склон нижнего бьефа дамбы. Данные выходы фильтрующихся вод носили локальный, сконцентрированный характер. После проведения восстановительных работ выход на поверхность наблюдавшимся ранее потоком был перекрыт. Рассмотрим, как это повлияло на уровень фильтрующихся вод и положение депрессионной кривой на вышележащих участках. На рис. 5 представлены графики изменения уровня воды в пьезометрах, находящихся на вышележащей полке.

Все пьезометры, представленные на рис. 5, расположены на одной полке и, соответственно, на одной высоте.

Видно, что высота столба воды в пьезометре скв 4г сильно отличается от аналогичного показателя в пьезометрах 1пз и 2пз. Такое расхождение объясняется слишком большой глубиной пьезометрической скважины скв 4г – первые десятки метров при глубине фильтрующейся воды порядка 5 м. Однако динамика изменения уровня фильтрующихся вод будет проявляться и в данном пьезометре, но в меньшем масштабе и искаженных значениях.

Как видно из рис. 5, на протяжении первого года после восстановительных работ не наблюдалось какого-либо существенного изменения уровня фильтрующихся вод, что объясняется невысокими противofильтрационными свойствами только что отсыпанных неконсолидированных песков. После отсыпки происходит постепенная консолидация и уплотнение материала, что сопровождается увеличением противofильтрационных свойств восстановленной полки. При этом восстановление полки само по себе практически не влияет на фильтрационные потоки,

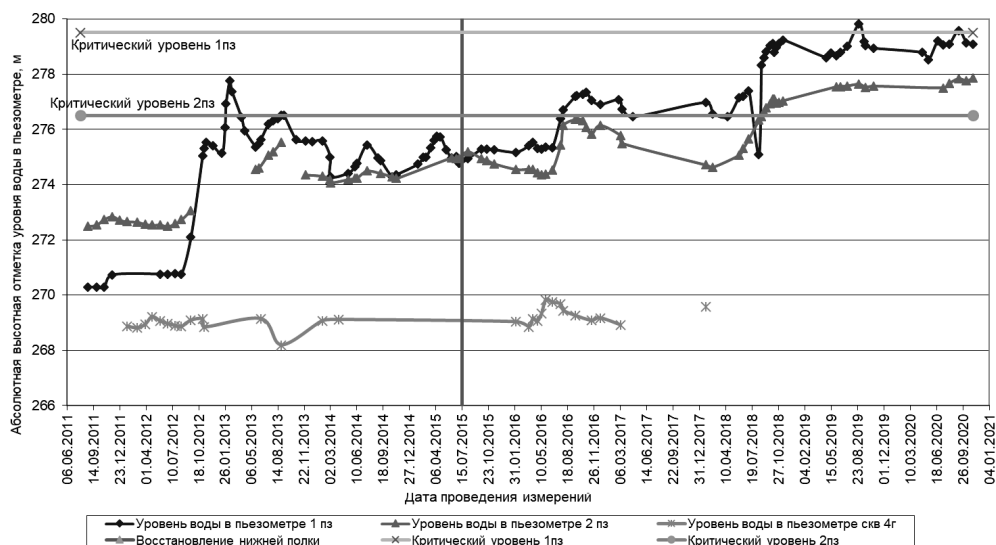


Рис. 5. График изменения уровня воды в пьезометрах

Fig. 5. Curve of water level in piezometers

которые характеризуются положением депрессионной кривой, так как восстановленная полка в сравнении с остальной дамбой обладает схожими или более низкими противofильтрационными свойствами.

Увеличивающиеся противofильтрационные свойства восстановленной полки влияют на фильтрационные процессы, происходящие по локальным нарушениям. Данное влияние развивается постепенно, что подтверждается графиками на рис. 4. Происходящая консолидация материала отсыпки приводит к уменьшению пропускной способности локального нарушения, что ведет к повышению уровня фильтрующихся вод на вышележащих участках, это видно из графиков положения воды в пьезометрах. Так как фильтрационные нарушения приводят не только к перераспределению фильтрующихся вод, но и к суффозионному выносу частиц сооружения, то параллельно консолидации развивается процесс оседания вымытых частиц в области примыкания фильтрационных нарушений к восстановленной полке по механизму «self-made filter» [14]. В результате происходит еще большее снижение пропускной способности по области фильтрационного нарушения, что может быть крайне опасно, так как ведет не только к передаче гидростатического давления к основанию сооружения, но и к изменению положения депрессионной кривой на вышележащих участках, что оказывает непосредственное влияние на устойчивость сооружения.

Оценить влияние, оказываемое на депрессионную кривую, можно, посмотрев на график изменения уровня воды в пьезометрах 1пз и 2пз. Например, видно, что абсолютная отметка высоты столба воды в пьезометре 2пз изменилась от 274 до почти

278 м. При этом на графиках (см. рис. 4) видно, что повышение уровня фильтрационной кривой было достаточно велико, чтобы значения глубины воды в пьезометрах 1пз и 2пз приблизились или превысили проектные критические значения, что свидетельствует о вероятной потере устойчивости сооружения.

