МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ - МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА

О.Д. Рубин, Н.В. Ханов, А.С. Антонов, Т.С. Федорова

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

системы «правобережная плотина — основание» с оценкой влияния нарушения сплошности противофильтрационного контура на фильтрационный режим низовой упорной призмы

Учебное пособие

Москва РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева 2025 УДК 004.041:627.8 ББК 87.256.631.0:31.570.42 П-82

Рецензенты:

Михеев П. А., *д-р техн. наук, профессор кафедры сельскохозяйственного строительства* и экспертизы объектов недвижимости ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева;

Щербаков А.О., канд. техн. наук, зав. отделом гидротехники и гидравлики ФГБНУ «ВНИИГиМ им. А.Н.Костякова»

Рубин, О.Д. Пространственное моделирование системы «правобережная плотина — основание» с оценкой влияния нарушения сплошности противофильтрационного контура на фильтрационный режим низовой упорной призмы / О.Д. Рубин, Н.В. Ханов, А.С. Антонов, Т.С. Федорова; Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева. – Москва: РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева, 2025. – 128 с. ISBN 978-5-9675-2069-3

В учебном пособии представлены анализ и обобщение материалов проектной и исполнительной документации изыскательских и научноисследовательских работ по оценке состояния грунтовой плотины ГЭС, расчетные исследования напряженно-деформированного состояния, фильтрационного режима и устойчивости плотины при нарушении сплошности фильтрационного контура.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки Строительство (направленность – Гидротехническое строительство, дисциплина – Фильтрационные расчеты гидротехнических сооружений). Также Учебное пособие полезно сотрудникам проектных, научно-исследовательских и эксплуатационных организаций, занимающихся вопросами безопасности гидротехнических сооружений при длительной эксплуатации.

Рекомендовано к изданию учебно-методической комиссией Института мелиорации, водного хозяйства и строительства им. А.Н. Костякова, протокол № 4 от 19.05.2025 г.

© Рубин О.Д., Ханов Н.В., Антонов А.С., Федорова Т.С. 2025
© ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2025

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ
ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ ПРАВОБЕРЕЖНОЙ ПЛОТИНЫ
1.1. Местоположение и инженерно-геологические условия размещения правобережной
плотины. Конструкция правобережной плотины и ее особенности 5
1.2. Анализ и обобщение результатов геологических и гидрогеологических изысканий15
1.3. Анализ выполненных ранее исследований фильтрационного режима грунтовых
плотин
1.4. Анализ результатов ранее выполненных научно-исследовательских работ по оценке
состояния правобережной плотины42
 2. АНАЛИЗ ДАННЫХ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ПРАВОБЕРЕЖНОЙ ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНОЙ ГЭС НА УЧАСТКЕ ПК18 – ПК25 2.1. Анализ наблюдений за фильтрационным режимом правобережной плотины на
участке ПК18-ПК25
2.2 Анализ наблюдений за деформационным поведением правобережной плотины на
vчастке ПК18-ПК25
 3. РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И УСТОЙЧИВОСТИ ПРАВОБЕРЕЖНОЙ ПЛОТИНЫ НА УЧАСТКЕ ПК18-ПК25
3.2 Исходные данные для выполнения расчетных исследований 103
3.3 Результаты расчетных исследований напряженно- деформированного состояния и
устойчивости правобережной плотины на участке ПК18 – ПК25
4. РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО РЕЖИМА И УСТОЙЧИВОСТИ ПРАВОБЕРЕЖНОЙ ПЛОТИНЫ НА УЧАСТКЕ ПК18-ПК25 ПРИ НАРУШЕНИИ СПЛОШНОСТИ ФИЛЬТРАЦИОННОГО КОНТУРА 108 4.1. Исходные данные для выполнения расчетных исследований 108
4.2. Результаты расчетных исследований фильтрационного режима и устойчивости
правобережной плотины на участке ПК18-ПК25 при нарушении сплошности
фильтрационного контура110
ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

введение

Целью учебного пособия «Пространственное моделирование системы «правобережная плотина – основание» на участке ПК 18 – ПК 25 с оценкой влияния нарушения сплошности противофильтрационного контура на фильтрационный режим низовой упорной призмы» является:

- оценка напряженно-деформированного состояния системы
 «правобережная грунтовая плотина основание» при текущих
 эксплуатационных нагрузках;
- оценка влияния нарушения сплошности противофильтрационного контура на фильтрационный режим низовой упорной призмы.

В учебном пособии представлены:

- анализ и обобщение материалов проектной и исполнительной документации, результатов инженерных изысканий, результатов ранее выполненных научно-исследовательских работ, по оценке состояния правобережной плотины ГЭС;
- анализ данных натурных наблюдений за правобережной грунтовой плотиной ГЭС на участке ПК 18 ПК 25;
- разработка математической модели правобережной грунтовой плотины
 ГЭС на участке ПК 18 ПК 25 в трехмерной постановке;
- калибровка разработанной модели по данным натурных наблюдений и с учетом ранее выполненных изысканий и исследований;
- расчетные исследования напряженно-деформированного состояния и устойчивости системы «правобережная грунтовая плотина-основание» при текущих эксплуатационных нагрузках;
- прогнозные расчеты фильтрационного режима и устойчивости правобережной грунтовой плотины при нарушении сплошности противофильтрационного контура как в теле, так и в основании плотины.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ГЭС – гидроэлектростанция;

ГТС – гидротехническое сооружение;

НДС – напряженно-деформированное состояние;

УВБ – уровень верхнего бьефа;

УНБ – уровень нижнего бьефа;

ФПУ – форсированный подпорный уровень;

НПУ – нормальный подпорный уровень;

ПК – пикет;

ПМ – поверхностная марка;

ВБ – верхний бьеф;

НБ – нижний бьеф;

КИА – контрольно-измерительная аппаратура;

МКЭ – метод конечных элементов;

МФИ – многофакторные исследования;

КЭ – конечные элементы;

НИР – научно-исследовательские работы.

1. АНАЛИЗ И ОБОБЩЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ПРОЕКТНОЙ И ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ, ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ, РЕЗУЛЬТАТОВ РАНЕЕ ВЫПОЛНЕННЫХ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ ПО ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ ПРАВОБЕРЕЖНОЙ ПЛОТИНЫ

1.1. Местоположение и инженерно-геологические условия размещения правобережной плотины. Конструкция правобережной плотины и ее особенности

Правобережная грунтовая плотина (рис. 1) – насыпная грунтовая с центральным ядром. По условиям расположения и конструктивным особенностям правобережная плотина состоит из трех участков:

- островной участок длиной 1028,0 м (ПК13+02-ПК23+30), высотой до 39 м;
- русловой участок длиной 261 м (ПК23+30-ПК25+91), высотой до 45 м;
- правобережный участок длиной 859 м (ПК25+91-ПК34+50), высотой до 19 м.



Рисунок 1.1 – План расположения правобережной плотины ГЭС

Отметка гребня – 463,50 м; максимальный напор при НПУ – 31,0 м; максимальная высота грунтовой плотины на русловом участке - до 45 м; длина по гребню – 58,75 м. Класс сооружений по проекту - I.

На всем протяжении поймы до береговой террасы (островной и русловой участки) непосредственно под плотиной залегает пласт современного аллювия – гравийно-галечниковые грунты со средним коэффициентом фильтрации 600-900 м/сут., мощностью 4.5-11 м.

Гравийно-галечниковый пласт подстилается коренными породами, представляющими собой переслаивающиеся песчаники и алевролиты с включениями аргиллитов и углей. Верхняя зона коренных пород на глубину 40-60 м разделяется на четыре перемежающиеся пачки песчаников и алевролитов. Алевролиты служат водоупором по отношению к песчаникам, поскольку имеют средний коэффициент фильтрации Кф = 10 м/сут., песчаники – Кф = 10-40 м/сут.

Островной участок плотины возведен на слое гравийно-галечниковых отложений современного аллювия мощностью 8 м, лежащем на коренных породах (алевролиты и песчаники). На русловом участке тело плотины опирается непосредственно на коренные породы (преимущественно песчаники).

Правобережный участок плотины имеет в основании делювиальнопролювиальные суглинки, ниже которых располагается слой галечников древнего аллювия мощностью 7 м.

Тело плотины отсыпано из современного аллювия.

Береговой склон в примыкании правобережной плотины сложен из пролювиально-делювиальных суглинков, мощностью до 8-12 м с коэффициентом фильтрации до 0,4 м/сут., гравийно-галечниковыми грунтами древнего аллювия с коэффициентом фильтрации 40 м/сут. и подстилающими коренными породами (алевролитами и песчаниками).

На рисунках 1.2, 1.3 приведены характерные поперечные сечения островногоирусловогоучастковправобережнойплотины.



Рисунок 1.2 – Поперечное сечение плотины на островном участке плотины ПК18+00



Рисунок 1.3 – Поперечное сечение плотины на русловом участке плотины ПК 25+00

По гребню плотины проходит асфальтированная автодорога на бетонном основании шириной 12,0 м с двумя тротуарами.

Противофильтрационный элемент на островном участке плотины – суглинистое ядро, ширина которого согласно проекту: по низу 14 м, по верху 3,0 м. Фактическая ширина ядра превышает проектную. Коэффициент фильтрации ядра – 0,01-0,05 м/сут.

В примыкании к зданию ГЭС суглинистое ядро уширено до 35,0 м. Кроме того, сопряжение со зданием ГЭС усилено стальной диафрагмой, заделанной в бетон здания ГЭС и прорезающей материал ядра на 10 м.

На участке ПК22-25 по условиям строительства и на правобережном участке плотины, где ее высота меньше 15,5 м и напор не превышает 8,5 м, вместо ядра из суглинка уложена центральная призма (уширенное ядро) из древнего аллювия в смеси с суглинком до 12%, пригруженного боковыми призмами из современного аллювия. Центральная призма имеет ширину по гребню 15 м. Коэффициент фильтрации ее грунтов – 0,15 м/сут.

