

Оценка надежности и степени риска возникновения аварий на шламохранилищах 4-го РУ ОАО «Беларуськалий»

Кандидаты техн. наук, доценты П. М. Богославчик¹⁾, Г. Г. Круглов¹⁾, Н. Н. Линкевич¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. На основании теории надежности дано определение надежности дамб обвалования шламохранилищ, приведены характеристики надежности и их анализ. Перечислены показатели качества грунтовых дамб, которые подразделяются на две группы: показатели назначения и показатели конструктивной надежности. Выполнен краткий анализ всех возможных причин возникновения аварий на грунтовых плотинах и дамбах, на основании которого выделены одиннадцать основных объектов диагностирования применительно к дамбам шламохранилищ. Для оценки степени риска возникновения аварий на шламохранилищах ОАО «Беларуськалий» проанализированы все возможные причины аварий и вероятность их появления. Констатируется, что нарушение работы дамб возможно, как правило, при нарушении правил эксплуатации. Выделены основные параметры состояния шламохранилища, которые необходимо контролировать в процессе эксплуатации постоянно. Проанализированы результаты наблюдений за шламохранилищами и расчеты устойчивости откосов дамб для случаев нормальной эксплуатации (основной расчетный случай) и нарушения работы противодиффузионных устройств (особый расчетный случай). Поскольку в особом случае коэффициент запаса устойчивости близок к 1,0, для всех расчетных сечений определено предельное положение кривой депрессии. Рекомендуется постоянный контроль ее положения, и в случае достижения его предельного значения – принятие мер по его снижению. На основании анализа всех факторов приводятся итоговые экспертные оценки вероятности возникновения аварий на исследуемых дамбах шламохранилищ 4-го РУ ОАО «Беларуськалий». Сделан вывод о малой степени риска их разрушения.

Ключевые слова: дамба, откос, прочность, авария, параметры, кривая депрессии, коэффициент запаса, экспертные оценки

Для цитирования: Богославчик, П. М. Оценка надежности и степени риска возникновения аварий на шламохранилищах 4-го РУ ОАО «Беларуськалий» / П. М. Богославчик, Г. Г. Круглов, Н. Н. Линкевич // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 4. С. 292–297

Assessment of Reliability and Risk Degree for Accident Initiation at Slime Storages of 4th Mining Administration, JSC “Belaruskali”

P. M. Bohaslauchyk¹⁾, G. G. Kruglou¹⁾, N. N. Linkevich¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University

Abstract. Definition of reliability for dams of slime storage embankment is given on the basis of reliability theory and characteristics of reliability and their analysis are presented in the paper. The paper specifies qualitative indices for earth dams which are subdivided in two groups: applicability factors and structural reliability factors. A short analysis of all possible causes for accident initiation at earth dams has been made and the analysis has permitted to pinpoint eleven main objects for diagnosis for slime storage dams. In order to assess risk degree of accident initiation at JSC “Belaruskali” slime storages all possible

Адрес для переписки

Богославчик Петр Михайлович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 150,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 267-98-08
fes@bntu.by

Address for correspondence

Bohaslauchyk Petr M.
Belarusian National Technical University
150 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 267-98-08
fes@bntu.by

causes of emergency cases and their probability of occurrence have been analyzed in the paper. The paper acknowledges the fact that dam malfunction is possible, as a rule, due to violation of operational rules and regulations. Main parameters of slime storage state which are to be controlled regularly in the process of its operation have been noted in the paper. Observation results over slime storages, calculations of dam slope stability for normal operation (a principal calculation case) and operating irregularities in water seals (a special calculation case). As a stability margin factor is close to 1.0 for a special calculation case, an extreme position of depression curve has been determined for all design sections. It has been recommended to carry out a constant control over its position, and in the case when it reaches its peak value it is necessary to undertake appropriate measures in order to reduce its value. Final expert estimations on probability of accident initiation at the investigated slime storage dams of the 4th Mining Administration, JSC "Belaruskali" have been prepared on the basis of the analysis comprising all the required factors. A conclusion has been made about low risk degree of their destruction.

