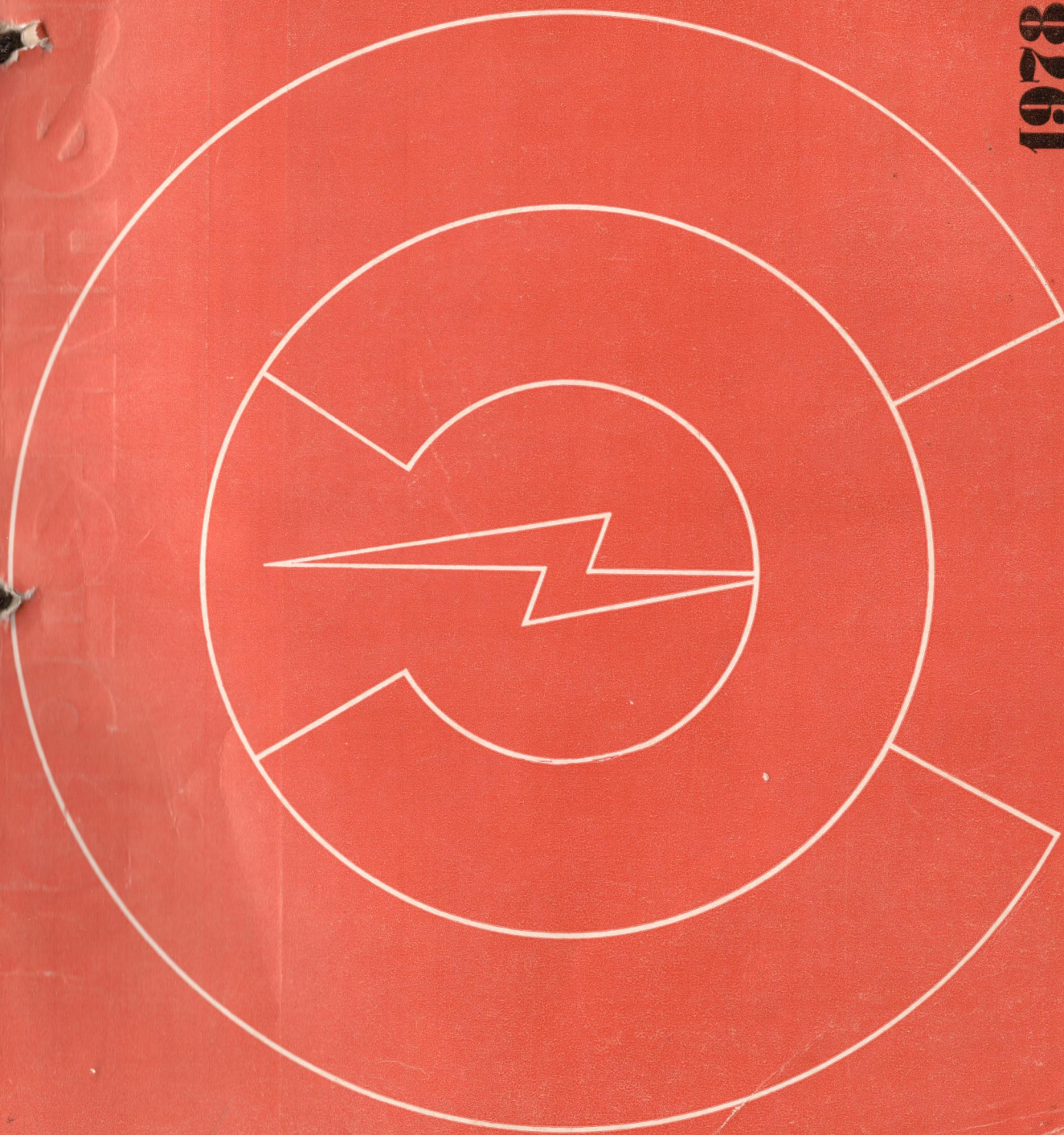


Энергетическое строительство 11

8261
1978



2. Лушнов Н. П. Подбор плотности крупнообломочного материала в наброске. М.: Стройиздат, 1975.

3. Каган М. Л., Андрианов А. В. Влияние трещиноватости на дробление массивов скальных пород взрывом. — В кн.: Инженерная геология скальных массивов. М.: Наука, 1976, с. 68—70.

4. Радченко В. Г., Заирова В. А. Каменно-земляные и каменно-набросные плотины. Л.: Энергия, 1971.

