

Ремонт дренажных систем грунтовых плотин

Д.А. Крутов

Казахстанско-Немецкий университет; 050010, г. Алматы, Казахстан, ул. Пушкина, д. 111

АННОТАЦИЯ

Введение: при реконструкции и капитальном ремонте плотин большое внимание следует уделять дренажным системам, как наиболее ответственным частям сооружения. Описаны нарушения в работе трубчатых дренажей грунтовых плотин. Рассмотрены геологические и гидрогеологические особенности, не учтенные при разработке проектов.

Материалы и методы: в качестве методов исследований фильтрационного режима используется контрольно-измерительная аппаратура (пьезометрическая сеть), натурные эксперименты по выводу трубчатого дренажа из строя и математическое моделирование.

Результаты: анализ гидрогеологических особенностей основания правобережной пойменной плотины Нижегородской ГЭС и натурных фильтрационных наблюдений выявил на ряде участков сильное дренирующее влияние основания на фильтрационный поток в теле плотины. На других участках зафиксировано высокое положение уровня грунтовых вод в нижнем бьефе плотины и их разгрузка в трубчатый дренаж со стороны нижнего бьефа. Обоснованное фильтрационными расчетами предложение по ремонту дренажной системы состояло в проектировании открытой дрены вдоль оси плотины и подсыпки территории в нижнем бьефе на 2,0 м, что исключает подтопление территории без работы трубчатого дренажа.

Выводы: в качестве вариантов ремонта дренажных систем грунтовых плотин рекомендованы следующие технические решения: устройство засыпных дренажных траншей в нижнем бьефе плотины или строительство нового трубчатого дренажа на более высоких отметках или открытого дренажного канала в монолитном железобетоне, устроенного вдоль оси плотины. Предложенный вариант ремонта трубчатых дренажей предусматривает строительство открытого дренажного канала в монолитном железобетоне на обратном фильтре с устройством в откосах и дне асбестоцементных труб, заполненных гравийным грунтом. Такое конструктивное решение позволяет выполнить ремонт дренажной системы без водопонижения и при необходимости отказаться от существующего трубчатого дренажа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: капитальный ремонт, ремонт трубчатого дренажа, выход из строя дренажных систем, просадка грунта, суффозионные процессы, фильтрационная прочность грунта, пьезометры

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Крутов Д.А. Ремонт дренажных систем грунтовых плотин // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 7. С. 901–911. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.7.901-911

Repairing earth dam drainage systems

Denis A. Krutov

German-Kazakh University; 111 Pushkin st., Almaty, 050010, Kazakhstan

ABSTRACT

Introduction: when reconstructing or overhauling dams, great attention should be paid to drainage systems as the most critical components of the installations. The article describes the typical malfunctions of earth dam pipe drainages. The research considers geological and hydrogeological features that were not taken into account when developing projects.

Materials and methods: control and measuring instrumentation (piezometer network), full-scale experiments on disabling pipe drainage and mathematical modelling were used as the filtration regime research methods.

Results: analysis of the hydrogeological features of the base of the right-bank floodplain dam of the Nizhegorodskaya hydroelectric power plant and field filtration observations revealed a strong drainage effect of the base on the filtration flow at several areas of the dam body. At the other areas, a high groundwater level position at the dam downstream and its outlet into the pipe drainage at the downstream were recorded. Substantiated by filtration calculations, the proposed repair of the drainage system consisted in designing open drainage along the dam axis and backfilling the territory at the downstream by 2.0 m that excludes impoundment of the territory without the pipe drainage.

Conclusions: the following engineering solutions can be recommended for repairing earth dam drainage systems: construction of backfill drainage trenches in the dam downstream, new pipe drainage at higher elevations or an open drainage channel in solid reinforced concrete arranged along the axis of the dam. The proposed version of the pipe drainage repair provides for constructing an open drainage channel in solid reinforced concrete on a reverse filter with an arrangement of gravel-filled asbestos-cement pipes in the dam slopes and bottom. Such a design solution allows repairing the drainage system without dewatering and, if necessary, completely refusing the existing pipe drainage.

KEYWORDS: overhaul, pipe drainage repair, drainage system failure, land subsidence, suffusion processes, soil filtration strength, piezometers

FOR CITATION: Krutov D.A. Repairing earth dam drainage systems. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14(7):901-911. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.7.901-911

ВВЕДЕНИЕ

Учитывая, что средний возраст большой плотины составляет более 40 лет по данным Всемирной комиссии по плотинам [1], не случайно, что и в России, и за рубежом, проводятся масштабные работы по капитальному ремонту гидротехнических сооружений. В работах [1, 2] приводятся сведения, подтверждающие возраст гидроузлов, эксплуатирующихся в настоящий момент в некоторых государствах Центральной Азии. Так, пик строительства плотин, например, в Казахстане пришелся на период 60–80-х гг. прошлого века. А общее число казахстанских плотин, построенных до 1980 г., т.е. эксплуатирующихся более 40 лет, составляет не менее 65 % от общего числа плотин [1].

В руководстве¹ приведена статистика о возрасте больших плотин, построенных в Индии, которая очень схожа с уже упомянутыми данными [1, 2]. Так, из 5,702 больших индийских плотин более 45 % было возведено в период 70–80-х гг. XX в.

По состоянию на апрель 2019 г. 198 индийских плотин реконструируются. Это число составляет 4 % от всех больших плотин Индии. Планы правительства Индии предусматривают охватить капитальным ремонтом 687 плотин в 18-ти индийских штатах, что составит 7 % от общего числа плотин в стране².

Ремонт грунтовых плотин предусматривает наращивание гребня и его обустройство, устранение дефектов креплений верхних откосов, увеличение сейсмостойчивости, строительство дополнительных водосбросных сооружений, противофильтрационные мероприятия и реконструкцию дренажей [1].

При комплексном ремонте грунтовых плотин большое внимание следует уделять дренажам, которые, являясь ответственной частью сооружения, зачастую выходят из строя. Данный вывод под-

тверждается и практикой эксплуатации, например, Нижегородской ГЭС (Россия) и плотины Бугунь (Казахстан). Сведения о непроектном состоянии дренажей этих плотин будут приведены ниже, им и посвящена настоящая статья. Например, в статьях [3, 4] указывается, что при непринятии мер по капитальному ремонту дренажей грунтовых плотин возможно развитие суффозионных процессов, способных привести к снижению надежности и безопасности грунтовых плотин в целом.