Таким образом, видно, что за счет воздействия на процессы работы, происходящие по фильтрационному нарушению по отсыпке элемента насыпного ГТС, оказывают влияние на положение депрессионной кривой, что влияет на устойчивость сооружения.

Заключение

Подводя итог, можно сказать, что в статье было продемонстрировано механизмы влияния локальных фильтрационных нарушений на устойчивость насыпного ГТС через влияние таких нарушений на фильтрационные потоки, характеризующиеся положением депрессионной кривой. Механизмы воздействия нарушений на депрессионную кривую были продемонстрированы на примере дамбы хвостохранилища обогатительной фабрики горнорудного предприятия Мурманской области.

Было продемонстрировано влияние локального нарушения на депрессионную кривую на смежном с ним участке. Так, кривая, полученная по данным визуального и георадарного обследования, обладала большей детализацией и существенно отличалась от депрессионной кривой, полученной по результатам измерений уровня воды в пьезометрах. Было продемонстрировано, что при наличии фильтрационных нарушений депрессионная кривая может быть сильно искажена, что приводит, во-первых, к невозможности ее контроля с помощью классических

методов — пьезометрических скважин. Во-вторых, воздействие фильтрационных нарушений на депрессионную поверхность может привести к потере устойчивости сооружения.

Кроме того, было продемонстрировано, что при отсыпке, восстановлении и укреплении элементов сооружения после постепенной консолидации и кольматации происходит снижение

фильтрационной проницаемости в зоне нарушений. Это приводит к уменьшению «разгрузки» фильтрующихся вод через область фильтрационного нарушения и увеличению водопритока на отдельных участках, что ведет к неконтролируемому повышению депрессионной кривой, и в конечном счете — к нарушению критериев устойчивости и разрушению ГТС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dasher E. D.* Dams are coming down, but not always by choice: the geography of Texas dams, Dam Failures, and Dam Removals // *Texas water journal*, Vol. 11, No. 1, 2020. pp. 89–129
2. *Adamo N., Al-Ansari N., Sissakian V. K., Laue J.* Dam Safety: The question of tailings dams // *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, Vol.11, No.1, 2020, pp. 1–26 (DOI: 10.47260/jesge/1111)
3. *Cambridge M., Shaw D.* Preliminary reflections on the failure of the Brumadinho tailings dam in January 2019 // *Dams Reserv.*, 29 (2019), pp. 113–123 (DOI: 10.1680/jdare.19.00004)
4. *Leopoldino J. D.C., Dos Anjos C. S., Simões D. P., Fernandes L. F. R.* Spatial and temporal analysis of the collapse of the tailings dam in Brumadinho, Brazil // *Revista Agrogeoambiental*. 2020. V. 12, № 3, pp. 47–59 (DOI: 10.18406/2316–1817v12n320201483)
5. *Casagrande P., Parizzi M., Moura A. C. M., Camargos L. M., Zyngier C. M., Barbosa V. S. B., Magalhães D. M., Da Silva G. R.* Dam break and human disaster: Córrego do Feijão, Brumadinho, MG // *ICCSA 2020: Computational Science and Its Applications*. 2020. pp.855–863 (DOI: 10.1007/978–3-030–58820–5_61)
6. *Yerro A., Rohe A., Soga K.*, Modeling internal erosion with the material point method // *Procedia engineering*. 2017. № 175, pp. 365–372 (DOI:10.1016/j.proeng.2017.01.048)
7. *Azam S., Li Q.* Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years // *Geotechnical News*. 2010. p. 50–53.
8. *Ахметов Е. М., Асемов К. М., Жуматаева М. О.* Исследование аварий на гидротехнических сооружениях и методы контроля их безопасности // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2020. Т. 331. № 4. С. 70–83 (DOI: 10.18799/24131830/2020/4/2595)
9. *Мельников Н. Н., Калашник А. И., Калашник Н. А., Запорожец Д. В.* Применение современных методов для комплексных исследований состояния гидротехнических сооружений региона Баренцева моря // *Вестник Мурманского государственного технического университета*. 2017. Т. 20. № 1–1. С. 13–20 (DOI: 10.21443/1560–9278–2017–20–1/1–13–20)
10. *Максимов Д. А.* Индикаторы наличия в теле насыпного гидротехнического сооружения локальных нарушений фильтрационной устойчивости // *Проблемы недропользования*. 2018. № 2 (17). С. 98–105. (DOI: 10.25635/2313–1586.2018.02.098)
11. *Даншкун А. А., Калашник А. И., Запорожец Д. В., Максимов Д. А.* Мониторинг состояния ограждающей дамбы в зоне обработки техногенного месторождения Ковдорского ГОКа // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014. № 7. С. 344–351.