5. Недрига В. П., Лушнов Н. П., Покровский Г. И. Некоторые физико-механические и фильтрационные свойства многофракционного скального грунта, полученного взрывом. — Труды ВНИИ ВОДГЕО, 1977, вып. 68, с. 1—3.

6. А. с. 523973 [СССР]. Способ возведения плотин/Недрига В. П., Покровский Г. И., Черный И. П. — Оpubл. в бюл. «Открытия. Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1976, № 29.

УДК 627.82

О наполнении водохранилища при недостроенной плотине Нурекской ГЭС

Инж. А. И. КОЛЕСНИЧЕНКО

Нурекский гидроузел, строящийся на р. Вахш, имеет, как известно, комплексное назначение: он предназначен для получения дешевой электроэнергии и создания водохранилища сезонного и частично-многолетнего регулирования. В состав гидроузла входят: высотная плотина из местных материалов объемом 54 млн. м³ и высотой 300 м, гидроэлектростанция установленной мощностью 2700 МВт, напорно-станционный узел, а также ОРУ 220 и 500 кВ для выдачи электроэнергии в объединенную Среднеазиатскую энергосистему. Для пропуща строительных расходов имеется специальный комплекс строительных туннелей.

Плотиной Нурекской ГЭС создается водохранилище общим объемом 10,5 млрд. м³ (в том числе полезный объем — 4,5 млрд. м³).

В соответствии с пусковой схемой первой очереди ГЭС на строительстве был разработан график наполнения водохранилища первой очереди, предусматривавший начало подъема уровня воды 1 сентября 1972 г. Следует отметить, что за 3 мес уровень воды предстояло поднять на 70 м. (Подобных темпов наполнения водохранилищ земляных плотин отечественная практика еще не знала.) Кроме того, противифльтрационным элементом плотины должен был стать временный экран из суглинка, так как к моменту наполнения водохранилища ядро плотины не было еще выведено до требуемых отметок.

В процессе наполнения водохранилища необходимо было решить ряд технических проблем, связанных с обеспечением статической устойчивости экрана и верхового откоса плотины, организованного отвода воды, профильтровавшейся через верховую упорную призму, стабильной и надежной работы затворов строительных туннелей, необходимых попусков воды в нижний бьеф в условиях ограниченных меженных расходов р. Вахш и т. д.

В состав сооружений напорного фронта вошли (рис. 1):

верховая строительная перемычка (в 1966 г. — год перекрытия — она была возведена до отметки 205,0 и в 1968 г. наращена до отметки 230,0 м);

верховой клин плотины с временным суглинистым экраном (отметка 250,0 м), являющимся продолжением экрана перемычки, а также ядро плотины, выведенное до отметки 207,0 м;

строительный туннель второго яруса, оборудованный двумя парами затворов — сегментными (рабочими) и плоскими (аварийно-ремонтными);

промежуточный подводящий туннель, оборудованный аварийно-ремонтными затворами, и временный водоприемник (отметка порога 240,0 м).

Временный экран верхового клина плотины был отсыпан из суглинисто-щебенистого материала (рис. 2)

карьера № 10а Сафедобского месторождения (допускалось содержание в нем отдельных камней $d \leq 300$ мм). При укатке грунта достигалась плотность $\gamma = 1,95 \pm 2$ т/м³ при влажности 10—12%. Толщина отсыпаемого слоя составляла 0,5 м. Отделение фракций более 300 мм происходило в так называемых «конусах сегрегации» при сбрасывании материала с большой высоты.

В качестве подстилающего слоя вместо предусмотренного проектом мелкоблочного камня карьера № 5а укладывали грунты карьера № 10а (без переработки и обогащения) или галечник. Кривые гранулометрического состава этих материалов располагались в пределах либо левее заданной проектом зоны. Толщина экрана в верхней части составляла 1,5, в нижней — 7 м. Соприжение временного экрана с экраном перемычки на отметке 202,5 м было выполнено в виде горизонтального понура.

Верховая упорная призма плотины (рис. 1) к моменту наполнения водохранилища была выполнена до отметки 270,0 м на верховом клине и до отметок 205,0—210,0 м в зоне ядра. Призма была сложена из слоя каменной пригрузки толщиной 40 м и слоя мелкоблочного камня и галечника.