Комплексный подход в осуществлении проекта капитального ремонта дренажа грунтовой плотины должен включать следующие этапы:

- детальное визуальное обследование сооружения (по данным [5–7] роль визуальных наблюдений не снижается и при наличии контрольно-измерительной аппаратуры, поскольку ряд признаков непроектного состояния, таких как, например, проявление выходов фильтрации могут быть обнаружены только при обследовании);
- инженерно-геологические изыскания [8–10], включающие испытания грунтов обратного фильтра, а также количественную оценку фильтрационных свойств грунтов тела и основания плотины после длительной эксплуатации (например, по данным [10] установлено, что за период длительной эксплуатации целостность противофильтрационных устройств может претерпеть значительные изменения);
- анализ данных натуральных наблюдений за фильтрационными процессами, включающий наблюдения за пьезометрическими уровнями, дренажными расходами, формой, направлением, температурой и химическим составом потока и при необходимости дооснащение контрольно-измерительной аппаратурой³ [11];
- определение параметров фильтрационного потока на фильтрационной модели, которая должна быть подвергнута калибровке по данным натуральных

¹ Manual for rehabilitation of large dams. Government of India. Central Water Commission. Central Dam Safety Organization. January 2018. P. 290.

² Dam rehabilitation and improvement project. Information Bulletin № 10. Government of India. Ministry of water resources. April 2019. P. 32.

³ Technical specifications of hydrometeorological, geodetic, geotechnical and seismic instruments for dams. Government of India. Central Water Commission. Central Dam Safety Organization. January 2018. P. 52.

пьезометрических наблюдений и измерений фильтрационных расходов [12];

- оценка вариантов технических решений при реконструкции дренажных систем на фильтрационной модели.

Причинами неудовлетворительного состояния дренажных систем являются нарушения технологии производства работ по засыпке обратных фильтров, отклонения от проекта или ошибки проектирования.

При обследовании низовых откосов грунтовых плотин, находящихся в неисправном состоянии, их нижнего бьефа и прилегающей территории можно отметить следующие характерные нарушения:

- суффозионные пятна, оползни и промоины на низовом откосе;
- выходы фильтрации на низовой откос и территорию нижнего бьефа;
- разрушение бетона смотровых колодцев, заиление колодцев и заполнение их грунтом;
- заиливание устьев коллекторных выводов дренажа или отводящих канав;
- зарастание густой растительностью отводящих канав;
- расположение кривой депрессии выше дренажных труб;
- частичное покрытие поверхности земли нижнего бьефа и прилегающей территории белым налетом, что является показателем высокого стояния грунтовых вод (в регионах Центральной Азии).

Наибольший интерес представляют конструктивные решения по устранению вышеописанных нарушений. Например, в публикациях [13, 14] описаны реабилитационные мероприятия на каменно-земляной плотине Массингир в Мозамбике. Плотина Массингир — каменно-земляная, максимальной высотой 46 м с глинистым ядром и плоским горизонтальным дренажем. С самого начала эксплуатации в 1977 г. на плотине наблюдались заболачивание территории нижнего бьефа и суффозионные процессы в основании плотины.

В качестве вариантов конструктивных решений рассматривались устройство экрана со стороны верхнего бьефа или диафрагмы в верхнем бьефе у основания плотины [15, 16]. По мнению авторов проекта, данные мероприятия трудновыполнимы по соображениям сложности организации производства работ и от них отказались. Хотя в трудах [17–19] приводятся примеры успешного осуществления мероприятий по устройству экрана со стороны верхнего бьефа в виде водонепроницаемой геомембраны. Эти мероприятия осуществлялись на плотине Тайлингс в Перу и водохранилище Астуриас в Испании без опорожнения водохранилища. Данная геомембрана погружалась под воду, что стало возможным благодаря особым свойствам геомем-

браны, обладающей высокими плотностными свойствами, не допускающими образования складок при погружении ее под воду. При этом обеспечивается адгезия к мокрой поверхности любых строительных материалов.

Окончательное решение на плотине Массингир было реализовано в виде обратного фильтра, защищающего основание со стороны нижнего бьефа, трубчатого дренажа в основании плотины, соединенного с существующими вертикальными разгрузочными скважинами и подсыпки территории нижнего бьефа.

На однородной грунтовой плотине с плоским горизонтальным дренажем в сочетании с вертикальной дренажной лентой, образующей водохранилище Аккампалы (Индия), при высоких уровнях воды в водохранилище наблюдались выходы воды на низовой откос [20]. Причиной аварийного состояния плотины признали непроектное функционирование вертикальной дренажной ленты. Пригрузки низового откоса плотины с расширением существующих берм оказалось достаточным для реабилитации плотины Аккампалы.

Расположение кривой депрессии выше дренажных труб и зарастание густой растительностью отводящих канав наблюдается на плотине Бугунь (Казахстан). В этой однородной плотине из суглинистых грунтов устроен трубчатый дренаж с обратным фильтром. Профильтровываемая вода из дренажа по трубам отводится в систему, состоящую из восьми открытых коллекторов, а затем в старое русло р. Бугунь, т.е. сбрасывается в нижний бьеф без дальнейшего организованного отвода (рис. 1).

Заросшие и имеющие обратный уклон коллекторы в свою очередь подтапливают трубчатый дренаж. Дальнейший отвод фильтрационной воды по коллекторам, расположенным перпендикулярно оси плотины, невозможен из-за сложности обеспечения командования уклонами.

Описанные выше конструктивные решения не подходят для устранения подтопления трубчатого дренажа. Ремонт дренажной системы плотины Бугунь предлагается осуществить за счет устройства открытого дренажного канала, который следует расположить параллельно оси плотины. Такой канал перехватывал бы воду из коллекторов и сбрасывал дренажные воды в отводящий канал водосброса-водовыпуска (рис. 2). При этом существующий трубчатый дренаж целесообразно сохранить.