Keywords: dam, slope, strength, accident, parameters, depression curve, safety factor, expert estimation

For citation: Bohaslauchyk P. M., Kruglou G. G., Linkevich N. N. (2016) Assessment of Reliability and Risk Degree for Accident Initiation at Slime Storages of 4th Mining Administration, JSC "Belaruskali". *Science & Technique*. 15 (4), 292–297 (in Russian)

Введение

Шламоохранилища силивинитно-обогащительной фабрики (СОФ) 4-го рудоуправления (РУ) включают шламоохранилища северной (53,00 га) и южной (103,65 га) карт, шламорассолопроводы и три насосные станции оборотных рассолов (стационарную и две передвижные). Полезная емкость шламоохранилищ СОФ 4-го РУ создана за счет строительства ограждающих грунтовых дамб, на гребне которых имеется эксплуатационный проезд шириной от 6 до 8 м для проезда автотранспорта в случае возникновения аварийной ситуации. Общая протяженность дамб шламоохранилищ составляет: северная карта – 2,85 км, южная карта – 4,65 км.

Эксплуатационная надежность ограждающих дамб шламоохранилищ

Надежность дамбы обвалования определяется как свойство дамбы сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданную функцию в заданных режимах и условиях эксплуатации, технического обслуживания и ремонта [1]. С позиции теории надежности систем надежность дамбы можно оценить следующими характеристиками: безотказностью, долговечностью, ремонтпригодностью и живучестью [2]. В настоящее время срок службы ограждающих дамб не нормирован, однако его можно принимать, как для плотин 1-го класса, равным 100 годам [3]. Перечисленные характеристики надежности являются основными понятиями математической теории надежности и определяются путем статистической обработки результатов наблюдений.

Об эксплуатационной надежности ограждающей дамбы можно судить, сравнивая фактические значения параметров качества с назначенными по условиям надежности. Параметры или показатели качества грунтовых дамб, характеризующие эксплуатационные требования, можно разделить на две группы: показатели назначения и показатели конструктивной надежности. К показателям назначения грунтовых дамб относятся значения максимального и минимального напоров, геодезические отметки гребня дамбы и отметки гребня противофильтрационного экрана. Грунтовая дамба в целом, ее отдельные элементы и конструкции в процессе эксплуатации должны соответствовать следующим показателям конструктивной надежности: общей и местной прочности, общей и местной устойчивости, общей и местной фильтрационной прочности, трещино-, морозо- и коррозионной стойкости, температурной устойчивости и биостойкости.

В Республике Беларусь за 47 лет эксплуатации дамб шламоохранилищ ОАО «Беларуськалий» не было ни одного отказа. Не известна такая статистика и за рубежом. В связи с отсутствием достаточной статистики отказов ограждающих дамб шламоохранилищ представляют интерес сведения о причинах аварий и повреждений грунтовых плотин, которые по конструкции и характеру работы практически полностью соответствуют дамбам шламоохранилищ. В [4, 5] приводятся данные ряда авторов (Мидлбрук (США), Грунер (Швейцария), Такаси (Япония)), которые обобщили причины аварий 30–40 грунтовых плотин. По сведениям этих авторов, в качестве основных причин аварий плотин были: недостаточная пропускная

способность водосбросных сооружений, что привело к переливу воды через гребень плотин (30–38 %); фильтрационные деформации тела плотин и грунтов основания (33–56 %); оползание и деформации откосов (15 %); волновые воздействия (5 %); землетрясения (6–34 %); прочие (биоповреждения, воздействие льда) (4–5 %). Наиболее полные исследования по выявлению статистики аварий грунтовых плотин выполнены под руководством М. И. Гогоберидзе [6, 7]. На основе анализа аварий получены значения интенсивности аварий λ в зависимости от времени эксплуатации t грунтовых плотин, приведенные в табл. 1.