Для перехвата и отвода воды, профильтровавшейся через экран, в галечниковой части упорной призмы на отметке 203,0 м в направлении от правого борта к левому был уложен трубчатый дренаж из сборных железобетонных колец $D_{\text{вн}} = 2$ м (рис. 3). В соответствии с первоначальным проектом при укладке колец предусматривалось оставлять между ними шель шириной 2 см и обсыпать их материалом фильтра крупностью 0—40 мм. Пропускная способность дренажа в соответствии с расчетом составляла 5 м³/с.

В дальнейшем конструкция дренажа была изменена: ширина шели между железобетонными кольцами была увеличена до 20 см, шель был перекрыт стальной оцинкованной сеткой (диаметр проволоки 3 мм) с ячейками размерами 50×50 мм, а обсыпка всей трубы была выполнена из рядового камня. Изменения в конструкции дренажа были вызваны главным образом тем обстоятельством, что фактический коэффициент фильтрации K_f галечника упорной призмы, как показали натурные исследования, составлял 1000 м/сут, т. е. был намного выше коэффициента, предусмотренного техническими условиями (5—10 м/сут). Поэтому обсыпка трубы материалом фильтра с $K_f = 15 \pm 30$ м/сут не только не привела бы к уменьшению дренажного расхода, а наоборот, повысила бы кривую депрессии. Как будет показано ниже, дренаж измененной конструкции оказался весьма эффективным.

Сброс дренажной воды был организован самотеком по специальной дренажной штольне в строительный туннель первого яруса, расположенный ниже затворов.

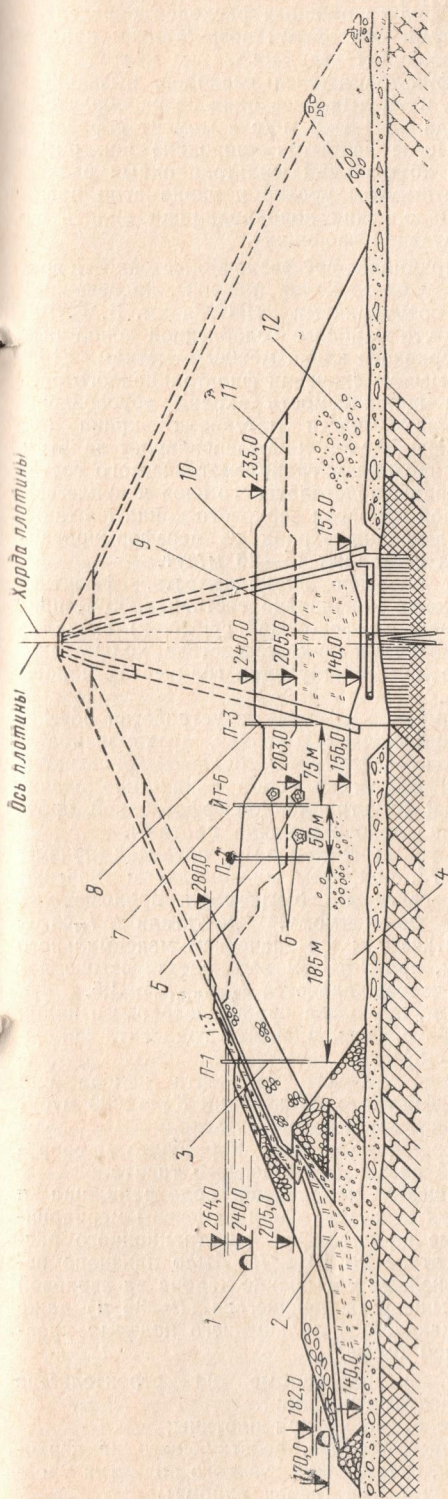


Рис. 1. Состав сооружений, создающих напорный фронт.
1 — строительный туннель третьего яруса; 2 — экран из суглинисто-щебенчатого материала; 3, 5, 8 — пьезометры; 4 — верховая упорная призма из галечника; 6 — трубчатый дренаж из сборных железобетонных колец, обсыпанных рядами камнем; 7 — инклинометрическая труба ИТ-6, используемая в качестве пьезометра; 9 — ядро из суглинисто-щебенчатого материала; 10 — контур плотины к концу первого года эксплуатации водохранилища; 11 — контур плотины к началу заполнения водохранилища; 12 — низовая упорная призма из галечника.