Именно такой принцип был использован при ремонте дренажной системы пойменной плотины Нижегородской ГЭС. Ниже описываются нарушения в работе дренажа пойменной намывной плотины Нижегородской ГЭС и конструктивные решения по его ремонту. Примененные конструктивные ре-



Рис. 1. Вид на территорию нижнего бьефа плотины Бугунь (Казахстан)

Fig. 1. View of Bugun dam (Kazakhstan) downstream territory

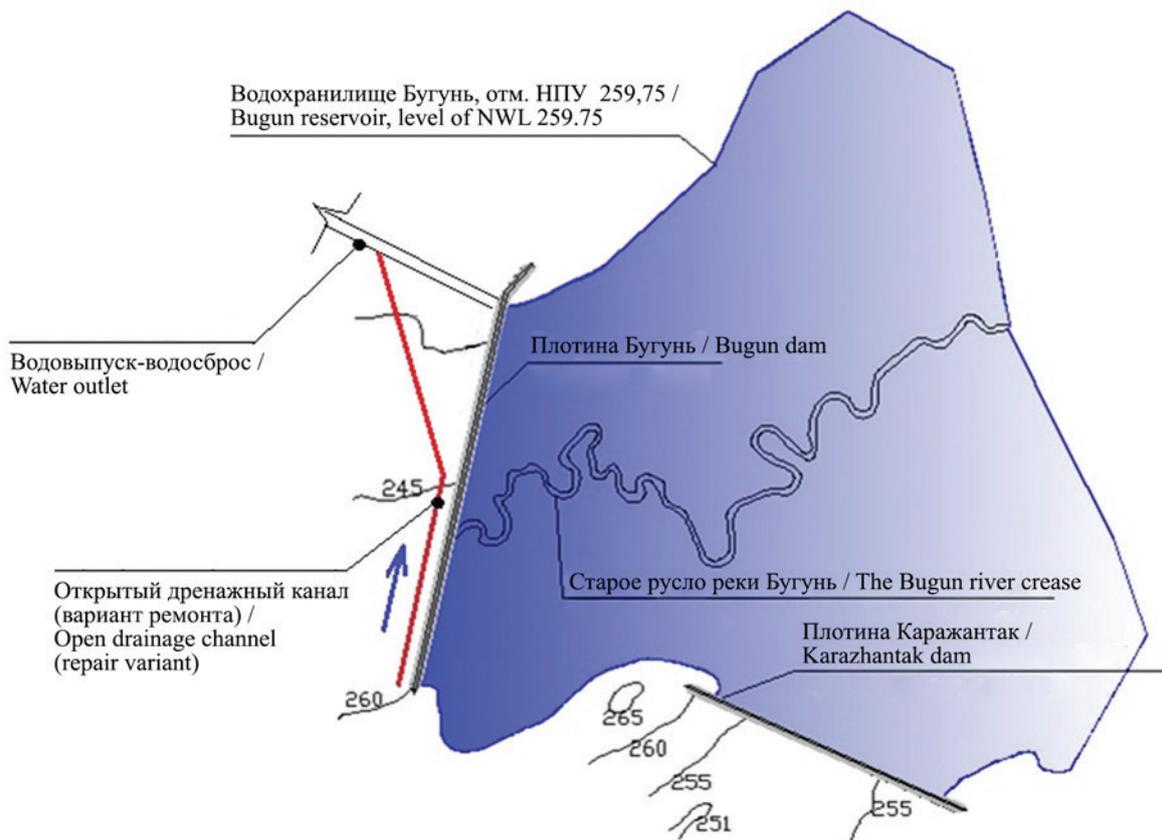


Рис. 2. Схема Бугуньского гидроузла

Fig. 2. Bugun hydrosystem diagram

шения, обоснованные фильтрационными расчетами и данными натурных наблюдений, можно назвать инновационными, поскольку ремонт не затрагивается действующий трубчатый дренаж. Также при производстве работ не потребуется организация водопонижения, что существенно снижает затраты.

Нижегородская ГЭС построена в 1948–1956 гг. и принята в постоянную эксплуатацию в 1962 г. В состав гидротехнических сооружений Нижегородской ГЭС входят (рис. 3):

- русловые грунтовые плотины;
- бетонные русловые сооружения (водосливная плотина, здание ГЭС и монтажная площадка);
- левобережная пойменная плотина;
- правобережная пойменная плотина;
- магистральный канал.

Находящаяся в неисправном состоянии правобережная пойменная земляная плотина (длиной 7575 м, шириной по гребню 12 м, максимальной

высотой 15,5 м) располагается в пределах первой надпойменной террасы, имеющей незначительный уклон к руслу р. Волги.

Дренажная система плотины представлена трубчатым дренажем, уложенным в подошве низового откоса по всей длине плотины, а также открытой дренажной в виде магистрального канала. Трубчатый дренаж выполнен из звеньев железобетонных труб длиной 1,15 м и диаметром 0,5...0,75 м, вокруг которых отсыпан двухслойный обратный фильтр. Первый слой обратного фильтра толщиной 0,25 м выполнен из крупнозернистого песка, второй толщиной 0,15 м — из мелкого гравия. Для контроля состояния трубчатого дренажа через каждые 50 м смонтированы 154 смотровых колодца \varnothing 800 мм с шестью водовыпусками в магистральный канал. Для отвода ливневых и талых вод вдоль подошвы плотины устроен кювет с выпусками из него также в магистральный канал (рис. 4).