Сопряжение противофильтрационного элемента плотины (ядра) с коренными породами выполнено:

- на небольшом участке примыкания к зданию ГЭС (ПК13+02 ПК14+18) с помощью бетонного замка, врезанного в коренные породы на глубину 12,5 м;
- на всей пойменной части (ПК14+18 ПК25+88) из двух рядов металлического шпунта с двухрядной цементацией аллювия в шпунтовом коридоре шириной 5 м. Шпунт врезан в суглинистое ядро на 5 м, в коренные породы на 1-2 м. Между рядами шпунта поверх аллювиального песчано-галечникового грунта уложена бетонная плита толщиной 2 м. Глубина цементации в коренных породах 20 м;
- на переходе к береговой террасе от ПК25+88 до ПК26+48 сопряжение ядра с коренными породами осуществляется бетонным замком;

- от ПК26+48 до ПК26+75 (зона выхода древнего аллювия) одним рядом металлического шпунта;
- от ПК 26+75 до ПК34+50 глиняным замком (уплотненным суглинком).

В русловой и островной частях правобережной грунтовой плотины дренаж выполнен наслонного типа из гравия, защищенный сверху каменной наброской толщиной 1 м, расположенный на откосе дренажной канавы. Проектный расход – 1,42 м³/с.

Дренаж правобережной части плотины – закрытый, трубчатого типа с двухслойным обратным фильтром. Материал труб – железобетон, диаметр – 300 мм. Длина дренажа – 710 м. По трассе дренажа выполнены смотровые колодцы диаметром 1 м. Выход дренажа предусмотрен в сбросную трубу в каменной призме наслонного дренажа руслового участка плотины. Проектный расход - 0,266 м³/с.

В месте сопряжения со зданием ГЭС грунтовая плотина ограничивается со стороны верхнего бьефа верховой сопрягающей стенкой, а со стороны нижнего бьефа – береговой подпорной стенкой.

На ПК27+37,50 тело плотины пересекает бетонная галерея с тремя смотровыми колодцами, в которой проложены две нитки городского водопровода. Траншея для галереи была пройдена в делювиальных береговых отложениях, являющихся основанием плотины.

Конструктивно галерея выполнена из монолитного железобетона в виде эллипсоидного свода, опирающегося на фундаментную плиту толщиной 1.3 м. Толщина свода изменяется от 60 см в опорах до 40 см в замке. Длина галереи 170 м, максимальная ширина и высота проходного сечения одинаковы и составляют 2.4 м. По длине галерея разрезана температурно- осадочными утолщенными швами на отдельные секции по 15-20 м, в швах выполнено контурное уплотнение в виде битумных шпонок. Галерея имеет три смотровых колодца (на концевых участках и посередине) и две бетонные пробки длиной по 5 м каждая, делящие галерею по длине на три изолированных друг от друга отсека.

В 1959, 1967, 1969 годах отмечались случаи появления трещин в бетоне, раскрытие отдельных швов с вытеканием битума, сопровождаемые фильтрацией и выносом грунта в галерею. В 1996 г. из-за раскрытия периметральной трещины в первом отсеке наблюдалась фильтрация порядка 0,3 л/с с выносом суглинка объемом около 20 м³.

В целях предотвращения в последующем суффозионных выносов грунта было принято решение о демонтаже водопроводного оборудования и консервации двух отсеков со стороны водохранилища, которая была завершена в 2002 году. Водоприемные колодцы сооружения полностью заполнены суглинком и ПГС с кирпичным боем, выполнена гидроизоляция пробок между отсеками. Первый отсек заполнен песчано-гравийной смесью, а полость под сводом (контактная зона сводгрунт) затампонирована цементно-глинистым раствором. Второй отсек заполнен цементно-глинистым раствором 1:4 и цементно- песчаным раствором 1:4, между разными заполнителями выполнена двухметровая железобетонная пробка из тяжелого бетона, а контактная зона свод-грунт забита цементно-песчаным раствором.

Для уменьшения расхода обходной фильтрации по обнаженному слою галечников древнего аллювия в верхнем бьефе вдоль берегового склона выполнен суглинистый экран длиной 285 м. Экран защищен слоем гравийно-галечникового грунта современного аллювия и сопрягается с коренными породами основания при помощи бетонного замка. Коренные породы на участке бетонного замка экрана зацементированы на глубину 10-20 м.

Крепление верхового откоса плотины выполнено монолитными железобетонными плитами размером:

 в пределах отметок 463,50 – 462,00 м 	$2,50 \times 2,25 \times 0,15$
 в пределах отметок 462,00 – 459,00 м 	$10 \times 10 \times 0,30;$
 в пределах отметок 459,00 – 451,00 м 	$10 \times 10 \times 0,60.$

Верховой откос островного участка плотины правого берега в примыкании к верховой сопрягающей стенке ГЭС ниже бермы на отметке 451,00 м крепится каменной наброской.

Верховой откос руслового участка на длине 610 м (ПК 21+40,00 – ПК27+50,00) между отметками 445,00-449,00 м имеет временное крепление каменной наброской толщиной 1,5 м (была выполнена в связи с эксплуатацией гидроузла на промежуточной отметке). Крепление низового откоса выполнено сортированным гравием.

В процессе строительства правобережной плотины были допущены следующие отклонения от проектных конструктивно-компоновочных решений:

1. Участок плотины между ПК21+70 – ПК27+50 (по гребню) возводился в 1957-

1958 гг. Из-за отставания строительных работ от пускового графика агрегатов строительство этого участка производилось при одновременном наполнении водохранилища. В течение 1957 года УВБ поднялся от отм. 442,5 м до 447,8 м. Возведение тела плотины и противофильтрационных устройств велось под защитой специально запроектированной временной плотины (дамбы), которая затем вошла в верховой клин постоянного профиля. Верховой откос временной плотины был прикрыт суглинистым экраном и понуром, защищенным сверху гравийно-галечникового грунта. Временная слоем плотина создавала недостаточную защиту от фильтрации и размыва, часть ядра отсыпалась в воду (мокрым способом). Повышенная фильтрация размывала строящееся ядро, в результате чего возник проран с дебитом до 500 л/с. При ликвидации прорана некачественно выполнена укладка суглинка (ПК24+20), о чем свидетельствуют низкие (1,6 т/м³) значения объемного веса скелета и высокая (24%) влажность грунта.

При ликвидации этого прорана была также нарушена в некоторых местах герметичность шпунтовой стенки в основании плотины.

В результате ликвидации прорана с применением дополнительной цементации и уширением ядра, несоблюдения проектных условий при укладке суглинка, наличия временной дамбы в составе профиля плотины на этом участке плотины сформировалось непроектное сечение.

2. На участке от ПК22+80 до ПК24+20 верховой ряд шпунта неоднократно искривлялся (во время производства работ), что привело к раскрытию пазов шпунта, отхождению его во многих местах от бетонной пригрузочной плиты на 0,1 - 0,3 м.

Вырезанные в шпунтовых стенках окна на отм. 427,7 м (ПК24+25) для пропуска воды из прудка не были тщательно заделаны.

3. Забивка металлического шпунта в основании правобережной плотины в галечный грунт с валунами не повсеместно произведена до коренных пород вследствие чего, в частности в районе ПК24+20, возникала сосредоточенная фильтрация воды через эти «окна», сильно затруднявшая производство цементации аллювия в межшпунтовом пространстве и снижавшая ее качество.

4. Укладка песчано-гравелистых грунтов боковых призм островной части правобережной плотины от ПК18+00 до ПК23+00 проводилась с грубыми нарушениями, приведшими к вымыву мелких фракций с образованием песчаных отмелей. Кроме того, отсыпка призм правобережной плотины выполнена без устройства переходных слоев.

5. При монтаже диафрагмы, сопрягающей здание ГЭС с правобережной плотиной, наблюдалось отставание в ее установке от уложенного суглинка и слабое уплотнение суглинка в примыкании к ней.

Вышеперечисленный отступления от проекта вносят дополнительную неопределенность в фильтрационный режим правобережной плотины и ее основания.

В ходе анализа проектной документации по устройству трубчатого дренажа правобережной части правобережной плотины отмечено, что по трассе трубчатого дренажа участки основания с проницаемыми грунтами вынимались и замещались суглинистым материалом (рис. 1.4). В частности, наиболее крупные засыпки проводились на участках между дренажными колодцами К-7 – К-9 и К-9 – К-10[1].



Рисунок1.4. – Фрагмент поперечного профиля трубчатого дренажа правобережной плотины

1.2. Анализ и обобщение результатов геологических и гидрогеологических изысканий

Данный раздел подготовлен на основании материалов научноисследовательских работ, обследований, инженерных изысканий, выполненных в период проектирования, строительства эксплуатации правобережной плотины ГЭС [2].

В период эксплуатации ГТС ГЭС было выполнено большое количество научно-исследовательских работ, в которых давалась оценка состояния сооружения и предлагались различные способы его контроля. Значительная часть работ посвящена определению расчетных значений основных физико-механических характеристик грунтов тела и основания плотины. При этом использовались самые различные методы: от лабораторного испытания образцов до геофизического исследования массива.

Основание сооружений напорного фронта ГЭС сложено осадочными породами – песчаниками, алевролитами, аргиллитами, покрытыми в естественном состоянии слоем современного аллювия.

Основание грунтовых плотин включает толщу современного аллювия мощностью 6,6-9,0 м для островного участка правобережной плотины, до 6,0 м для руслового участка, до 4,6 м для левобережной плотины. Аллювий представлен сильноводопроницаемыми гравелисто- галечниковыми грунтами с песчаным заполнителем.