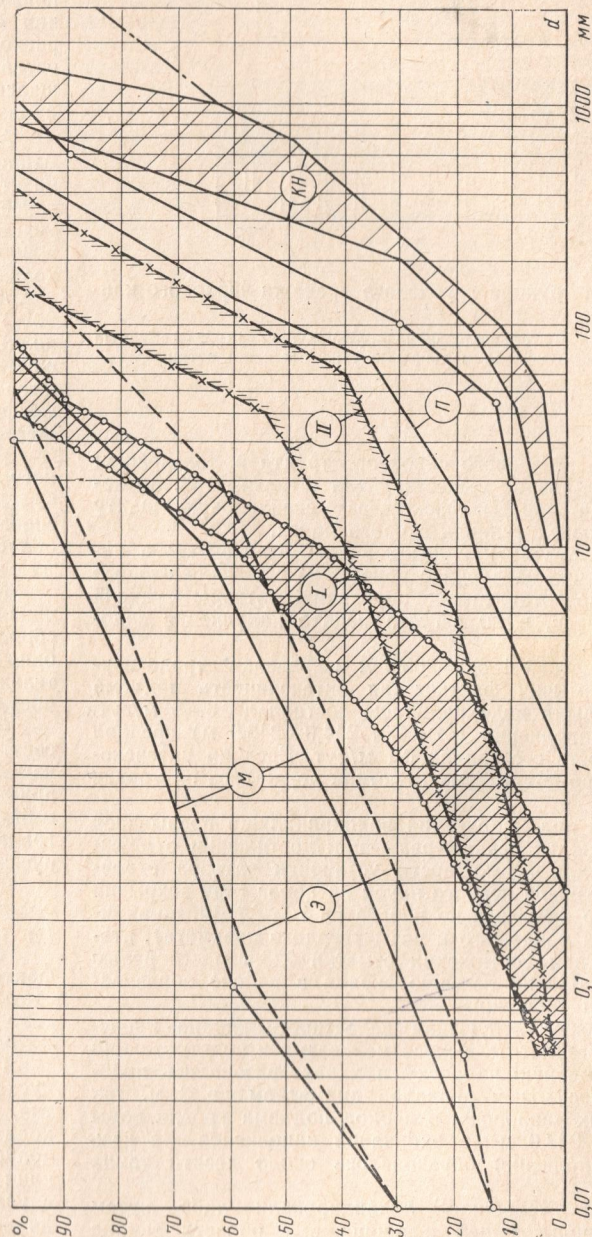


Рис. 2. Кривые гранулометрического состава материалов экрана верхового клина плотины.
Э — материал экрана (суглинисто-щебенчатый грунт); М — подстилающий слой экрана в пределах отметок 202,5—250,0 м; КН — материал каменной наброски, на которой укладывали экран и переходную зону; И — мелкослой из суглинисто-щебенчатого материала (подстилающий и защитный слои полистирольной пленки); I — первый слой переходной зоны в пределах отметок 250,0—265,0 м (фильтр крупностью 0—70 мм); II — второй слой переходной зоны в пределах отметок 250,0—265,0 м (гравелисто-галечниковый грунт).

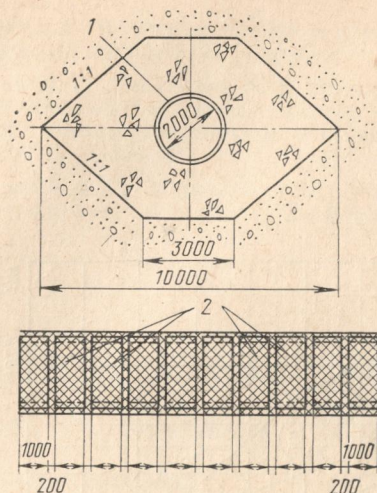


Рис. 3. Конструкция трубчатого дренажа верхового клина на плотине.

1 — коллектор из сборных железобетонных колец; 2 — сборные железобетонные кольца с покрытием из стальной сетки.

В качестве резервного сбросного тракта в дальнейшем была использована существующая штольня 1-С, по которой вода сбрасывалась через специальную шахту в строительный туннель второго яруса.

19 августа 1972 г. были закончены монтаж и наладка рабочих затворов строительного туннеля второго яруса и подготовлены к опусканию затворы туннеля первого яруса, а 20 августа начато наполнение водохранилища.