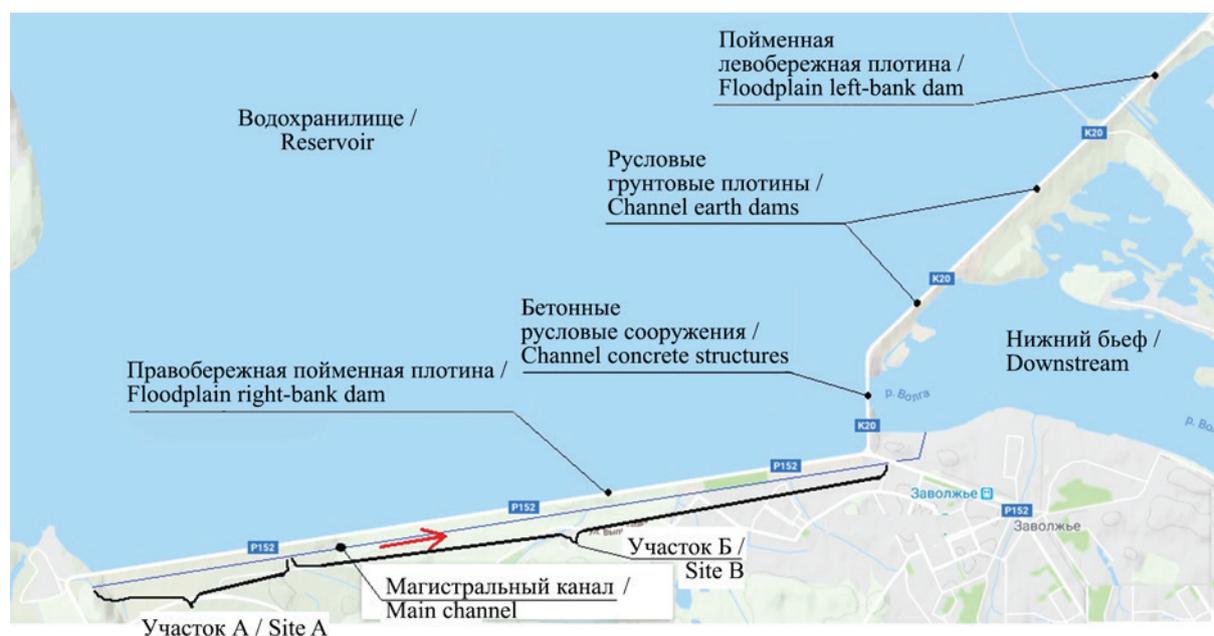


Рис. 3. Схема расположения гидротехнических сооружений Нижегородской ГЭС

Fig. 3. Nizhagorodskaya HPP hydraulic structure arrangement diagram

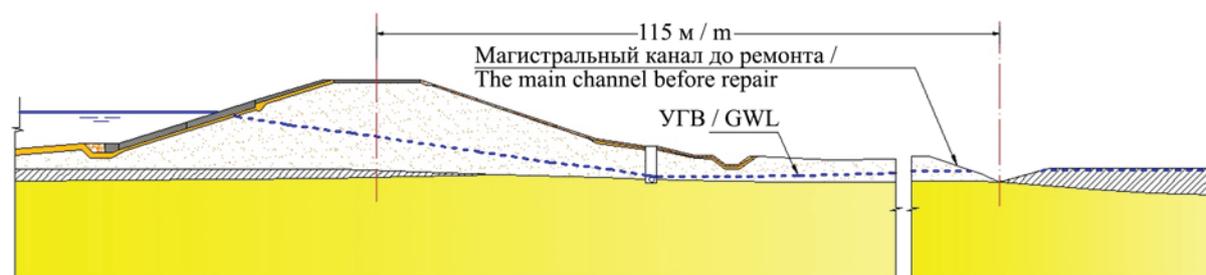


Рис. 4. Поперечный разрез по плотине и ее дренажной системе

Fig. 4. Lateral cross-section of dam and its drainage system

Роль магистрального канала, расположенного параллельно оси сооружения в 115 м от нее, заключается в отводе воды из водовыпусков трубчатого дренажа и разгрузке грунтового потока в Волгу. Кроме того, канал является сооружением осушительной системы территории поселков, расположенных на правом берегу. Канал переменной глубиной длиной 8100 м имеет средний уклон дна 0,0003...0,0007. Заложение откосов с фильтрующей подсыпкой 1:2,75.

Тело пойменной плотины намыто из мелкозернистого песка с коэффициентами фильтрации 0,1...3,0 м/сут, что в 10 раз меньше определенного в лабораторных условиях в период строительства. Коэффициент фильтрации основания на порядок выше грунта тела плотины и соответственно составляет 10...30 м/сут.

В плотине имеются 158 исправных пьезометра, 58 реперов и 10 закрепленных мест для определения фильтрационных расходов.

Колебания пьезометрических уровней в меньшей степени определяются колебаниями уровня верхнего бьефа и в большей — влиянием грунтового потока. Положение депрессионной кривой значительно ниже критериального.

С первых лет эксплуатации на плотине отмечались нарушения условий нормальной эксплуатации, связанные с состоянием дренажа: возникновение и развитие просадочных воронок глубиной до 1,0 м по обе стороны от оси дренажа, а также вынос песка в трубы. Эти суффозионные процессы особенно интенсивно проявляются на участке А (рис. 3), где кривая депрессии расположена выше дренажной трубы (рис. 4). Ремонты участка дренажа с наибольшим выносом песка, при которых основное внимание уделялось подбору обратных фильтров и заделке стыков труб, оказались неэффективными. После засыпки всех просадок и прочистки колодцев вынос песка и просадки грунта над дренажем продолжались.

На участке В (рис. 3) ежегодно на левобережном откосе магистрального канала в марте – апреле отмечаются выходы воды на откос с большим содержанием песка. Это явление сопровождается локальным оплыванием и обрушением откоса канала (в том числе из-за отсутствия укрепления магистрального канала). Вынос суффозионно неустойчивых частиц песка из основания на некоторых участках приводит к заилению канала и появлению участков с обратным уклоном.

Наблюдения за количеством вынесенного в трубчатый дренаж песка ведутся во время осмотров колодцев. По данным службы эксплуатации Нижегородской ГЭС изменения максимального слоя осадка на участке А в течение года находятся в пределах 100...400 см; наибольшая суффозия грунта

с интенсивностью образования осадка 2,2 см/сут отмечена во второй половине июля, августе и октябре.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки фильтрационной прочности грунтов основания и тела плотины в качестве основного контролируемого параметра принимался градиент напора (средний и местный).

Фильтрационная прочность или суффозионная устойчивость — это способность обводненных грунтов сохранять собственную структуру и сопротивляться деформациям, вызванным воздействием фильтрационного потока.