В береговых склонах основанием правобережной плотины наблюдается выклинивающаяся в откос толща древнего аллювия и прикрывающие ее делювиальные отложения.

На участке гидроузла выявлена следующая последовательность напластования сверху вниз:

верхняя алевролитовая пачка мощностью свыше 60 м;

верхняя песчаниковая пачка мощностью 10-20 м;

нижняя алевролитовая пачка мощностью 8-10 м;

– нижняя песчаниковая пачка мощностью свыше 30 м.

Указанные мощности изменяются в значительных пределах, тем не менее, выделенные пачки в границах участка сохраняют характерные особенности.

Инженерно-геологическая классификация юрских пород выполнена по структурному признаку, которым является гранулометрический состав. Песчаники крупнозернистые слабые имеют плотность 1,97-2,06 г/см3, пористость 22-25%, временное сопротивление сжатию 3-9 МПа (при водонасыщении прочность снижается в 5 раз); песчаники крупнозернистые гравелистые крепкие при той же плотности и МΠа пористости характеризуются прочностью 17-33 (при водонасыщении прочность снижается в 3 раза); песчаники среднезернистые слабые и крепкие имеют, соответственно, временное сопротивление сжатию 3 и 34 МПа, их плотность 2,0-2,1 г/см3, пористость 21-24%. Песчаники мелкозернистые отличаются большей плотностью (2,20-2,24 кг/см3) и меньшей пористостью (17-18%), их прочность составляет 44-46 МПа (при водонасыщении она снижается в 2 раза). Алевролиты слабые имеют плотность 2,11 г/см³, пористость 22%, прочность 3 МПа, алевролиты крепкие, соответственно, 2,30 г/см³, 14% и 50 МПа.

Все разновидности юрских пород (песчаники и алевролиты) имеют повышенную трещиноватость на глубину не менее 65 м. Движение воды в толще происходит по трещинам. Выявлено, что среди коренных пород, склонными к размыву по трещинам являются слабые алевролиты и выветрелые мелкозернистые песчаники, отличающиеся пылеватым тонкопесчаным составом, а также отсутствием цемента.

Современный аллювий островов и русла реки Ангары представлен гравийногалечниковыми отложениями с редкими валунами и песчаным заполнителем (20-23%). По сравнению с древнеаллювиальными галечниковыми отложениями, современный аллювий содержит меньшее количество пылевато-глинистых частиц (4-5%) и является значительно менее уплотненным и, вообще, не сцементированным [3].

Расчетные значения коэффициентов фильтрации аллювиального галечника по различным источникам информации представлены в таблице 3.2.8 [4].

По своему зерновому составу современный аллювий весьма неоднороден и каких- либо закономерностей в изменении крупности его частиц по глубине и в плане выявить в процессе инженерно-геологических изысканий не удалось.

Также, в результате выполненных при изысканиях опытных откачек воды из аллювия р. Ангары, были получены самые разнообразные значения коэффициентов фильтрации, дебитов скважин и величин понижения уровней. Коэффициент фильтрации изменялся от 219 м/сут до 1230 м/сут. Среднее значение коэффициента фильтрации для толщи аллювия в целом К=800 м/сут. [5].

Фильтрационные свойства валунно-галечниковых отложений древнего аллювия определялись в процессе изысканий опытным наливом воды в шурфы по методу Болдырева [3]. Из проведенных 23 опытов 9 выполнено в галечниках с песчаным заполнителем и 14 опытов – в галечниках с песчано-глинистым заполнителем. По данным опытов максимальное значение коэффициента фильтрации в галечниках с песчаным заполнителем получено равным 18 м/сут. Однако, учитывая некоторое несовершенство и ограниченность опытов, расчетное значение коэффициента фильтрации для толщи в целом принималось равным 40 м/сут.

Существенное различие современного аллювия и древнего состоит в том, что древние галечники значительно уплотнены, слежались и как бы сцементировались продуктами своего выветривания, что подтверждается устойчивостью вертикальных 10-ти метровых стенок в шурфах и Кочумихинском карьере [5]. Кроме того, количество заполнителя в древнем аллювии значительно больше, чем в

современном и составляет 23,3% частиц до 2 мм, в том числе пылевато-глинистых – 3,0-3,5%. Наличие заполнителя значительно снижает фильтрационные способности древнего аллювия.

Степень трещиноватости, а, следовательно, и водопроводности юрских пород на различных участках различна. У левого берега наблюдается высокая степень трещиноватости. На остальном участке створа плотины трещиноватость меньшая. Расчетное значение коэффициента фильтрации для всей толщи юрских пород по проекту принято равным 5 м/сут, для участка повышенной трещиноватости правобережного примыкания 25-30 м/сут [3].

Расчетные значения коэффициентов фильтрации юрских отложений по различным источникам информации приведены также в таблице 1.2.1.

Определенную роль в геологическом строении территории имеют пролювиально- делювиальные отложения, покрывающие коренные породы на повышенных отметках склонов долины и отложениях IV и III террас. III терраса с отметками подошвы аллювиальных отложений 429-430 м сложена галечниками мощностью 3-8 м перекрытых тяжелыми суглинками мощностью 4-5 м. По своему гранулометрическому составу отложения IV и III террас идентичны. Отложения обоих террас погребены под покровом пролювиально- делювиальных суглинков (это лессовидные отложения с Кф=0,27-0,35 м/сут).

В нижней части эти отложения представлены преимущественно тяжелыми и средними суглинкам, в верхней развиты легкие макропористые суглинки. Ближе к склону берега обе разновидности замещаются тонко и мелкозернистыми пылеватыми песками. На отдельных участках встречаются горизонты погребенной почвы. Покров пролювиально- делювиальных образований на участке гидроузла имеет среднюю мощность около 20 м [3].

Левобережный участок плотины на отм. 442,5 м располагается на пролювиально- делювиальных суглинках с коэффициентом фильтрации Кф=0,3 с/сут, ниже этой отметки – на толще древних валунно-галечниковых отложений с Кф=40 м/сут, Юрские породы (песчаники и алевролиты с Кф до 20 м/сут) залегают

на отметке 434 м (цоколь террасы вскрыт на глубине 6-8 м). Мощность валунногалечниковых отложений 4-6 м, у здания ГЭС – 11 м.

Правобережный участок примыкает к слабым алевролитам коренного склона, затем к древним валунно-галечниковым отложениям (Кф около 40 м/сут) третьей террасы мощностью до 5 м. Вглубь берега аллювий перекрыт мощной толщей пролювиально- делювиальных суглинков (Кф=0,2 – 0,4 м/сут).

	Грунт	Источники информации									
Часть ГТС		Тех.проект, 1951	Тех.отчет ВНИИГ, 1953	Тех.отчет ВНИИГ, 1953	Энергетическое строительство, 1956	Тех.отчет ВНИИГ, 1960	Тех.отчет №32НГТС, 1996	Тех.отчет ГП «Сосновгеолсервис», 2001	Тех.отчет ВНИИГ, 2003		
	Древний аллювий	40-200	15		10-40		18-40				
Основание	Современный аллювий	600-900	64	600	800-1000	600	600-900	1-15	44		
	Тоже в зоне цем. завесы	-	-	10		10	-				
	Суглинок	-	0,0002				0,2-0,3				
	Алевролит	4-5	0,004				1-10				
	Песчаник	11					10-40				
	Коренные породы	5		5		5	До 20	10	10		
	Тоже в зоне цем. завесы	0,2-0,4		10		10	-				
Ілотина	Древний аллювий	-			0,2-5,0		-				
	Современный аллювий	-		600	5-60	50	5-80	0,8	600		
	Ядро из суглинка	0,05	0,0004	0,15		0,15	0,01-0,05		0,00001		

Таблица 1.2.1. Коэффициенты фильтрации грунтов (м/сут) в основании и теле грунтовых плотин

Значения коэффициента фильтрации суглинка по различным источникам информации приведены в таблице 1.2.1. При проектных изысканиях определялись гранулометрический состав суглинка, его просадочность при замачивании, а также прочностные характеристики [6].

<u>Анализ результатов исследования свойств грунтов тела и основания</u> плотины

Грунтовые плотины по всей длине возведены отсыпкой насухо гравийногалечникового грунта с песчаным заполнителем из современного аллювия. Противофильтрационный элемент плотин – суглинистое ядро, по проекту ширина ядра понизу 14 м, поверху 3,0 м. В натуре ширина ядра выполнена больше проектной.

Грунты основания плотин – гравийно-галечниковые отложения современного аллювия мощностью 6-8 м, залегающие на коренных породах (алевролитах и песчаниках). Береговой склон в примыкании плотин сложен из пролювиально-делювиальных суглинков, мощностью до 8 м гравийногалечниковыми грунтами древнего аллювия и подстилающими коренными породами (алевролитами и песчаниками).

Островной участок плотины возведен на слое гравийно-галечниковых отложений современного аллювия мощностью 8 м. На русловом участке тело плотины опирается непосредственно на коренные породы (преимущественно песчаники). Правобережный участок плотины имеет в основании делювиально-пролювиальные суглинки, ниже которых располагается слой галечников древнего аллювия мощностью 7 м.

Для снижения скоростей фильтрационного потока в основании плотины по оси ядра выполнена цементационная завеса на глубину до 30 м. Цементация осуществлялась двумя рядами скважин. Расстояние между рядами составляло 2 м, а расстояние между скважинами в ряду – 1 м. Ряды цементационных скважин на русловых плотинах располагались внутри шпунтового коридора шириной 5 м, а в примыканиях был установлен один ряд шпунтов. Глубина забивки шпунтов не превышала 10 м.

Фильтрационные свойства шпунтового коридора исследовались методом откачки из пьезометров, установленных в цементационной завесе [7]. Результаты исследований приведены в таблице 1.3.2. В этой же работе [7] приведены результаты по определению коэффициента фильтрации суглинистого ядра плотины (таблица 1.2.3).