12. *Абрамов Н. Н., Дьяков А. Ю., Калашник А. И.* Идентификация водонасыщенных зон в ограждающем грунтовом гидротехническом сооружении синхронным электромагнитным и сейсмическим зондированием // *Гидротехническое строительство*. 2019. № 2. С. 17 – 21

13. *Максимов Д. А., Дьяков А. Ю.* Комплексование визуального и георадарного метода обследования с применением цифровых технологий в целях мониторинга локальных нарушений фильтрационных процессов в теле насыпного ГТС // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019. № S37. С. 409 – 416. (DOI: 10.25018/0236 – 1493 – 2019 – 11 – 37 – 409 – 416)

14. Internal erosion of exiting dams, levees and dikes, and their foundations. Volume 2: Case histories, investigations, testing, remediation and surveillance // *International commission on large dams. Bulletin*. 2016. №164. p. – 199 **ИЗДА**

REFERENCES

1. Dasher E. D. Dams are coming down, but not always by choice: the geography of Texas dams, Dam Failures, and Dam Removals. *Texas water journal*, Vol. 11, no. 1, 2020. pp. 89 – 129

2. Adamo N., Al-Ansari N., Sissakian V. K., Laue J. Dam Safety: The question of tailings dams. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, Vol.11, no.1, 2020, pp. 1 – 26 (DOI: 10.47260/jesge/1111)

3. Cambridge M., Shaw D. Preliminary reflections on the failure of the Brumadinho tailings dam in January 2019. *Dams Reserv.*, 29 (2019), pp. 113 – 123 (DOI: 10.1680/jdare.19.00004)

4. Leopoldino J. D.C, Dos Anjos C. S., Simões D. P., Fernandes L. F. R. Spatial and temporal analysis of the collapse of the tailings dam in Brumadinho, Brazil. *Revista Agrogeoambiental*. 2020. V. 12, no. 3, pp. 47 – 59 (DOI: 10.18406/2316 – 1817v12n320201483)

5. Casagrande P., Parizzi M., Moura A. C. M., Camargos L. M., Zyngier C. M., Barbosa V. S. B., Magalhães D. M., Da Silva G. R. Dam break and human disaster: Córrego do Feijão, Brumadinho, MG. *ICCSA 2020: Computational Science and Its Applications*. 2020. pp.855 – 863 (DOI: 10.1007/978 – 3-030 – 58820 – 5_61)

6. Yerro A., Rohe A., Soga K., Modeling internal erosion with the material point method. *Procedia engineering*. 2017. no. 175, pp. 365 – 372 (DOI:10.1016/j.proeng.2017.01.048)

7. Azam S., Li Q. Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years. *Geotechnical News*. 2010. p. 50 – 53.

8. Akhmetov E. M., Asemov K. M., Zhumataeva M. O. Research of accidents of hydraulic structures and safety control methods. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2020. no. 3. Vol. 331. Pp. 70 – 83. (DOI: 10.18799/24131830/2020/4/2595) [In Russ]

9. Mel'nikov N. N., Kalashnik A. I., Kalashnik N. A., Zaporozhets D. V. The use of modern methods for complex studies of the hydrotechnical structures of the Barents sea region. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017. no. 1 – 1. Vol. 20. pp. 13 – 20 (DOI: 10.21443/1560 – 9278 – 2017 – 20 – 1/1 – 13 – 20 [In Russ])

10. Maksimov D. A. Indicators of the presence of local disturbances of filtration stability in the body of the embankment hydraulic structure. *Problemy nedropol'zovaniya*. 2018. no. 2 (17). pp. 98 – 105. (DOI: 10.25635/2313 – 1586.2018.02.098)[In Russ]

11. Danilkin A. A., Kalashnik A. I., Zaporozhets D. V., Maksimov D. A. Monitoring of condition of a protecting dam in a zone of working off of a technogenic deposit Kovdorsky GOK. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull*. 2014. no. 7. pp. 344 – 351.[In Russ]

12. Abramov N. N., Dyakov A.Yu., Kalashnik A. I. Identification of water-saturated zones in a protective ground hydraulic engineering facility by synchronous electromagnetic and seismic sounding. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*, 2019. no. 2. pp. 17–21 [In Russ]

13. Maksimov D. A., Dyakov A.Yu. Integration of visual and georadar observation method by using digital technologies to monitor the local disturbances of filtration process in bulk hydraulic facilities. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019. no. S37. pp. 409–416. (DOI: 10.25018/0236–1493–2019–11–37–409–416) [In Russ]

14. Internal erosion of existing dams, levees and dikes, and their foundations. Volume 2: Case histories, investigations, testing, remediation and surveillance. *International commission on large dams. Bulletin.* 2016. no.164. p. 199.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Максимов Дмитрий Анатольевич – научный сотрудник, maximoffda@gmail.com, Горный институт – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Maksimov D. A., Scientific researcher, maximoffda@gmail.com, Mining Institute – Subdivision of the Federal Research Centre «Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences», Apatity, Russia.

Получена редакцией 27.01.2021; получена после рецензии 09.04.2021; принята к печати 10.04.2021.

Received by the editors 27.01.2021; received after the review 09.04.2021; accepted for printing 10.04.2021.