Действующие средние градиенты напора (определяющие общую фильтрационную прочность грунта) в теле плотины по всем 14 контрольным створам постоянны во времени и находятся в пределах 0,02...0,19. Эти значения ниже предельно допустимого (критического) значения для мелко- и среднерезнистых песков ($I_{cr} = 0,6...0,8$). Градиент напора в основании постоянен весь наблюдаемый период и имеет максимальное значение 0,08, что ниже допустимого значения ($I_{cr} = 0,26...0,34$).

Значения критического среднего градиента I_{cr} зависят от физико-механических свойств грунта, места и способа его укладки, причем большие значения I_{cr} назначают для более плотного грунта.

Величина выходного градиента напора в дренаж (местный градиент напора) устанавливалась по показаниям ближайших к ним пьезометров и уровням воды в дренажных колодцах. Градиенты напора в основании на входе в трубчатый дренаж разнообразны и имеют максимальное значение на участке А ($I_{вых} = 0,3...0,4$). При этом критериальные значения ($K1$ и $K2$) градиентов напора в области дренажа назначены в следующих пределах: $K1 = 0,35$; $K2 = 0,4$. Для их установления по зависимости А.Н. Патрашева рассчитывался критический градиент напора I_{cr} , при котором могут выноситься суффозионные частицы d_{ci} из толщи грунта, начиная от диаметра d_{ci}^{max} и меньше.

$$I_{cr} = \varphi_0 d_{ci} \sqrt{\frac{ng}{vk_f}}, \quad (1)$$

где φ_0 — коэффициент критической скорости; v — коэффициент кинематической вязкости воды; k_f — коэффициент фильтрации грунта; n — пористость грунта; g — ускорение силы тяжести.

Вынос фильтрационным потоком максимального размера частиц d_{ci}^{max} из грунта как тела плотины, так и основания составляет не более 5 %.

Причина неудовлетворительной работы дренажа заключается в геологических и гидрогеологических особенностях, не учтенных в проекте. Особен-

ностью геологических условий является то, что при подготовке основания к намыву тела плотины на ряде участков ниже подошвы плотины были оставлены прослойки суглинка. При этом трубчатый дренаж устроен практически на одной отметке по длине плотины, что определяет характер разгрузки потока и условия фильтрационной прочности. На участке В без прослоек суглинка основание оказывает сильное дренирующее влияние на фильтрационный поток в теле плотины. Поэтому вода на этом участке в дренажную трубу не попадает и дренаж оказывается сухим. При этом часть фильтрационного потока высачивается на откос магистрального канала, вызывая обрушение берега.

Особенностью гидрогеологических условий на участке А является высокое положение уровня грунтовых вод в нижнем бьефе плотины и их разгрузка в трубчатый дренаж со стороны нижнего бьефа (рис. 4), что вызывает суффозионные процессы. Сформировались два самостоятельных, но гидравлически связанных потока. Поток в теле плотины направлен от верхнего бьефа к трубчатому дренажу, поток в основании направлен противоположно — от коренного склона к низовому откосу плотины и р. Волге. Поскольку воронки оседания расположены как со стороны верхнего, так и нижнего бьефов от оси дренажа, можно заключить, что суффозионный вынос происходит не только (или не столько) из материала тела плотины, но и из материала основания, слагающего его верхнюю часть.

Существующий магистральный канал на участке А выполнен не по проекту, фактические отметки дна выше проектных от 0,3 до 1,5 м.

Для уточнения причины выноса песка в дренаж, обоснования возможности отказа от трубчатого дренажа на участке А и выбора соответствующих технических решений по предложению ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева и Института Гидропроект в апреле 2012 г. проведен эксперимент. А именно: полностью перекрыта дренажная труба с помощью установленного деревянного щита на выходной трубе из колодца в средней части участка А. Таким образом, отвод воды из дренажа на участке А в магистральный канал по водовыпуску из колодца был исключен.

На 03.05.2012 уровень грунтовых вод по данным пьезометров, расположенных на рассматриваемом участке, не доходил до поверхности 0,25...0,5 м. При средней скорости подъема 0,03 м в сутки вода достигла бы поверхности за 10...15 дней.

На 04.05.2012 было принято решение о недопущении дальнейшего подъема депрессионной кривой и 05.05.2012 деревянный щит, перекрывающий входную трубу, частично приподнят. Уровень воды в колодце понизился на 0,3 м. Однако частичное поднятие щита не привело к стабилизации и уров-

ни воды в колодцах и пьезометрах начали медленно подниматься.

На 12.05.2012 деревянный щит, перекрывающий выходную трубу из колодца, полностью поднят, и началось понижение депрессионной кривой.

Результаты эксперимента показали, что отказ от трубчатого дренажа на рассматриваемом участке недопустим без дополнительных мероприятий, так как приведет к затоплению территории между дренажем и магистральным каналом. Но и дальнейшая эксплуатация дренажа в его настоящем состоянии была недопустима.

В качестве технических решений ремонта дренажа в гидротехническом отделе Института Гидропроект были рассмотрены варианты:

- устройство насыпных дренажных траншей между плотиной и магистральным каналом на участке А;
- строительство нового трубчатого дренажа на более высоких отметках на участке А.

Фильтрационные исследования на объемной математической модели для выбора оптимального решения по реконструкции дренажной системы были выполнены в отделе инженерных изысканий Института Гидропроект инженером О.К. Мархилевичем.

Процесс фильтрации воды описывался уравнением

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_i \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) + q_s = 0, \quad (2)$$

где x_i — декартовы координаты модельного пространства, $i = 1, 2$; q_s — удельные расходы источников – стоков; K_i — главная компонента тензора коэффициента фильтрации; $h = p/\gamma_w + z$ — фильтрационный напор; p — давление; γ_w — объемный вес воды; z — расстояние по вертикали от выбранной плоскости сравнения.

Решение (2) проводилось численно с помощью программы Modflow на основе метода конечных разностей. Основным критерием данной модели являлась натурная сходимость расчетных уровней подземных вод, расхода потоков в расчетной области, условий формирования и общего направления движения подземных вод с существующими измерениями по пьезометрической наблюдательной сети.