Были также выполнены работы по определению коэффициента фильтрации лабораторными методами: 0,15 м/сут (Дружинин, 1959 г.), 0,01 м/сут (Гинсбург, 1959 г.), 1×10⁻³ - 1×10⁻⁴ м/сут (Носова, Цареградская, 1973 г.). Ряд значений коэффициента фильтрации ПО различным источникам информации приведены в таблице 1.2.1.

По данным геотехконтроля во время строительства за 1954 - 1958 гг. плотность ρ_d уложенного в ядро суглинка находилась в пределах 1,5-1,8 г/см³, при среднем (из 4498 проб) значении ρ_d =1,67 г/см³ [8].

Физические характеристики грунтов в ядре, полученные при исследовании образцов в 1962 году [8], приведены в таблице 1.2.4.

Значительный объем лабораторных исследований свойств грунтов ядра с использованием стандартных методик выполнен в работе [9]. Некоторые результаты этих исследований приведены в таблице 1.2.5. В работе [9] также отмечается, что грунты ядра консолидированы, характеризуются твердой консистенцией и находятся, в основном, в переуплотненном состоянии (объемный вес скелета грунта 1,74-2,02 г/см3). Сцепление при естественной влажности изменяется от 0,10 до 0,22 МПа, угол внутреннего трения – от 12 до 44,5°.

		Факт	Фильтр, м				Понижание	Расчетное	Paguatuag	
№ пьезометра	Дата установки	Факт. глубина, м	Глубина верхнего края	Длина	Диаметр	Статический уровень, м	(повышение) уровня, м	понижение (повышение) уровня, м	время, мин	Кф, м/сут
1423	18.10.04	40,44	38,20	2,24	0,057	14,44	0,50	0,41	32	0,002
1523	26.12.61	35,80	35,92	-	0,051	17,19	0,53	0,03	90	0,003
1723	28.08.03	40,29	37,00	3,2	0,057	16,03	0,51	0,01	60	0,003
1921	03.09.04	37,66	36,19	1,0	0,051	22,44	0,12	0,05	7	0,0002
2123	29.03.04	36,47	34,20	2,3	0,060	28,87	0,47	0,40	70	0,000035
2221	21.07.59	34,67	35,25	-	0,064	30,59	1,32	0,02	45	0,0027
2521	02.01.63	36,08	35,24	0,85	0,064	21,19	0,30	0,02	49	0,000003

Таблица 1.2.2. Исходные данные к расчету коэффициента фильтрации шпунтового коридора

			Фильтр, м					Расчетное		
DC .	Дата	Факт.	Глубина			Статический	Понижение	понижение	Расчетное	TC 1 /
лепьезометра	установки	глубина,	верхнего	Длина	Диаметр	уровень, м	(повышение)	(повышение)	время, мин	Кф, м/сут
		М	края				уровня, м	уровня, м		
0821	17.10.03	25,02	20,38	3,00	0,064	12,33	1,09	0,10	38	
0921	18.10.02	34,40	31,50	3,10	0,057	13,09	0,81	0,03	48	0,00002
0922	01.12.04	29,00	28,44	3,00	0,057	14,24	0,84	0,03	57	0,00002
1021	18.03.04	28,30	25,20	2,50	0,057	7,76	0,80	0,80	1	0,0025
1022	15.11.04	30,12	26,20	3,00	0,057	10,78	0,80	0,80	<1	0,0025
1321	18.10.04	28,59	25,20	3,00	0,057	7,52	0,80	0,80	<1	0,0025
1322	18.10.04	29,25	25.20	3,00	0,057	11,11	0,55	0,07	70	0,00005
1510	19.09.03	31,74	29,30	2,20	0,057	8,13	0,54	0,03	56	0,00003
1524	01.01.04	33,52	31,00	2,52	0,060	10,91	0,33	0,15	50	0,0002
1622	30.07.59	32,01	31,69	0,41	0,064	19,78	0,55	0,03	135	0,00026
1623	23.04.03	32,39	29,00	4,20	0,057	7,68	0,80	0,80	<1	0,0025
1721	20.08.03	30,06	26,48	3,58	0,057	8,97	0,56	0,01	55	0,000004
1722	20.08.03	33,43	29,34	3,50	0,057	12,36	0,56	0,02	70	0,000014
1923	10.09.03	31,66	27,89	3,20	0,057	7,78	0,56	0,08	3-5	0,00011
2121	29.03.04	32,63	29,20	3,00	0,057	7,75	0,42	0,06	19	0,00028
2122	29.03.04	31,50	29,20	2,30	0,057	23,10	0,61	0,03	18	0,000036
2223	16.06.59	29,41	27,80	1,61	0,064	12,22	0,27	0,03	56	0,000036
2421	29.03.04	31,66	28,30	3,00	0,064	9,14	0,59	0,05	87	0,000056
2522	02.01.63	32,43	31,89	0,54	0,064	20,24	0,32	0,02	68	0,000064
2523	18.09.59	28,78	29,03	-	0,064	15,74	0,76	0,03	90	0,00243
2524	29.03.04	29,85	26,30	3,00	0,057	9,51	0,58	0,04	92	0,00003
2721	29.03.04	22,03	18,30	3,00	0,057	15,25	0,62	0,05	47	0,00004

Таблица 1.2.3. Исходные данные к расчету коэффициента фильтрации суглинистого ядра плотины

	ПК24+25	(скваж.107	1)	ПК24+25(скваж.1045)					
Глубина отбора, отм.	Влажность, %	Объемный вес скелета грунта, г/см ³	Коэффициент пористости	Глубина отбора, отм.	Влажность, %	Объемный вес скелета грунта, г/см ³	Коэффициент пористости		
456,66	21,6	1,64	0,658	454,62	21,1	1,67	0,629		
456,16	21,9	1,64	0,671	453,62– 452,62	18,2	1,74	0,534		
455,66	20,6	1,66	0,638	450,1	21,7	1,67	0,629		
455,16	22,6	1,64	0,671	449,1	23,2	1,61	0,677		
454,66- 454,16	21,4	1,59	0,704	448,62– 447,62	24,1	1,56	0,731		
453,66	19,4	1,72	0,593	446,1	21,6	1,66	0,620		
453,56	22,2	1,67	0,641	444,62– 444,12	22,6	1,65	0,654		
442,41	18,0	1,74	0,534	443,62	21,4	1,68	0,619		
438,66	24,0	1,63	0,650	443,12	16,1	1,80	0,529		
438,16	26,03; 26,37	1,58	0,713	442,62	18,1	1,75	0,549		
437,16	23,33; 23,51	1,65	0,635	441,62	15,4	1,84	0,494		
437,66- 436,66	20,7	1,66	0,626	440,62	16,4	1,83	0,475		

Таблица1.2.4. Физические характеристики грунтов ядра на русловом участке плотины по данным 1962 г.

Таблица1.2.5. Прочностные и деформационные характеристики пород

тела плотины в левобережном примыкании

№скважины	Глубина, м	Удельное сцепление, МПа	Удельное Угол цепление, внутреннего МПа трения, ° –		Коэффициент уплотнения при нагрузках (МПа) 0.2 0.3 0.4				
	12,6	0,08	17						
0822	27,0	0,07	17						
	30,0	0,05	22						
0922	19,0	0,02	26,5	0,027	0,012	0,010			
	7,1	0,03	26,5	0,059	0,054	0,007			
1022	10,5	0,02	22	0,031	0,017	0,014			
	14,5	0,04	22	0,037	0,033	0,033			
1021	10,0			0,016	0,007	0,008			
1021	28,6	0,08	11,5	0,028	0,007	0,013			
0710	6,0	0,02	26,5		0,014	0,021			
	12,0	0,06	17		0,015	0,018			
	17,0				0,011	0,014			

Известно [10], что упорные призмы плотины возводились из грунтового материала современного аллювия, содержащего: глинистопылеватых фракций (<0,05 мм) - <2%; песчаной фракции (0,05 - 2,00 мм) - 18%; гравийной (2-20 мм) - 38%; галечниковой (20-80 мм) - 43%; валунной (>80 мм) - 1%.

В работе [8] предложен метод расчета коэффициента фильтрации грунта призмы по его гранулометрическому составу. Вычисленные таким образом значения коэффициента фильтрации составили K1=12,06 м/сут при K1max =135,7 м/сут и K2=56,5 м/сут, при K2max=258,6 м/сут. Значения K1 и K2 соответствуют двум различным формулам расчета.

В лаборатории крупномасштабного моделирования выполнены исследования предельных значений плотности и прочностных свойств гравийно-галечных грунтов на модельных смесях [4]. По каждой грунтовой смеси выполнена серия сдвиговых испытаний при максимальной (2,25 т/м³, степень уплотнения – 0,94) и минимальной (1,95 т/м3, степень уплотнения – 0,84) значениях плотности сухого грунта. Анализ полученных данных позволяет констатировать, что содержание мелкозема 25-29% является достаточным для заполнения пор грунта и практически не влияет на прочностные характеристики грунта. Увеличение содержания мелкозема влияет незначительно сцепление грунта. С учетом числа лишь на определений и величины доверительной вероятности α=0,95, для галечного грунта рекомендованы при $\rho_d = 1.95$ т/м³tg $\phi = 0.65$ ($\phi = 33^{\circ}$); при $\rho_d = 2.25$ $T/M^{3}tg\phi=0,72 (\phi=36^{\circ}).$

Свойства грунтов, слагающих основание плотины весьма неоднородны. Так, например, классификационная характеристика Сн степени неоднородности гранулометрического состава для различных образцов древнего аллювия может отличаться в сто раз. Большая разбросанность наблюдается также для значений коэффициента фильтрации и прочностных характеристик песчаников и алевролитов. Более однородными в отношении свойств являются суглинки, уложенные в ядро плотины.