Как видно из табл. 1, наибольшая интенсивность отказов наблюдается в первые пять лет эксплуатации грунтовых плотин и особенно в первый год, когда проявляются все недостатки изысканий и производства работ. Через 10–15 лет эксплуатации отказы будут возникать на четырех-пяти плотинах из каждой тысячи находящихся в эксплуатации. Затем рост числа отказов придется на период после 50–60 лет эксплуатации, что связано с процессом старения и износа материалов. Кроме того, отмечается повышенная аварийность низких (до 15–20 м) плотин, что является следствием недостаточной тщательности их проектирования, строительства и особенно эксплуатации [8].

Таблица 1

Изменение интенсивности аварий грунтовых плотин в зависимости от времени эксплуатации
Changes in intensity of earth dam accidents according to in-service time

Время эксплуатации, год	До 1	1–3	3–5	5–10	10–20	20–50	50–60
Интенсивность аварии	0,159	0,100	0,026	0,011	0,005	0,004	0,019

На основе анализа конструкций грунтовых плотин и ограждающих дамб, их аварий и повреждений выделены 11 основных объектов диагностирования: верховой откос и его крепление; низовой откос и его крепление; гребень и его крепление; противофильтрационное устройство в теле дамбы; противофильтрационное устройство в основании дамбы; дренажное устройство; ливнеотводящие и дренажные каналы; зона сопряжения с бетонным сооружением; зона сопряжения с основанием; зона влияния

дамбы со стороны шламохранилища; зона влияния дамбы со стороны ограждаемой территории. Каждый объект диагностирования грунтовой дамбы в процессе эксплуатации характеризуется определенной совокупностью параметров и качественных признаков технического состояния. Параметры (деформации, фильтрационный расход и др.) измеряются с помощью соответствующих средств измерений, а качественные признаки (трещины, просадки, выход фильтрационного потока и др.) регистрируются визуально. При оценке состояния дамбы для каждого объекта диагностирования необходимо установить нормативные значения контролируемых параметров, а также дать перечень качественных признаков, характеризующих отклонение от нормального состояния. Непригодность к нормальной эксплуатации определяется путем сравнения с номинальным значением измеряемого параметра, а непригодность к эксплуатации – сравнением с предельным значением параметра.

Оценка степени риска возникновения аварий на шламохранилищах СОФ 4-го РУ ОАО «Беларуськалий»

В связи с отсутствием аварий на шламохранилищах ОАО «Беларуськалий» за все годы их эксплуатации, а также из-за отсутствия методики расчета степени риска разрушения дамб шламохранилищ оценка степени риска возникновения гидродинамической аварии может быть выполнена на основании обследования экспертами шламохранилищ и рассмотрения всех возможных факторов, из-за которых может произойти разрушение дамб шламохранилища. При оценке степени риска разрушения дамб шламохранилища проанализированы все причины, по которым может произойти разрушение, оценена вероятность появления таких ситуаций по каждой из причин и их совокупности. На основании данного анализа установлен интегральный показатель степени риска разрушения ограждающих дамб. При анализе учитывались результаты изучения причин разрушения дамб в республике, а также аналогичные результаты, полученные за рубежом и опубликованные в литературных источниках. При этом принималось во внимание, что существо-

ющие методы расчета плотин и дамб разработаны в основном по результатам изучения причин разрушения таких сооружений.

В общем случае надежность дамб можно установить по группе показателей, определяемых инженерными расчетами, а также по группе показателей, которые невозможно определить расчетным путем и которые оцениваются по аналогии с сооружениями, где наблюдались нарушения их нормальной работы или разрушения. Первой по значимости причиной разрушения дамб является недостаточная прочность грунтов для принятой конструкции дамб. Выполненные расчеты показали, что при расчетных значениях прочностных характеристик грунтов основания общая устойчивость дамб шламохранилищ обеспечивается. Для принятых параметров дамб на таких грунтах основания не было случаев разрушения в результате потери общей устойчивости.