При оценке эффекта устройства дренажных траншей рассматривались траншеи глубиной 1,5; 2 и 3 м, засыпанные песчано-гравийным грунтом с коэффициентом фильтрации 10 м/сут. Такие траншеи становятся зонами с повышенным коэффициентом фильтрации. Фильтрационные расчеты показали, что влияние дренажных траншей (даже при увеличении их глубины до 2...3 м) на уровни подземных вод очень незначительно (0,05...0,2 м).

При рассмотрении варианта строительства нового трубчатого дренажа взамен существующего предполагалось, что новый трубчатый дренаж можно проложить на расстоянии 4 м от существующего дренажа. Без работ по водопонижению новый дренаж должен находиться на глубине 1,5 м, так как минимальная глубина залегания уровней подземных вод по трассе существующего дренажа составляла 1,7...1,8 м.

При таких параметрах новый трубчатый дренаж окажется малоэффективен: прогнозные глубины залегания уровней подземных вод в полосе шириной 25 м от плотины составили 0,1...0,5 м, что требовало подсыпки территории нижнего бьефа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Окончательное, обоснованное фильтрационными расчетами предложение по ремонту дренажной системы на участке А состояло в следующем:

- углубление магистрального канала и его перенос в сторону плотины на 25,0 м;
- подсыпка территории между новым магистральным каналом и плотиной на 2,0 м, что исключает подтопление территории без работы трубчатого дренажа.

При моделировании отключения существующего дренажа на участке А при наиболее высоких уровнях верхнего и нижнего бьефов градиенты потока составили 0,05–0,055 при допустимых для мелкозернистого песка 0,26.

На участке А полностью реконструировалась дренажная система (первый этап ремонтных работ), на участке В реконструировался только магистральный канал (второй этап ремонтных работ).

Реконструируемый магистральный канал соединяется с существующим магистральным каналом посредством металлической трубы. Для этого в соответствии с проектом организации строительства до начала работ предусматривалась разработка котлована без водопонижения под защитой двух параллельных шпунтовых стен. В котлован на проектные отметки в воду укладывается металлическая труба Ø1 м. Котлован засыпается грунтом. Шпунтовая стенка разбирается. В проектируемом канале на стальной трубе устраивается входной оголовок. После окончания работ по второму этапу на стальной трубе делается бетонная заглушка.

Конструкция магистрального канала предложена в виде крепления откосов в монолитном железобетоне толщиной 20 см с одинарным армированием арматурой класса АIII Ø16 с шагом 400 мм. Такое решение принято по соображениям наименьших эксплуатационных затрат. Канал будет меньше зарастать водной растительностью и легче очищаться при заилинии. Под монолитным креплением устраивается двухслойная фильтрационная подготовка из песчаного грунта толщиной 0,6 м (1-й слой фильтра) и песчано-гравийного грунта (2-й слой фильтра) толщиной 0,2 м.

Ширина магистрального канала по дну 2 м, заложение откосов 1:2,5. По длине монолитного крепления через 20 м устраиваются температурные швы шириной 2,2 см. Температурный шов по всей длине перекрывается шпонкой ТХЗ-1, расположенной на глубине 5 см от поверхности. Под шпонкой располагается антисептированная доска 22 мм. Над шпонкой температурный шов заполняется мастикой «Брит» марки БП-Г35.

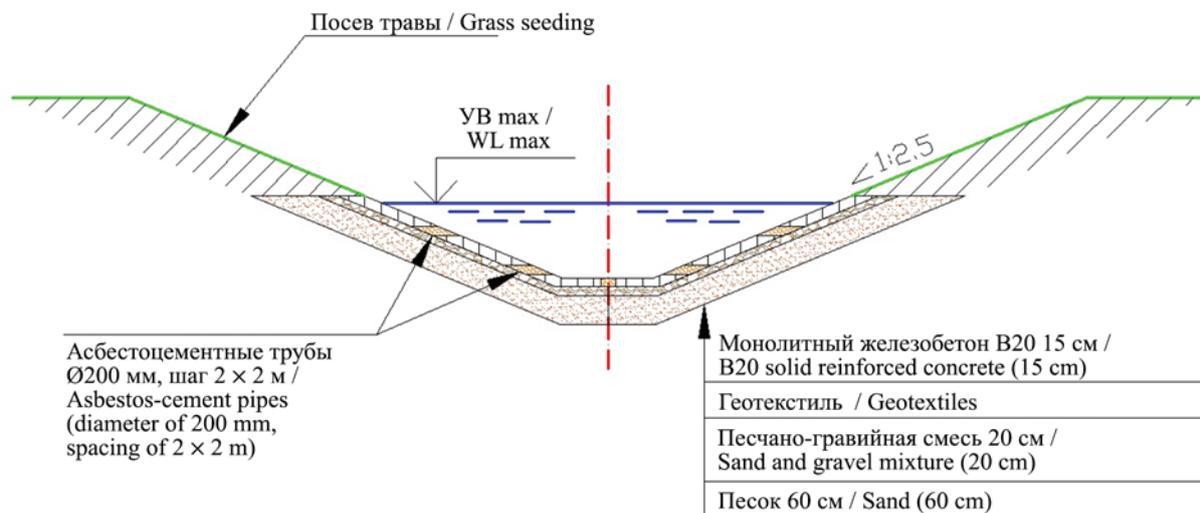


Рис. 5. Поперечное сечение открытого дренажного канала
 Fig. 5. Lateral cross-section of open drainage channel

В откосах и дне магистрального канала в пределах монолитного железобетонного крепления для выпуска дренажной воды установлены асбестоцементные трубы $\varnothing 200$ мм, шагом 2×2 м, заполненные гравийным грунтом 5...20 мм с пористостью $n = 0,35$. Крепление откосов бетоном ограничено на уровне выхода грунтовых вод. Далее крепление выполнено посевом травы по почвенному грунту (рис. 5).