Изучение свойств грунтов тела плотины происходило, неоднократно, начиная с момента окончания строительства, в том числе были выполнены дополнительные исследования грунтов упорных призм плотин [11]. Результаты этих исследований по различным источникам информации приведены в таблице 1.2.6.

Годы		1955	1960	1965	1975	2000	2005	2010	2022
	Кф, м/сут	2×10 ⁻⁴ 15×10 ⁻²	15×10 ⁻²	15×10 ⁻² 5×10 ⁻²	1×10 ⁻⁴	5×10 ⁻²	1×10 ⁻⁵	2×10 ⁻⁴	-
Ядро	γ _{ск} , г/см ³	-	1,67	1,67	-	-	-	1,80	-
	С, МПа	-	-	0,16	-	-	-	-	-
	φ°	-	-	25	-	-	-	-	-
Шпунтовый коридор	Кф, м /сут	-	-	-	-	-	2×10^{-3} 2×10^{-4}	-	-
Упорные призмы	Кф, м/сут	600	5-60	50	-	5-80	56 0,8 600	-	-
	φ°	-	-	-	-	-	-	36	37
	С, кПа	-	-	-	-	-	-	-	36

Таблица 1.2.6. Характеристики грунтов тела плотины

Примечание: для характеристик грунтов упорных призм, полученных при исследованиях в 2022 году указаны их расчетные значения принятые в соответствии с [11].

Из таблицы видно, что наибольшее количество исследований было посвящено определению значений коэффициента фильтрации. Между тем, нужно отметить слабую сопоставимость полученных результатов. Никакой закономерности изменения значений коэффициента фильтрации во времени установить не удалось. Изменение плотности суглинка в ядре в настоящее время практически прекратилось. Грунты ядра консолидированы, характеризуются твердой консистенцией и в основном переуплотнены.

По результатам экспериментальных исследований деформируемости и прочности образцов грунта тела и основания плотины, с учетом воздействия деструктивных процессов и срока эксплуатации плотин было оценено изменение свойств грунтов во времени [12]. Исследования реономных свойств объемного и сдвигового деформирования показали, что прочностные характеристики грунтов снижаются. За последние 5 лет прочность

алевролитов снизилась на 14%, алевролито-песчаников на 10%, песчаников на 13,5%. Эти оценки относятся к образцам, полученным при бурении скважин 0705, 1523, 1525, 2678, 1922 и не носят обобщающего характера, хотя тенденция к снижению прочностных свойств грунтов наблюдается. Алевролиты основания плотины имеют степень выветрелости 80% и представляют собой суглинистый материал с нормативной прочностью на сжатие 0,252 МПа. Суглинок ядра плотины находится в консолидированном состоянии и все его параметры соответствуют техническим нормам для данного вида грунта.

1.3. Анализ выполненных ранее исследований фильтрационного режима грунтовых плотин

В данном разделе приведен краткий анализ результатов научноисследовательских работ, выполненных в период проектирования, строительства и эксплуатации исследований фильтрационного режима грунтовых плотин ГЭС [1].

В целях определения скоростей фильтрационного потока в течение ряда лет на гидроузле осуществлялись опыты с индикаторами [13,14]. При этом, как показали опыты с радиоактивными индикаторами, достоверность результатов которых является наиболее высокой, ни в одной из фиксированных наблюдательных точек не было отмечено скоростей, сколько-нибудь существенно превышающих расчетные. В то же время по натурным данным опытов с индикаторами при проведении буровых работ были получены подтверждения дефектов ядра в районе ПК15+00.

При исследованиях фильтрационного режима правобережной плотины индикаторным методом с применением электролитического типа индикаторов [15] было отмечено следующее:

— в большинстве наблюдательных скважин не обнаружено прихода индикатора, что может свидетельствовать об отсутствии системы сообщающихся нарушений сплошности (трещин) грунтового массива (или

шпунтового коридора) на участках между фильтрами пусковых и наблюдательных скважин;

– приход индикатора зафиксирован в наблюдательных скважинах в ядре на ПК25+00, что свидетельствует об относительно большей проницаемости области фильтрации между пусковой и наблюдательной скважинами по сравнению с другими измерительными створами;

– приход индикатора также зафиксирован в наблюдательной скважине, расположенной с левой стороны от галереи ликвидированного городского водопровода, что свидетельствует о более активной контактной фильтрации вдоль галереи на данном участке сооружения.

В отчете [15] сделан вывод, что в настоящий момент не наблюдается признаков нарушения сплошности противофильтрационного контура правобережной плотины на исследованных участках.

Учитывая крайне ограниченные возможности изучения потока в правобережной плотине только по информации, получаемой из зоны, непосредственно прилегающей к водоприемнику пьезометра, в целях всемерного расширения пределов контролируемой области были организованы систематические наблюдения за температурным режимом потока.

По натурным данным за температурным режимом была выявлена качественная оценка фильтрационной неоднородности ядра плотины и противофильтрационной завесы в основании, установлено местонахождение участков, повышенное проницаемости.

Одновременно с изучением температурного режима плотины разрабатывалась методика определения дренажных расходов из открытой дрены нижнего бьефа, между тем, по техническим причинам довести до конца эти разработки не удалось.

В ходе работ [16,17] исследования фильтрационного режима были выполнены для грунтового ядра правобережной плотины, противофильтрационного устройства в ее основании, а также для низовой

упорной призмы. По рекомендациям [16,17] в целях контроля низовой части потока было проведено переоборудование пьезометрической сети в низовом клине плотины.

В ходе исследований [16,17] были проведены температурные измерения, включающие термокаротаж пьезометров и измерения температуры воды в открытой дрене, а также наблюдения за уровнем воды в открытой дрене.

Результаты температурного каротажа пьезометров, проведенного в 1991г., не выявили каких-либо изменений за последние 2-5 лет эксплуатации плотины.

Общая оценка информации о температурном режиме фильтрационного потока, полученная от стационарных термодатчиков и по результатам разового термокаротажа пьезометров, выявила некоторые особенности этих данных. В частности, это очень узкий диапазон изменений температуры в потоке при достаточно широком диапазоне изменений температуры в придонном слое водохранилища. Это приводит к необходимости использования высокоточной аппаратуры, а также высокой квалификации и опыта работы наблюдателей.

Применительно к низовой упорной призме отмечено, что основной проблемой разработка надежного способа является контроля фильтрационного расхода через сооружение. В работе было предложено решение этой задачи путем организации систематических наблюдений за формой потока низовом клине осуществляемых В плотины, В фиксированных точках, расставленных ПО прямоугольной сетке. Предполагалось, что с помощью такой сетки можно будет выявить локальные или зональные изменения расхода, которые достаточно сильно отразятся на форме потока в низовом клине. В процессе практической разработки указанного способа предложено, прежде всего, выяснить степень устойчивости реальной формы потока в условиях меняющегося уровня

нижнего бъефа и определить принимаемое в качестве эталонного распределение напоров потока в низовом клине.

Обстоятельством, осложняющим эти разработки, явилось отсутствие непосредственной связи изучаемого потока с уровнем, официально принятым в качестве уровня нижнего бьефа.

Для характеристики уровня воды в дрене нижнего бьефа был установлен специальный измерительный пост, оборудованный самописцем "Валдай". Наблюдения, проводившиеся с помощью названного поста, показали, что разница уровней воды в нижнем бьефе и в открытом дренаже (дренажном озере) может достигать 20 см и более.

По результатам работ [16,17] сделаны следующие выводы и даны рекомендации:

1. Состояние плотины ГЭС нельзя считать стабилизированным. Поскольку характер развития наблюдаемых на объекте процессов является мало предсказуемым к текущему контролю за ним следует предъявлять повышенные требования.

2. Регулярный температурный контроль, осуществляемый по стационарно установленным термодатчикам, обеспечивает оперативное получение информации о сооружении. Однако, узкий диапазон изменений температуры обусловливает обязательность высокой точности измерений и соответствующей квалификации наблюдателей.

3. По всей видимости, наличие относительно устойчивой формы потока в низовом клине плотины дает возможность для наблюдений за изменениями фильтрационных расходов в нижний бьеф путем выявления нарушений эталонного положения поверхности депрессии. Вместе с тем, установившееся распределение пьезометрические напоров в низовом клине и представляется аномальным и требует специального обоснования и выяснения причин.

В работе [18] предпринята попытка решения весьма сложной (для грунтовой плотины ГЭС с очень неоднородным строением основания и

сложными конструктивными схемами сооружений) задачи по разработке прогнозных математических моделей процесса фильтрации в теле и основании плотины, которые можно было бы использовать для адекватной интерпретации данных натурных наблюдений при оценке технического состояния и эксплуатационной безопасности этих конструктивных элементов плотины.

Работа состоит из двух частей, в которых рассматриваются проблемы создания и оценки работоспособности, а также адекватности, соответственно, детерминистических и статистических расчетных моделей движения фильтрационного потока и изменений пьезометрических напоров в теле плотины и в ее основании.

В части, относящейся к детерминистическим моделям фильтрации, были уточнены расчетные характеристики фильтрационной проницаемости материалов тела плотины и ее основания, описаны методики численных с использованием МКЭ и аналоговых с помощью ЭГДА исследований фильтрации в элементах сооружения, указан состав проведенных исследований, приведены их результаты, а также оценена адекватность этих результатов имеющимся натурным данным.