Второй по значимости причиной разрушения дамб является обрушение откосов, которое может произойти при недостаточной прочности грунтов основания и грунтов тела дамб. Проведенные вариантные расчеты устойчивости откосов и связанные с ними фильтрационные расчеты показали, что устойчивость дамб шламохранилищ при принятых значениях параметров их поперечного сечения и проектном режиме эксплуатации обеспечена.

Следующая по значимости причина разрушения дамб – перелив воды через гребень. На дамбах шламохранилища эта причина исключена, так как по режиму эксплуатации быстрое заполнение и переполнение его невозможны. Отсутствие водосборной площади исключает переполнение шламохранилища в результате природных явлений (ливни, сильные снегопады). Конструкция креплений откосов и размеры шламохранилищ (небольшая длина разгона волн) исключают разрушение откосов и как следствие – и самих дамб в результате воздействия волн. Отсутствие в шламохранилищах сплошного ледового покрова в зимний период, а также резкого колебания уровней в это время исключает возможное повреждение откосов по данным причинам.

Анализ причин возможного разрушения дамб шламохранилищ, которые нельзя оценить результатами строгих инженерных расчетов, выполняется по опыту эксплуатации дамб ана-

логичной конструкции. Разрушение возможно из-за разжижения грунтов тела дамбы. Однако в республике не было зафиксировано ни одного случая разрушения дамб и земляных плотин по этой причине. Так как в дамбах шламохранилищ устроен экран и, кроме того, образуется хороший экран из шламов и не происходит насыщения тела дамб водой, вероятность такого разрушения чрезвычайно низкая.

Появление сосредоточенных путей фильтрации в подпорном сооружении может привести к его разрушению. Одной из причин возникновения сосредоточенных путей фильтрации является трещинообразование в теле дамбы в результате неравномерной осадки. Так как дамбы шламохранилищ построены на достаточно прочном основании и осадка их в результате уплотнения грунтов основания незначительная, образование трещин в теле дамб из-за неравномерных осадок исключено. В случае подработки территории под дамбами шламохранилища потребуются дополнительно оценить устойчивость дамб (их возможную осадку и ее неравномерность) и разработать мероприятия по обеспечению их устойчивости.

Сосредоточенные пути фильтрации могут возникнуть в основании дамбы при наличии не обнаруженных в процессе изысканий прослоев хорошо проницаемых грунтов в слабопроницаемых грунтах основания. В таких случаях при создании напора в нижнем бьефе появляются грифоны и вынос грунта фильтрационным потоком. Эти явления, как правило, не приводят к катастрофическим последствиям, так как при своевременном обнаружении можно предусмотреть мероприятия, обеспечивающие устойчивость дамб. Причиной образования сосредоточенных путей фильтрации могут быть ходы землеройных животных. Нормальная эксплуатация дамб и состав содержимого шламохранилищ делают эту причину их разрушения маловероятной. Сосредоточенные пути фильтрации в теле дамб возможны также в результате интенсивного влагопереноса к фронту промерзания и образования ледяных прослоек, которые после оттаивания могут явиться причиной разрушения дамб. Однако низкое положение кривой депрессии в дамбах шламохранилища делает эту причину маловероятной.

В случае расположения шламорассолопроводов на гребне дамб при их разрыве возможен

локальный размыв откоса. Поэтому необходим постоянный контроль состояния шламорасслопопроводов для исключения этой причины.