Оценка пропускной способности дренажных отверстий производилась по формуле

$$Q = \mu S \sqrt{2gH}, \quad (3)$$

где коэффициент расхода $\mu = 0,60$; H — действующий напор; g — ускорение силы тяжести; S — площадь, через которую разгружается фильтрационный поток

$$S = \pi r^2 n. \quad (4)$$

Гидравлический расчет расходов воды в магистральном канале проведен по формулам, применяемым при равномерном движении в открытых руслах.

Принятый уклон канала обеспечивает среднюю скорость воды в пределах:

$$V_s \leq V_m \leq V_{np}, \quad (5)$$

где V_s — допускаемая незаилающая скорость воды в канале; V_{np} — допускаемая неразмывающая скорость воды; V_m — средняя скорость воды.

После завершения строительства реконструируемого канала существующий канал засыпается грунтом из кавальера, образованного при разработке нового канала. Сохранение существующего канала нецелесообразно, так как на протяжении первых 500 м поверхность грунтовых вод ниже дна канала

(существующий канал не выполняет свою дренажную функцию).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Технологическая схема ремонта трубчатого дренажа, использованная на Нижегородской ГЭС, позволила выполнить ремонт дренажной системы без водопонижения и при необходимости отказаться от существующего трубчатого дренажа. При выводе из строя существующего дренажа расчетные градиенты потока составили 0,05–0,055, что меньше допустимого для мелкозернистого песка 0,26.

Успешный ремонт заключался в подсыпке территории нижнего бьефа и устройстве открытого дренажного канала в монолитном железобетоне на обратном фильтре с устройством в откосах и дне асбестоцементных труб, заполненных гравийным грунтом.

Несмотря на то, что для инженерно-геологических условий исследуемой плотины устройство засыпных дренажных траншей в нижнем бьефе и строительство нового трубчатого дренажа на более высоких отметках оказалось малоэффективным, данные варианты технических решений ремонта дренажных систем грунтовых плотин могут оказаться более действенными в других условиях.

Укладка подсыпки в нижнем бьефе и устройство дренажного канала по схеме, использованной на Нижегородской ГЭС, позволяет при необходимости вывести из работы существующий трубчатый дренаж. Такие решения были бы эффективными для организованного отвода профильтровавшейся воды из трубчатого дренажа на плотине Бугунь (Казахстан).

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов Д.В., Крутов Д.А. Комплексные технические решения при реконструкции плотин // Природообустройство. 2018. № 2. С. 22–28. DOI: 10.26897/1997-6011/2018-2-22-28
2. Крутов Д.А. Состояние и ремонт конструкций гидротехнических сооружений, подвергающихся волновым и ледовым воздействиям // Гидротехника. 2017. № 4. С. 74–77.
3. Кузнецов В.С., Ладенко С.Ю. Состояние трубчатого дренажа грунтовых плотин Нижегородской ГЭС после 60 лет эксплуатации // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2017. Т. 285. С. 51–61.
4. Donnelly C.R., Pantel P., Sikora E., Halim R., Laurent M., Matusiewicz K. et al. Risk assessment of internal erosion in till core dams at the Keeyask generating station // The International Journal on Hydropower and Dams. 2019. Vol. 26. Issue 3. Pp. 134–141.
5. Fleitz J., Gomez De Membrillera M. Visual inspections and monitoring, data analysis and dam safety assessment // International Dam Safety Conference. Bhubaneswar, Odisha. February. 2019. Vol. 1. Pp. 328–333.
6. Riswanto R. Dam monitoring system in Indonesia // International Dam Safety Conference. Bhubaneswar, Odisha. February. 2019. Vol. 1. Pp. 397–402.
7. Lemperiere F., Nombre A., Deroo L. Dams and the need for more innovation // The International Journal on Hydropower and Dams. 2018. Vol. 25. Issue 3. Pp. 89–97.

8. Муслимов А.В., Дроздов А.В. Геофизический контроль технического состояния насыпных гидротехнических сооружений в условиях криолитозоны // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2017. Т. 285. С. 29–35.

9. Ладенко С.Ю., Иванова Т.В., Абрамов Н.А., Иванов С.Н. Исследование фильтрационного режима тела и основания гидротехнических сооружений Павловской ГЭС с использованием результатов анализа химического состава вод // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2019. Т. 291. С. 5–15.

10. Кондратенко П.В., Воронков О.К., Шейкин А.М., Ганин А.В., Ушакова Л.Ф. Инженерно-геофизические исследования состояния левобережного примыкания бетонной плотины Волховской ГЭС // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2018. Т. 288. С. 37–45.

11. Панов С.И., Веселов А.Б. Особенности работы пьезометрических устройств в плотинах с элементами из глинистых грунтов // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2016. Т. 280. С. 65–78.

12. Сольский С.В., Лопатина М.Г., Котлов О.Н., Орлова Н.Л., Фролова Л.А., Кочиев А.М. Обоснование конструкции узла сопряжения суглинистого экрана основания и пленочного экрана откоса напорного бассейна Зарагизской МГЭС // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2016. Т. 281. С. 9–19.

13. Plunnecke C., Marcelino J. Rehabilitation of the Massingir embankment dam: a concept based on finite element seepage analysis // Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering. 2016. Vol. 5. Issue 3. Pp. 147–153. DOI: 10.5963/jwrhe0503009

14. Plunnecke C. Rehabilitation concept for the Massingir embankment dam, Mozambique. Diploma Thesis, Technical University of Braunschweig, Braunschweig, 2014. P. 56.

15. Оришук Р.Н. Проблемы проектирования, строительства и эксплуатации глиноцементобетонных диафрагм грунтовых плотин, возводимых методом буросекущихся свай // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2018. Т. 287. С. 3–13.

16. Jain A., Choudhary R.K. Rehabilitation of pervious foundation of Kanupur earth dam, Odisha — a case study // International Dam Safety Conference. Bhubaneswar, Odisha. February 2019. Vol. 2. Pp. 931–939.

17. Montfort A., Breul B. Bituminous geomembrane increasing tendency on Europe, America and Australia, to assume and renew watertightness of dams and reservoirs // International Dam Safety Conference. Bhubaneswar, Odisha. February 2019. Vol. 2. Pp. 837–847.