По результатам исследований и их сопоставлению с натурными данными утверждается, что фактический режим фильтрации в теле плотины и ее основании намного сложнее предпосылок, заложенных в проекте, в частности:

 большая часть фильтрационных расходов из верхнего в нижний
 бьеф поступает через коренные породы, не попадая в низовую призму и аллювиальный слой основания;

– на участках, где противофильтрационное устройство в основании плотины не доходит до кровли песчаников имеется возможность поступлений фильтрационного потока из коренных пород в аллювиальный слой и низовую призму плотины в обход завесы;

 величины расходов обходного потока свидетельствует о завышении расчетных коэффициентов фильтрации песчаников и алевролитов;

 невязки в величинах расчетных и фактических значений расходно-уровневых характеристик фильтрации свидетельствуют о недостаточном соответствии выбранных расчетных моделей натуре и о необходимости их уточнения;

градиенты напоров, рассчитанные по результатам
 моделирования во всех вариантах, меньше критических по условиям
 фильтрационной прочности значений;

– депрессионные поверхности фильтрационного потока в низовой упорной призме, прогнозируемые при частичном нарушении ядра и противофильтрационного устройства в основании, располагаются ниже предельной (по условию обеспечения статической устойчивости низового откоса плотины) линии насыщения грунта в низовой призме.

В части, относящейся к статистическим фильтрационным моделям, обработки описаны полученные на основании натурных данных регрессионные прогнозные модели пьезометрических уровней В конструктивных элементах тела плотины и в ее основании, представленном различными инженерно-геологическими слоями.

Помимо отмеченного, в работе [18] рассмотрены вопросы оценки фильтрационной прочности грунтовых материалов тела плотины и ее основания.

В целом по результатам исследований в работе [18] сделаны следующие выводы и даны инженерные рекомендации по обеспечению фильтрационной безопасности правобережной плотины:

1. Общую фильтрационную прочность грунтов в ядре, аллювиальном слое основания, цементационной завесе и в слое алевролитов можно считать обеспеченной.

2. Фильтрационную прочность противофильтрационной завесы в аллювиальном слое основания, состоящей из двух рядов шпунта и зацементированного между ними аллювиального грунта, можно считать обеспеченной только при условии целостности шпунтовых стенок.

3. Местная фильтрационная прочность суглинка ядра обеспечена по отношению к контактному выпору и контактному размыву.

4. Ядро плотины и противофильтрационная завеса (шпунтовая и цементационная) до сего времени выполняют противофильтрационную защиту плотины и основания, поскольку фактические уровни фильтрационного потока не превышают критериев безопасности, а уровни воды в пьезометрах, расположенных в песчаниках, имеют тесную связь с уровнями нижнего бьефа и слабую – с уровнями верхнего бьефа.

5. При всех сочетаниях нагрузок общая и местная устойчивость откосов плотины соответствует требованиям нормативных документов.

Экспериментально-теоретические проблемы использования температурно- фильтрационного метода контроля процессов фильтрации в правобережной грунтовой плотине рассмотрены в 1994 г. в работе [19].

В названной работе отмечено, что в фильтрационном отношении правобережная плотина ГЭС являются весьма сложным сооружением. Плотина возведена из гравийно-галечниковых грунтов с центральным ядром из моренных суглинков, с противофильтрационным устройством в основании в виде 2-х рядного шпунта, не во всех сечениях добитого до водоупора, с заинъектированными в межшпунтовом коридоре сильно водопроницаемыми слоями руслового аллювия верхнего слоя основания, которое подстилается практически водонепроницаемыми алевролитами. Столь пестрое основание, композитная конструкция тела плотины и непостоянные вдоль ее продольной оси геометрические размеры ПФУ, обуславливают как аналогового, так и математического сложности моделирования фильтрационных процессов в сооружении, неадекватность результатов интерпретации данных натурных наблюдений и затруднения в

установлении обоснованных критериев безопасности плотины по показателям фильтрационных процессов.

В [19] описаны результаты аналогового моделирования (с использованием ЭГДА) картины фильтрации в ряде характерных сечений плотины, а также математического моделирования (с использованием метода конечных элементов - МКЭ). Показано, что в обоих методах решения фильтрационной задачи для плотины ГЭС результаты этого моделирования зачастую существенно отличались от натурных данных.

Вместе с тем по результатам этих исследований сделано заключение о том, что основные потери фильтрационных напоров приурочены к ядру и ПФУ в основании. Места разгрузки фильтрационного потока в верхнем слое основания расположены в низовой упорной призме непосредственно за ядром; далее на участке от ядра до дренажной траншеи скорости фильтрации имеют около нулевые значения.

Утверждается, что обоснованные и однозначные суждения о целостности ПФУ в плотине практически невозможны без данных о фактических значениях фильтрационных расходов, которые на островном и русловом участках не измеряются.

Отмеченное приводит к тому, что полученные результаты аналогового и численного моделирования фильтрационных процессов в плотине могут рассматриваться только в качестве ориентировочных, что не позволяет их использовать при назначении количественных критериев безопасности плотины по фильтрационным показателям.

Результаты термокаротажных исследований, проведенных в теле плотины и ее основании в 1994 г., показали, что в связи с конструктивными особенностями плотины, пестротой строения основания, а также малыми колебаниями уровней воды в верхнем и нижнем бьефах, проконтролировать количественные изменения фильтрационных расходов с использованием разовых замеров температуры воды в пьезометрах невозможно.

Более того, анализ полученных в натурных условиях данных показал, что основная часть тепла, связанного с нестационарными изменениями температуры воды в водохранилище, поглощается в теле верховой упорной призмы и в ее основании. В связи с этим, при оценке скоростей движения в теле плотины были использованы показания изменений температуры в парах смежных пьезометрических скважин. Эти измерения показали, что скорости фильтрации воды в плотине и ее основании не выходят за границы диапазона 0.3-1.0 м/сут. Уровень этих показателей существенно ниже значений, допустимых по условиям недопущения механической суффозии грунтов тела плотины и основания.

Для увеличения достоверности результатов определений скоростей фильтрации воды с использованием термокаротажа было рекомендовано проводить такие измерения не периодически, а непрерывно.

В работе [20] составлены предложения по контролю и оценке состояния шпунтово-цементной противофильтрационной преграды в основании плотины:

– провести термофильтрационное обследование плотин ГЭС с целью выявления зон повышенной фильтрации в шпунтовом коридоре. По результатам обследования разработать проект установки дополнительной КИА для контроля термофильтрационного режима шпунтового коридора;

организовать постоянные наблюдения за температурой в пьезометрах шпунтового коридора и пьезометрах 1411, 1511, 1912, 2411, 2512;

 пробурить по оси шпунтового коридора скважины под пьезометры на участках «пропарин» и тонкого льда, и на участках ранее выявленных дефектов шпунтовых стенок.

При проходке скважин проводить оценку его водопроницаемости грунтов:
организовать постоянные наблюдения за температурой воды
водохранилища по глубине с периодичностью один раз в неделю и
температурой воды в нижнем бьефе;

один раз в год проводить в пьезометрах гидрохимическое
опробование и опытно-фильтрационные работы экспресс методом;

 опытно фильтрационные работы необходимо также выполнять при повышении температуры цемзавесы выше среднегодовой температуры водохранилища или увеличении годовой амплитуды колебания температуры цемзавесы в контролируемой точке;

 величину коррозии шпунтовой стенки можно ориентировочно оценить по коррозии ствола неработающего пьезометра 2221, если извлечь его из скважины.

Таким образом, результаты анализа ранее выполненных исследований фильтрации в правобережной плотине ГЭС (на ее островном, русловом и береговом участках) позволяют утверждать следующее:

1. Названные исследования проводились с начала эксплуатации гидроузла и выполнялись практически всеми известными в настоящее время методами, в том числе: расчетно-аналитическими (c использованием аналогового моделирований), пьезометрическими (с математического И использованием натурных данных о положении в элементах плотины депрессионной поверхности), индикаторными (с использованием натурных данных о скоростях распространения воды, маркированной разного рода индикаторами), термометрическими (с использованием натурных данных о фильтрационного тепломассопереноса), геофизическими процессах (c использованием данных о скоростях прохождения упругих волн в грунтах и их электрической проницаемости) и др.

2. По утверждению авторов большинства указанных работ недостаточная результативность выполненных исследований связана с отсутствием в составе этих исследований волюмометрических методов

(связанных с прямыми или опосредованными измерениями фильтрационных расходов через элементы плотины).

3. В связи с весьма неоднородным по длине плотины и вдоль ее подземного контура характером движения фильтрационных вод, создание сколько-нибудь адекватной расчетно-аналитической модели для прогнозного определения фильтрационных расходов через тело плотины и ее основание практически невозможно.

4. В выводах рассмотренных работ приведены рекомендации того, что эффективный и результативный контроль безопасности фильтрационных процессов в плотинах ГЭС должен включать своевременное выявление возможных нарушений сплошности или каких-либо иных дефектов в противофильтрационных устройствах плотины И ee основания. Местоположение таких дефектов, являющихся следствием нештатного воздействия на плотину, в общем случае заранее определить практически невозможно. Из распространенных видов инструментальных наблюдений этим требованиям более всего отвечают наблюдения за фактическим расходом дренажных устройств и в значительно меньшей степени методы контроля, осуществляемого с помощью пьезометров. По техническоэкономическим обстоятельствам на описываемом гидроузле основным видом регулярных наблюдений были наблюдения за пьезометрическими напорами.

Далее приведены результаты, представленные в серии отчетов Института земной коры СО РАН, которые посвящены геофизическим исследованиям физических свойств (в том числе и фильтрационных) элементов грунтовых плотин ГЭС, выполнявшихся в период 1994-2007 гг. [22, 24].

В обобщающем отчете описаны основные конструктивные особенности плотин ГЭС и особенности инженерно-геологических условий площадки их размещения, обоснован выбор инструментальных методов и методик обработки данных геофизических измерений, дана оценка физического состояния грунтовых плотин по результатам геофизических

измерений, обобщены результаты начального этапа режимных геофизических измерений, изучена в первом приближении динамика физического состояния выделенных ослабленных зон насыпной плотины по данным режимных геофизических измерений.