Разрушения дамб по причинам рассматриваемой группы в большинстве случаев происходили из-за плохой эксплуатации. При квалифицированной эксплуатации своевременное обнаружение любого отклонения от нормальной работы позволяет его устранить. Основными контролируемыми параметрами состояния шламохранилищ СОФ 4-го РУ являются: уровень заполнения шламохранилищ, положение кривой депрессии в теле дамбы (верхняя огибающая фильтрационного потока), отметка гребня ограждающих дамб, состояние верхового и низового откосов дамб. Предельно допустимый подъем кривой депрессии (контроль в пьезометре) в шламохранилищах СОФ 4-го РУ составляет 1,0 м в месяц. Фактически в период наблюдения подъем кривой депрессии был в пределах от 0,1 до 0,4 м. Размывы и промоины верхового и низового откосов дамб шламохранилищ отсутствуют.

За период наблюдения превышения проектных уровней заполнения шламохранилищ СОФ 4-го РУ не наблюдалось. Контрольные наблюдения за состоянием шламохранилищ СОФ 4-го РУ проводились с начала их заполнения и ведутся в настоящее время. Данные анализа замера уровня воды в пьезометрах показали отсутствие резких скачков воды в них за весь период наблюдения. Контрольные замеры отметок поверхностных марок подтверждают соответствие отметок гребня дамб проектным отметкам и отсутствие оседания гребня дамб в настоящее время.

Визуальный осмотр дамб шламохранилища при его заполнении позволяет выявить в начальной стадии участки повышенной фильтрации на низовых откосах дамб. Для снижения кривой депрессии на дамбе производится шламование верхового откоса шламами, что уменьшает фильтрацию. Фильтраций на низовых откосах шламохранилищ СОФ 4-го РУ не наблюдалось. Анализ наблюдений за шламохранилищами подтвердил их эффективность для своевременного обнаружения и устранения нарушений, которые могут вызвать возникновение аварийных ситуаций в дамбах. На основании проектных и фактических поперечных

профилей построенных дамб, а также с учетом инженерно-геологических данных грунтов, слагающих дамбы и их основания, выполнены расчеты устойчивости откосов дамб, которые показали, что и в нормальных, и в особых условиях эксплуатации (при разрушении противofильтрационного экрана) откосы дамб устойчивы [9, 10].

Для реконструируемой дамбы Д4 дополнительно выполнены расчеты устойчивости низового и верхового откосов для случая нормальных условий эксплуатации, когда экран из полиэтиленовой пленки не нарушен, и для особых условий эксплуатации, когда экран поврежден, не выполняет своей функции и не оказывает влияния на положение кривой депрессии в теле ограждающей дамбы. Анализ полученных результатов показывает, что верховой откос дамбы устойчив. Низовой откос дамбы для нормальных условий эксплуатации также устойчив, а значения коэффициентов запаса больше допустимых, которые для 3-го класса равны 1,15. Коэффициент запаса устойчивости низового откоса для особых условий эксплуатации равен 1,00, т. е. критическому значению. Положение кривой депрессии в теле дамбы, соответствующее этому случаю, является предельно допустимым. Если в процессе эксплуатации дамбы уровни грунтовых вод в ней достигнут этого значения, то во избежание опасности обрушения низового откоса необходимо снизить уровень рассола в шламохранилище. Ознакомление с проектом, обследование в натуре дамб шламохранилищ, выполненные расчеты устойчивости, системный анализ возможных причин разрушения дамб аналогичной конструкции свидетельствуют о малой степени риска их разрушения и, как следствие, возникновения гидродинамической аварии.

ВЫВОД

На основании анализа конструкции грунтовых плотин и дамб, условий их работы и имеющих место аварий и повреждений выявлены и систематизированы все возможные причины возникновения аварий в особых условиях эксплуатации, когда экран разрушен и не выполняет своих функций, низовой откос реконструируемой дамбы находится в критическом