18. Vaschetti G., Tronel F., Subramanian J. Geomembrane systems in dam's rehabilitation: underwater applications // International Dam Safety Conference. Bhubaneswar, Odisha. February 2019. Vol. 2. Pp. 830–836.

19. Muller D., Wilson D. Asphaltic cores: making embankment dams truly watertight // The International Journal on Hydropower and Dams. 2018. Vol. 25. Issue 1. Pp. 169–176.

20. Srinivas ER.T., Chandrashekar ER.K.S.S., Srinivasulu ER.S. Seepage control in embankments — a case study Akkampally balancing reservoir // International Dam Safety Conference. Bhubaneswar, Odisha, February 2019. Vol. 2. Pp. 557–560.

Поступила в редакцию 24 марта 2019 г.

Принята в доработанном виде 14 апреля 2019 г.

Одобрена для публикации 25 июня 2019 г.

ОБ АВТОРЕ: **Денис Анатольевич Крутов** — кандидат технических наук, приглашенный профессор; **Казахстанско-Немецкий университет**; 050010, г. Алматы, Казахстан, ул. Пушкина, д. 111; dkrutov@rambler.ru.

REFERENCES

1. Kozlov D.V., Krutov D.A. Complex technical solutions for the reconstruction of dams. *Environmental Management*. 2018; 2:22-28. DOI: 10.26897/1997-6011/2018-2-22-28 (rus.).

2. Krutov D.A. Condition and repair of structures of hydraulic works exposed wave and ice impacts. *Hydraulic Engineering*. 2017; 4:74-77. (rus.).

3. Kuznetsov V.S., Ladenko S.Yu. Condition of pipe drainage of earth dams at the Nizhny Novgorod hydroelectric station after 60 years of operation. *Proceedings VNIIG named after Vedeneev B.E.* 2017; 285:51-61. (rus.).

4. Donnelly C.R., Pantel P., Sikora E., Halim R., Laurent M., Matusiewicz K. et al. Risk assessment of internal erosion in till core dams at the Keeyask generating station. *The International Journal on Hydropower and Dams*. 2019; 26(3):134-141.

5. Fleitz J., Gomez De Membrillera M. Visual inspections and monitoring, data analysis and dam safety assessment. *International Dam Safety Conference. Bhubaneswar, Odisha. February*. 2019; 1:328-333.

6. Riswanto R. Dam monitoring system in Indonesia. *International Dam Safety Conference. Bhubaneswar, Odisha. February*. 2019; 1:397-402.

7. Lemperiere F., Nombre A., Deroo L. Dams and the need for more innovation. *The International Journal on Hydropower and Dams*. 2018; 25(3):89-97.
8. Muslimov A.V., Drozdov A.V. Geophysical control of the technical condition of piled up hydraulic structures in cryolithozone conditions. *Proceedings VNIIG named after Vedeneev B.E.* 2017; 285:29-35. (rus.).
9. Ladenko S.Yu., Ivanova T.V., Abramov N.A., Ivanov S.N. Investigation of the filtration regime of the body and the foundation of the hydraulic structures of Pavlovskaya HPP using the results of the analysis of the chemical composition of water. *Proceedings VNIIG named after Vedeneev B.E.* 2019; 291:5-15. (rus.).
10. Kondratenko P.V., Voronkov O.K., Sheikin A.M., Ganin A.V., Ushakova L.F. Engineering-geophysical studies of the state of the left-bank junction of a concrete dam of the Volkhovskaya HPP. *Proceedings VNIIG named after Vedeneev B.E.* 2018; 288:37-45. (rus.).
11. Panov S.I., Veselov A.B. Features of the operation of piezometric devices in dams with elements from clay soils. *Proceedings VNIIG named after Vedeneev B.E.* 2016; 280:65-78. (rus.).
12. Solskiy S.V., Lopatina M.G., Kotlov O.N., Orlova N.L., Frolova L.A., Kochiev A.M. Substantiation of the construction of the junction interface of the loamy base screen and the screen of the slope of the head basin of the Zaragizhskaya small HPP. *Proceedings VNIIG named after Vedeneev B.E.* 2016; 281:9-19. (rus.).
13. Plunnecke C., Marcelino J. Rehabilitation of the Massingir embankment dam: a concept based on finite element seepage analysis. *Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering*. 2016; 5(3):147-153. DOI: 10.5963/jwrhe0503009
14. Plunnecke C. *Rehabilitation concept for the Massingir embankment dam, Mozambique. Diploma Thesis, Technical University of Braunschweig, Braunschweig*. 2014; 56.
15. Oristchuk R.N. Problems of design, construction and operation of clay-cement concrete diaphragms of earth dams built by the method of boring piles. *Proceedings VNIIG named after Vedeneev B.E.* 2018; 287:3-13. (rus.).
16. Jain A., Choudhary R.K. Rehabilitation of pervious foundation of Kanupur earth dam, Odisha — a case study. *International Dam Safety Conference. Bhubaneswar, Odisha. February*. 2019; 2:931-939.
17. Montfort A., Breul B. Bituminous geomembrane increasing tendency on Europe, America and Australia, to assume and renew watertightness of dams and reservoirs. *International Dam Safety Conference. Bhubaneswar, Odisha. February*. 2019; 2:837-847.
18. Vaschetti G., Tronel F., Subramanian J. Geomembrane systems in dam's rehabilitation: underwater applications. *International Dam Safety Conference. Bhubaneswar, Odisha. February*. 2019; 2:830-836.
19. Muller D., Wilson D. Asphaltic cores: Making embankment dams truly watertight. *The International Journal on Hydropower and Dams*. 2018; 25(1):169-176.
20. Srinivas ER.T., Chandrashekar ER.K.S.S., Srinivasulu ER.S. Seepage control in embankments — a case study Akkampally balancing reservoir. *International Dam Safety Conference. Bhubaneswar, Odisha. February*. 2019; 2:557-560.

Received March 24, 2019

Adopted in a modified form on April 14, 2019.

Approved for publication June 25, 2019

BIONOTES: Denis A. Krutov — Candidate of Technical Sciences, visiting professor; German-Kazakh University; 111 Pushkin st., Almaty, 050010, Kazakhstan; dkrutov@rambler.ru.