По результатам исследований в работе [24] сделаны следующие выводы:

1. В теле грунтовых плотин в первом приближении выделены слои гравийно- галечных водонасыщенных и воздушно-сухих грунтов. Для каждого из этих слоев определены численные значения скоростей Р-волн и S-волн.

2. По простиранию насыпи выделены участки напорного фронта с пониженными значениями скоростей в сечениях на ПК10, ПК14, ПК15, ПК16, ПК24 - ПК26. Характер изменения плотности грунтов, по всей видимости, соответствует характеру распределения скоростей. Однако количественные оценки этой связи затруднены, поскольку плотность грунта и скорости имеют свои особенности изменения в зависимости от состава, влажности и процентного содержания глинистой фракции.

3. По ядру плотины слой суглинков с поверхности до глубины около 8 м практически однороден и только на ПК8-10 и 13-16 выделяется слой с пониженными значениями скоростей. Относительно низкую плотность суглинки имеют в зонах выше УГВ, более высокая плотность соответствует слою суглинков, расположенному ниже УГВ.

4. В теле плотины существует дифференцированность грунтов по электрическим свойствам, обусловленная различиями состава и строения грунтов, их водонасыщенностью и технологическими факторами. Однако выявить и проследить четкие каналы и пути фильтрации по результатам измерений электрических свойств грунтов не удалось.

5. В суглинистом ядре определены аномалии, связанные с неоднородностью физико-механических свойств, которые были оценены по

изменениям коэффициента пористости, рассчитанного по геофизическому параметру пористости.

6. Результаты исследований показали, что:

 в теле плотины под воздействием природных и техногенных факторов происходят процессы, вызывающие флуктуации фильтрационных параметров, причем определенную направленность этих процессов установить не удалось;

 распределение геофизических параметров вдоль оси плотины показывает, что русловая и островная плотины различаются по их значениям, а фильтрационные свойства русловой плотины вызывают большее беспокойство;

– выявленные аномалии по данным метода ЕП показывают их активизацию на участках сопряжений суглинистого ядра с примыкающими элементами плотины, общий характер фильтрационного поля характеризуется наличием многих сосредоточенных водотоков;

 надежность выводов о параметрах фильтрации подтверждается их сопоставимостью с результатами работ предшественников и анализом распределения уровней и напоров по данным пьезометрических режимных наблюдений;

– в целом, сделано заключение о фильтрационной устойчивости обследованных участков плотины.

В 2011 г. СибНИИГом были проведены экспериментальные исследования физико- механических свойств грунтов тела плотины ГЭС и ее основания, результаты которых приведены в работе [25].

Названные исследования проводились в лабораторных условиях на образцах материалов тела плотины и ее основания, полученных без нарушения структуры их существующего сложения. Образцы были отобраны при проходке пяти скважин колонкового бурения, предназначенных для установки дополнительных пьезометров в теле плотины и в ее основании.

Для проведения лабораторных испытаний были представлены образцы суглинков грунтов ядра плотины, бетона зуба и плиты, сопрягающей ядро с основанием, а также пород основания плотины, представленного перемежающимися относительно тонкими слоями песчаников и алевролитов.

Испытания физико-механических свойств грунтовых материалов выполнялись с использованием компрессионных и сдвиговых приборов конструкции Гидропроекта.

Образцы горных пород из основания плотины испытывались в приборе трехосного сжатия с диаметром рабочей камеры 250 мм.

Сопоставление значений физикорасчетных характеристик механических свойств, полученных по результатам проведенных испытаний, с аналогичными характеристиками, полученными ранее и использованными при разработке проекта ГТС данной станции, позволили оценить степень изменения свойств испытанных материалов за длительное время эксплуатации гидроузла ГЭС.

По результатам экспериментальных исследований в работе [25] сделаны следующие выводы:

1. Суглинок ядра плотины ГЭС, в целом, имеет нормальную консолидацию с модулем деформации более 10 МПа, что соответствует Его прочностные свойства проекту. также достаточно высоки И соответствуют своему назначению материалу как для противофильтрационного элемента плотины.

2. Алевролиты основания плотины имеют степень выветривания свыше 80% и представляют собой практически суглинистый материал с нормативной прочностью на сжатие 0.252 МПа. Характеристика их прочности на сдвиг - *f* н =18.5° и C= 0.0745 МПа.

3. Алевролиты с включением песчаника имеют прочность на сжатие около 0.7 МПа. Характеристика их прочности на сдвиг - fн =19.1° и C= 0.13 МПа.

4. Песчаник левобережного примыкания имеет прочность на сжатие до 5.5 МПа. Песчаник правобережного примыкания имеет прочность до 10.0 МПа. Характеристика их прочности на сдвиг - f = 20.3° и с= 1.265 МПа.

5. Бетон плиты в основании плотины имеет прочность на сжатие около 25.0 МПа.

6. Бетон зуба плотины имеет прочность на сжатие до 13.6 МПа.

7. За время эксплуатации гидроузла физико-механические свойства суглинка ядра плотины практически не претерпели существенных изменений. Значительных отклонений характеристик от полученных ранее их значений не обнаружено.

8. Породы верхних слоев основания в настоящее время представляют собой практически суглинистую массу с обломками слабо прочных алевролитов и песчаников.

9. Бетон зуба плотины имеет весьма низкую прочность на сжатие, а бетон сопрягающей плиты в основании обладает высокой прочностью.

1.4. Анализ результатов ранее выполненных научноисследовательских работ по оценке состояния правобережной плотины

В рамках данной работы выполнен анализ отчетной документации по научно- исследовательским работам по оценке состояния правобережной плотины, выпущенной за современный период в период с 2020 по 2023 год.

1. Технический отчет «Комплексное обследование правобережной грунтовой плотины ИГЭС», ООО «Спецгеосервис», 2020 г.[21].

В рамках данной работы выполнено:

 обследование участка правобережной грунтовой плотины с ПК13 по ПК34 с применением методов георадиолокации (на ПК20 - ПК34);
электротомографии (на ПК20 - ПК34) и естественного электрического поля (на ПК13 – ПК34);

 анализ результатов натурных наблюдений за правобережной плотиной с оценкой фильтрационных и деформационных процессов системы «сооружение-основание»;

 – расчетные исследования напряженно-деформированного состояния правобережной плотины, суффозионной прочности грунтов тела и основания плотины, оценка устойчивости системы «сооружениеоснование»;

– разработаны рекомендации по усилению системы контроля правобережной плотины и дальнейшим исследованием ее состояния для обеспечения безопасности и надежности ГТС в условиях ее дальнейшей длительной эксплуатации.

На основании данных, полученных в ходе выполнения комплексного обследования правобережной плотины, можно отметить следующее:

Результаты обследования плотины геофизическими методами не выявили каких- либо признаков наличия негативных фильтрационных процессов в плотине на ПК14 – ПК33. На участке устройства шпунтового фильтрационный коридора поток равномерно распределен, что свидетельствует об удовлетворительном состоянии зоны противофильтрационного контура В аллювиальных отложениях правобережной Дренажная правобережной плотины. система части плотины работает эффективно.

Межли тем. необходимо понимать, что для отслеживания происходящих изменений фильтрационного режима системы «плотина – ее основание» необходимо проведение регулярных обследований теме же методами, по тем же профилям. Полученные данные обследования геофизическими методами свидетельствуют лишь 0 текущем фильтрационном режиме плотины, без оценки динамики его развития во времени. Для данных целей наиболее всего походит анализ данных натурных наблюдений.

По результатам анализа данных натурных наблюдений отмечено следующее:

– фильтрационный режим руслового участка плотины характеризуется уровнями воды в низовой упорной призме близкими уровню нижнего бьефа и пьезометрическими напорами в основании плотины, превышающими уровень нижнего бьефа на несколько метров. Аналогичные особенности фильтрационного режима наблюдаются и на островном участке плотины;

– фильтрационный режим правобережного участка плотины, в связи с особенностями конструкции плотины и геологическим строением основания плотины на данном участке, отличаются относительно высокими пьезометрическими уровнями в теле плотины и сильной корреляционной связью показаний большинства пьезометров с изменением УВБ;

 из сопоставления фактических максимальных градиентов напора с критериями их безопасности следует, что общая фильтрационная прочность грунтов в ядре обеспечена;

 наблюдается сильная корреляционная связь между величинами расхода в дренажной системе правобережной части плотины и изменениями уровня воды в верхнем бьефе. Не выявлено направленной динамики увеличения наблюдаемых значений расходов;

 графики осадок глубинных марок, установленных на правобережной плотине, в целом, имеют затухающий характер развития.
Годовые значения приращений осадки крайне незначительны;

– графики большинства поверхностных марок, установленных на правобережной плотине, имеют затухающий характер. Исключение составляют марки, расположенные на участке сопряжения правобережной плотины со зданием ГЭС, характер осадок которых близок к линейному. Интенсивность осадок в настоящий момент не столь значительна (до 1 мм/год);

При анализе данных натурных наблюдений обнаружены следующие аномалии фильтрационного поведения системы «правобережная плотина – ее основание»:

– в измерительном створе на ПК15+00 в пьезометрах, расположенных у оси плотины с фильтрами в ядре на различных отметках (1521, 1522), наблюдаются уровни воды идентичные УВБ и полностью повторяющие его колебания;

на участке плотины от ПК18+00 до ПК25+00 с 2016 года начали отмечаться изменения фильтрационного режима, проявляющиеся в повышении пьезометрических уровней в аллювиальных отложениях под призмой. Вследствие низовой данного явления изменилась функциональная связь показаний пьезометров с уровнем воды в нижнем бьефе, что, в свою очередь, вызвало превышение критериев безопасности показаний пьезометров низовой упорной призмы. Как показали расчетные модельные исследования, причиной дополнительного обводнения низовой призмы может быть нарушения сплошности противофильтрационного контура плотины, как в области шпунтового коридора, так и в ядре плотины;