На отметках 180,0—205,0 м в пределах экрана верховой перемычки фактическая интенсивность подъема уровня воды в водохранилище составляла 6—8 м/сут. В конце наполнения (отметки 244,0—248,0 м) средняя интенсивность составляла 0,1 м/сут. Средняя интенсивность на промежуточных отметках держалась на уровне 1 м/сут.

Общий ход наполнения водохранилища прерывался только дважды: первый раз — при достижении отметки 205,0 м — для возможности установки затвора строительного туннеля первого яруса на порог (при закрытии этот затвор не дошел до порога на 70—80 мм, по-видимому, из-за попавшего в пазы твердого предмета), второй раз — при достижении отметки 223,0 м — с целью ведения работ по лечению экрана в районе образования первой «воронки».

Локальные нарушения целостности экрана происходили в результате выноса мелкозема в подстилающий слой и каменную наброску и характеризовались появлением просадок и провалов диаметром до 3 м, так называемых «воронки», в период подъема уровня воды с отметки 223,0 м до окончания наполнения. За весь период наполнения образовалось около десяти таких «воронки».

Первые «воронки» ликвидировали либо путем вскрытия прилегающей к «воронкам» области экрана на всю его толщину и укладки кондиционного материала суглинка на обратном фильтре, либо путем непосредственной засыпки «воронки» суглинком и уплотнения засыпанного грунта взрывами.

Так как образование «воронки» носило локальный характер, то после обрушения части экрана сформировавшаяся полость тут же заполнялась материалом пригрузки экрана, который, как правило, незначительно отличался от материала экрана, и дальнейших размывов не наблюдалось. В связи с этим лечение экрана,

вызывавшее к тому же необходимость прекращения наполнения водохранилища, в дальнейшем не производилось.

Фильтрационный расход в процессе наполнения водохранилища был довольно значительным — до 18 м³/с. Характер кривой фильтрационных расходов определялся в основном двумя факторами: возрастанием напора на экран и образованием «воронки».

На кривую фильтрационных расходов, вызванных подъемом уровня, накладывались пики скачкообразного повышения расхода на 1,5—2 м³/с в момент образования «воронки». После закрытия «воронки» пик роста расходов спадал, хотя общий фильтрационный расход оставался на достигнутом уровне и равномерно повышался по мере наполнения водохранилища вплоть до образования следующей «воронки».

Анализ фильтрационно-суффозионной стойкости временного экрана верхового клина плотины, проведенный на строительстве сотрудниками ВНИИГа им. Б. Е. Веденеева, показал, что наиболее ослабленной зоной был участок экрана верхового клина между отметками 210,0 и 245,0 м и что высокие значения фильтрационного расхода и большая проницаемость экрана обусловлены выносом значительной части материала экрана (до 90%) в подстилающий слой и последовавшим за этим полным переформированием гранулометрического состава материалов экрана, подстилающего слоя и прилегающего слоя каменной наброски верхового клина плотины. Коэффициент фильтрации экрана из переформировавшегося материала составлял 15—20 м/сут.

Несмотря на большую проницаемость, эффективность экрана в конце наполнения составила 55%, причем материал экрана (сафедобский суглинок) оказался способным к самозалечиванию вследствие кольматации областей прорыва при действующих градиентах напора на экран $I=3-4$.

Благодаря тому что дренажные устройства обеспечивали (с большим запасом) захват, дренирование и сброс профильтровавшейся воды, большой фильтрационный расход не повлек за собой каких-либо значительных изменений фильтрационно-суффозионной прочности самого тела верхового клина плотины.

Фактический градиент напора в пределах призмы составил $I_{ср}=0,075$, при этом максимальные значения из-за расслоения галечника (сегрегация, происшедшая при отсыпке), по-видимому, достигали $I_{макс}=6I_{ср}=0,45$. Критическим же значением максимального градиента напора, при котором вымывается свыше допустимых 3—4% частиц, является $I_{макс.крит}=1,5$.

Таким образом, безопасная работа верхового клина обеспечивается при среднем значении градиента напора $I_{ср}=I_{макс.крит}/6=0,25$.

Такое значение среднего градиента напора при фактическом коэффициенте фильтрации $K_f=1000$ м/сут соответствует фильтрационному расходу $Q_{ф.крит}=30$ м³/с. На такой расход и были рассчитаны сооружения дренажной системы и сбросного тракта.