состоянии, коэффициент запаса устойчивости равен единице. Для этого случая расчетами определены минимально допустимые уровни грунтовых вод в теле дамбы, а сами уровни в процессе эксплуатации шламохранилища (южная карта) должны постоянно контролироваться. Не следует допускать повышения кривой депрессии до предельно допустимых значений. Итоговые экспертные оценки вероятности возникновения аварий на шламохранилищах 4-го РУ ОАО «Беларуськалий» установлены: северная карта – 0,01 %, южная карта – 0,05 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения: ГОСТ 27.002–89. Введ. 01.07.90. М.: Изд-во стандартов, 1990. 37 с.
2. Голикевич, Т. А. Прикладная теория надежности / Т. А. Голикевич. М.: Высш. шк., 1985. 168 с.
3. Мирцхулава, Ц. Е. Надежность гидромелиоративных сооружений / Ц. Е. Мирцхулава. М.: Колос, 1974. 279 с.
4. Малаханов, В. В. Техническая диагностика грунтовых плотин / В. В. Малаханов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 120 с.
5. Ничипорович, А. А. Плотины из местных материалов / А. А. Ничипорович. М.: Стройиздат, 1973. 320 с.
6. Гогоберидзе, М. И. Научные основы постановки натуральных наблюдений на плотинах / М. И. Гогоберидзе. Тбилиси: Мецниереба, 1980. 70 с.
7. Обобщение данных статистического анализа аварий и инцидентов в аспекте надежности плотин / М. И. Гогоберидзе [и др.] // Сообщения АН Груз. ССР. 1977. Т. 86, № 3. С. 681–684.
8. Schwitter, N. Statistische Sicherheit der Talsperren / N. Schwitter // Wasser, Enerqia, Laft. 1976. Vol. 68, No 5.
9. Исследование устойчивости грунтовых дамб по объекту «Реконструкция карт шламохранилища 4-го РУ с получением дополнительной емкости»: заключ. отчет. Минск, 2005.
10. Исследование устойчивости ограждающих дамб на слабом основании на объекте «Реконструкция карт шламохранилища 4-го РУ с получением дополнительной емкости. II очередь»: заключ. отчет. Минск, 2008.

Поступила 21.12.2015

Подписана в печать 22.02.2016

Опубликована онлайн 28.07.2016

REFERENCES

1. State Standard 27.002–89. Industrial Product Dependability. Basic Concepts. Terms and Definitions. Moscow, Publishing House of Standards, 1990. 37 (in Russian).
2. Golinkevich T. A. (1985) *Applied Reliability Theory*. Moscow, Vysshaya Shkola. 168 (in Russian).
3. Mirtskhulava Ts. E. (1974) *Reliability of Hydro-Reclamation Facilities*. Moscow, Kolos. 279 (in Russian).
4. Malakhanov V. V. (1990) *Technical Diagnostics of Earth Dams*. Moscow, Energoatomizdat. 120 (in Russian).
5. Nichiporovich A. A. (1973) *Dams Built on the Basis of Local Materials*. Moscow, Stroyizdat. 320 (in Russian).
6. Gogoberidze M. I. (1980) *Scientific Basis for Field Studies of Dams*. Tbilisi: Publishing House "Metsniereba". 70 (in Russian).
7. Gogoberidze M. I., Kakauridze R. G., Mikashvili Iu. N., Mirtskhulava D. Ts. (1977) *Compilation of Analysis Data on Breakdowns and Malfunctions in Respect of Dam Reliability. Soobshcheniia Akademii Nauk Gruzinskoi SSR* [Report of Academy of Sciences of Georgian Soviet Socialist Republic], 86 (3), 681–684 (in Russian).
8. Schwitter N. (1976) *Statistische Sicherheit der Talsperren. Wasser, Enerqia, Laft*, 68 (5).
9. Investigations on Sustainability of Earth Dams for the Following Object: "Reconstruction of Charts for 4 PY-Sludge Depository with Obtaining Additional Capacity": Final Report. Minsk, 2005.
10. Investigations on Sustainability of Embankments on Weak Foundation for the Following Object: "Reconstruction of Charts for 4 PY-Sludge Depository with Obtaining Additional Capacity. 2nd Stage": Final Report. Minsk, 2008.

Received: 21.12.2015

Accepted: 22.02.2016

Published online: 28.07.2016