После завершения наполнения водохранилища и пуска первых двух агрегатов были намечены мероприятия, направленные на снижение фильтрационного расхода на первом этапе до 10 м³/с. Было признано недопустимым дальнейшее повышение напора на верховой клин плотины свыше установившегося ($H=35$ м) даже в условиях ожидающегося дальнейшего подъема уровня воды в верхнем бьефе.

Мероприятия, разработанные на строительстве с этой целью, предусматривали:

- форсирование отсыпки ядра плотины;
- снижение общего напора, действующего на верховой клин плотины, путем искусственного поднятия уровня воды в нижнем бьефе (перед ядром);
- лечение экрана верхового клина (доставка дополнительного объема суглинка и сбрасывание его в воду непосредственного из автосамосвалов либо смывом гидромонитором);

переустройство сбросного тракта дренажных вод и установка на нем задвижек для регулирования уровня воды перед ядром;

обнаружение и заделка сосредоточенных ходов фильтрации в экране, наблюдаемых визуально.

Последние два мероприятия предполагалось выполнить после глубокой сработки водохранилища на нужды ирригации.

Работы по лечению экрана проводили в период с октября 1972 по февраль 1973 г. Были намечены и опробованы три способа укладки суглинка под воду на верховой откос экрана:

непосредственная разгрузка суглинка из автосамосвала и сдвигка его в воду бульдозером;

смыв заранее заготовленных штабелей суглинка гидромониторами;

подача суглинка в заранее намеченные ослабленные зоны экрана плавучим транспортером.

Как показали периодически выполняемые замеры глубин водохранилища в местах укладки суглинка, способ подачи суглинка плавучим транспортером наиболее эффективен, однако возможности его в значительной мере ограничивались малой производительностью механизмов. Другие же способы ожидаемых результатов не дали: отсыпаемый по откосу с заложением 1:2,25 суглинок не сползал на достаточную глубину и, как правило, задерживался на существующей полке на отметке 230,0 м.

Всего за указанный период тремя способами было уложено около 130 тыс. м³ суглинка, в результате чего расход фильтрации был снижен с 17—18 до 14—15 м³/с, а эффективность экрана соответственно возросла с 55 до 60%.

В период с 10 марта по 10 апреля 1973 г. была произведена глубокая сработка водохранилища на нужды ирригации. Народное хозяйство получило за это время около 900 млн. м³ воды дополнительно к бытовому стоку. Средняя интенсивность сработки водохранилища составляла 1,5 м/сут.

Верховой откос экрана после сработки не претерпел видимых изменений; ни оползней, ни каких-либо других нарушений не наблюдалось, однако вся поверхность экрана была свободна от илистых или суглинистых частиц.

На правобережном горизонтальном переходном участке экрана в зоне временного водоприемника между отметками 235,0 и 237,0 м было обнаружено несколько углублений и промывов на месте «воронки», образовавшихся в процессе наполнения водохранилища. Кроме того, на контакте экрана со скальным массивом в этом же месте обнаружили ряд промоин, в которые стекала вода, просочившаяся из вышележащего откоса.

В связи с тем что из-за высокой водонасыщенности откоса невозможно было выполнить радикальное лечение экрана, ограничились заделкой «воронки» и промоин на правобережном горизонтальном участке, после чего весь участок был прикрыт слоем суглинка толщиной до 1 м.

Период сработки и повторного наполнения водохранилища был использован также для переустройства дренажа и сбросного тракта. Были пройдены новая дренажная штольня и шахта для сброса фильтрационного расхода в строительный туннель первого яруса, выполнен водоприемник дренажных вод на повышенном горизонте (отметка 225,0 м), снабженный двумя задвижками диаметром 1200 мм, а также оборудованы задвижками сбросные трубопроводы в дренажной штольне на отметке 205,0 м.

Новая переоборудованная система сброса дренажных вод позволила довести пропускную способность обоих сбросных трактов до 50 м³/с (на случай увеличения фильтрации в период прохождения паводка), а также производить подъем уровня воды в нижнем бьефе (перед ядром) по мере роста самого ядра.

После окончания работ по лечению экрана с 26 апреля по 24 мая 1973 г. было проведено вторичное наполнение водохранилища до отметки 250,0 м. Средняя интенсивность наполнения составила 1,7 м/сут. На этот раз подъем уровня с большей интенсивностью, чем во время первого наполнения, не вызвал никаких нежелательных последствий, не было обнаружено ни одной «воронки». По мере увеличения напора на экран фильтрационный расход возрастал и в конце наполнения достиг 10 м³/с.

Для обеспечения пропуска наводка 0,01%-ной обеспеченности в весенний период 1973 г. были проведены работы по наращиванию верхового клина плотины до отметки 270,0 м. Экран состоял из двух частей: между отметками 250,0 и 265,0 м он был выполнен из суглинка, а с отметки 265,0 до отметки 270,0 м — из двух слоев полиэтиленовой пленки толщиной 0,15 см каждый. В качестве подстилающего и защитного слоев применили мелкозем из конусов сегрегации, а пригрузку экрана выполнили из камня конусов сегрегации.

Благодаря использованию материалов из конусов сегрегации (вместо фильтрового материала крупностью 0—40 мм, предусмотренного первоначальным проектом) повысилась фильтрационная прочность экрана, так как помимо пленки в работе экрана участвовали два слоя суглинка общей толщиной более 1 м, и снизилась стоимость работ.

В период с 24 июня по 16 ноября осуществляли постепенный подъем уровня до отметки 268,0 м; объем воды в водохранилище к концу этого периода составил 1,5 км³. На протяжении этого времени напор, действующий на экран, не превышал 35—37 м, что достигалось благодаря периодическому подъему уровня воды в нижнем бьефе перед ядром по мере его роста, осуществляемому с помощью затворов, установленных на сбросном тракте. Первая корректировка напора была произведена путем закрытия задвижек на отметке 202,0 м; в результате уровень воды перед ядром был повышен на 10 м. Последующие две корректировки были выполнены с помощью задвижек на отметке 225,0 м в июле и ноябре 1973 г., когда уровень воды в водохранилище был поднят в общей сложности на 20 м и доведен до отметки 235,0 м.

Несмотря на непрерывный подъем уровня воды в водохранилище, фильтрационный расход практически не изменялся и составлял 11—12 м³/с. Напор на экран повысился с 23 (в весенний период) до 30 м (к концу года). Эффективность экрана в период после паводка значительно повысилась. Так, если после лечения экрана на суглинком ее удалось поднять с 55 до 60%, то после прохождения паводка эффективность экрана повысилась до 80%, т. е. стала в 4 раза больше, чем после лечения.

Это можно объяснить тем обстоятельством, что в период паводка происходил кольматаж временного экрана взвешенными наносами р. Вахш, которые, несмотря на наличие водохранилища длиной 25—30 км, в достаточном количестве подходили к плотине.

Достигнутый уровень воды в водохранилище был сохранен до начала следующей сработки водохранилища на нужды ирригации, которая была осуществлена в марте 1974 г.

Сбросной тракт дренажных вод был окончательно перекрыт с помощью задвижек на отметке 225,0 м в августе 1974 г., когда ядро было выведено на уровень верхнего бьефа, т. е. отметки 270,0 м.

За весь период эксплуатации Нурекского гидроузла были произведены четыре сработки водохранилища на нужды ирригации: в весенние периоды 1973—1977 гг., а также летом 1974 г.

В результате в каждую сработку народное хозяйство получало дополнительно к бытовому стоку от 500 до 1500 млн. м³ воды, что сыграло большую роль в повышении урожайности хлопчатника на обрабатываемых и целинных землях в низовьях Амударьи.

ВЫВОДЫ

1. Принятое решение о наполнении водохранилища при неполностью возведенном ядре, на временном экране оправдало себя (в результате водохранилище было наполнено на год раньше намеченного срока).

2. Подтвердилась возможность наполнения водохранилища в составе Нурекского гидроузла даже с временным экраном при большой интенсивности подъема уровня воды (в среднем 1 м/сут).

3. Значительный фильтрационный расход (до 18 м³/с) не повлек за собой потерь статической или фильтрационно-суффозионной прочности экрана и верхового клина плотины. Это объясняется правильным вы-

бором материала экрана (сафедобский суглинок), успешно противостоявшего размыву в районе нарушения сплошности, а также правильным выполнением трубчатого дренажа и сбросной системы, которые обеспечили надежный захват и сброс фильтрационного расхода и регулирование уровня воды перед ядром. Опыт эксплуатации сбросной системы показал возможность регулирования уровня воды в нижнем бьефе с помощью задвижек в большом диапазоне отметок (205,0—270,0 м).

4. Самокольмотаж экрана в период прохождения паводка оказался значительно эффективнее лечения экрана суглинком.