– пьезометрические уровни, наблюдаемые в шпунтовом коридоре на ПК24+25, значительно выше, чем в шпунтовом коридоре в сечениях островной части плотины, что подтверждает наличие отмечавшихся еще при строительстве гидроузла дефектов шпунтового коридора;

– справа от оси сооружения №4 на ПК27+37 (по течению) наблюдаются значительно более высокие пьезометрические уровни, чем с противоположной стороны, что, вероятно, указывает на более активную контактную фильтрацию с правой стороны сооружения;

– показания пьезометров, расположенных со стороны нижнего бьефа от линии дренажа плотины на участке ПК29+60 – ПК30+80, с середины 2016 года стали характеризоваться отклонениями от ранее наблюдавшейся функциональной связи с УВБ. На этом участке дренажной

системы также впервые было отмечено появление воды в колодце К-5. Вероятной причиной данного явления может быть техногенный фактор, связанный с притоком фильтрационных вод со стороны объектов гражданского строительства, активно развивающихся на данном участке;

– в период 2018-2019 гг. были достигнуты исторические максимумы зафиксированных расходов в колодцах К-6 и К-8. Вероятно, это можно объяснить высоким стоянием УВБ в этот период и относительно коротким рядом наблюдений за величиной расхода при схожих высоких уровнях верхнего бьефа;

в 2019 году при относительно более низких отметках в верхнем бьефе по сравнению с 2018 годом, в дренажных колодцах К-9, К-12 и К-13 зафиксированы наибольшие значения расходов, чем в 2018 году; при этом в колодцах К-9 и К-12 зафиксированы исторические максимумы величин расходов. В случае повторения ситуации при дальнейшей эксплуатации можно будет констатировать о развитии фильтрационных процессов на данном участке плотины и необходимости дополнительных исследований причин выявленных аномалий;

 отмечены утечки части фильтрационного расхода между колодцами К-9 и К-10, что свидетельствует о непроектной работе дренажной системы на этом участке;

– на графиках осадок поверхностных марок створа 3 можно отметить «места перегиба» (островной участок в районе 2013 года, русловой – в районе 2016 года), в которых характер деформационного процесса низового клина изменился с затухающего на близкий к линейному. В настоящий момент, сделать однозначный вывод о развитии негативных деформационных процессов в низовом клине плотины преждевременно – необходимо получить более длительный ряд наблюдений за осадками, подтверждающий или опровергающий изменение характера деформирования плотины;

Результаты проведенных расчетных исследований позволяют сделать вывод о том, что фильтрационная прочность, а также статическая и сейсмическая устойчивость правобережной плотины ГЭС в сечениях на ПК21+00 и ПК24+25 в настоящий момент являются обеспеченными и соответствуют требованиям, предъявляемым к сооружениям I класса. Необходимо неимением результатов отметить, что за современных инженерных изысканий на плотине в качестве исходных данных для расчетного моделирования системы «сооружение основание» использовались результаты исследований прошлых лет, а также некоторые упрощения.

В целом, техническое состояние правобережной плотины можно признать работоспособным. С учетом отмеченного, обеспечения ДЛЯ технически исправного состояния правобережной плотины ee И безопасности В условиях длительной эксплуатации комплекса ГТС разработаны рекомендации.

По результатам комплексного обследования правобережной плотины ГЭС выявлена необходимость выполнения следующих мероприятий, направленных на обеспечение безопасности и надежности правобережной плотины:

выполнение инклинометрических измерений фильтровых пьезометров, колонн фильтры которых ПО паспортным данным расположены в противофильтрационном устройстве плотины И ee основания (ядро, шпунтовый коридор);

 пространственное моделирование системы «правобережная плотина—основание» на участке ПК18-ПК25 с оценкой влияния нарушения сплошности противофильтрационного контура на фильтрационный режим низовой упорной призмы;

 инструментальное обследование состояния плит крепления верхового откоса плотины на ПК18+00 - ПК25+00 на предмет наличия подплитных полостей;

 мониторинг химического состава воды в дренажной системе на участке ПК29+60 – ПК30+80 и его сравнение с химическим составом воды из водохранилища;

 исследования с применением геофизических методов участка дренажной системы правобережной плотины между колодцами К-9 и К-10;

– лабораторные исследования песчано-гравелистых грунтов упорных призм плотины в приборах, размер которых позволяет учитывать наличие крупных отдельностей, с целью уточнения прочностных и деформационных характеристик грунтов данного элемента плотины;

– исследования по определению расчетных акселерограмм землетрясений уровня ПЗ и МРЗ на различных участках плотины.

Для усиления системы мониторинга состояния правобережной плотины ГЭС, увеличения оперативности получения данных натурных наблюдений и своевременного выявления возможных нарушений сплошности или каких-либо иных дефектов в противофильтрационных устройствах плотины и ее основания рекомендуется:

разработка и реализация проекта дооснащения КИА правобережной плотины;

разработка и реализация средств автоматизированного опроса
КИА правобережной плотины;

 разработка и реализация проекта организации стационарной системы мониторинга состояния ядра правобережной плотины с помощью электротомографии.

2. Технический отчет «Проведение многофакторных исследований напорных ГТС Иркутской ГЭС», ООО«Спецгеосервис», 2020 г.[2]

МФИ выполнены в соответствии с рекомендациями СТО 02.03.119-2015. «Гидротехнические сооружения гидроэлектростанций. Методические рекомендации по выполнению многофакторных исследований». В рамках данной работы выполнен анализ:

 соответствия нагрузок и уровней природных и техногенных воздействий, расчетным значениям, принятым в проекте;

изменений природных условий и техногенных воздействий,
произошедших в период эксплуатации ГТС;

соответствия фактических характеристик материалов ГТС и их оснований проектным значениям;

– соответствия эксплуатационных параметров ГТС, их основания и примыканий значениям, заложенным в проекте, а также требованиям современных нормативных документов;

– соответствия показателей состояния ГТС их критериальным значениям.

В рамках данной работы дана оценка:

 достаточности контрольно-измерительной аппаратуры (КИА) и достоверности ее показаний;

современного технического состояния ГТС;

– прочности и устойчивости ГТС ГЭС с учетом, выявленных по результатам анализа изменений характеристик материалов и интенсивности расчетных нагрузок и воздействий, произошедших за период эксплуатации ГТС.

Подготовлены рекомендации, направленные на обеспечение надежности и безопасности ГТС ГЭС в условиях их длительной эксплуатации.

По результатам анализа нагрузок и уровней природных и техногенных воздействий на

ГТС расчетным значениям, отмечено следующее:

1. Анализ уровневого режима верхнего и нижнего бьефов ГЭС за период современной эксплуатации (2000-2019 гг.) показал, что ГТС эксплуатируются в диапазоне проектных отметок УВБ и УНБ. Более того, за

отмеченный период эксплуатации не наблюдалось случаев форсировки УВБ выше НПУ=457,00 м.

2. В период наблюдений 2000-2019 гг. температурный режим окружающей среды, в целом, более благоприятен для комплекса ГТС ГЭС: среднегодовая температура за последние 20 лет эксплуатации составила +1,3 °C, что на 2,4 °C выше х значений, предусмотренных в проекте.

3. Температура поверхностных слоев воды в верхнем бьефе сезонно колеблется в пределах от близких к 0 °C до + 22.3 °C; в нижнем бьефе - в пределах +0.1 + 16.6 °C (максимальная в период июль – сентябрь; минимальная в период январь-март).

4. Проектные значения сейсмических воздействий на ГТС ГЭС соответствуют современным требованиям к расчетным сейсмическим воздействиям на ГТС I класса, размещенным в сейсмоактивном районе.

<u>Анализ соответствия показателей состояния ГТС их критериальным</u> значениям. Обоснованность назначения критериев безопасности ГТС.

По результатам анализа данных натурных наблюдений за правобережной плотиной отмечено следующее:

Фильтрационный режим руслового участка плотины характеризуется уровнями воды в низовой упорной призме близкими к уровню нижнего бьефа и пьезометрическими напорами в основании плотины, превышающими уровень нижнего бьефа на несколько метров. Аналогичные особенности фильтрационного режима наблюдаются и на островном участке плотины.

Фильтрационный режим правобережного участка плотины, в связи с особенностями конструкции плотины и геологическим строением основания плотины на данном участке, отличается относительно высокими пьезометрическими уровнями в теле плотины и сильной корреляционной связью показаний большинства пьезометров с изменением УВБ.

Из сопоставления фактических максимальных градиентов напора в ядре плотины с критериями их безопасности следует, что общая фильтрационная прочность материала ядра обеспечена.

Анализ корреляционной связи изменения уровня верхнего бьефа и величин фильтрационного расхода в дренажной системе правобережного участка плотины показал, что для всех измерительных створов наблюдается сильная корреляционная связь между величинами расхода и изменениями уровня воды в верхнем бьефе. Не выявлено направленной динамики увеличения наблюдаемых значений расходов.

Графики осадок глубинных марок, установленных в правобережной плотине, в целом, имеют затухающий характер развития. Годовые значения приращений осадок крайне незначительны (не более 0,8 мм за период между циклами наблюдений 2019 и 2020 годов).

Графики большинства поверхностных марок, установленных на правобережной плотине, имеют затухающий характер. Исключение составляют марки, расположенные на участке сопряжения правобережной плотины со зданием ГЭС, характер осадок которых слабозатухающий. Между тем, интенсивность осадок в настоящий момент не столь значительна, чтобы проводить дополнительные исследования участка сопряжения правобережной плотины со зданием ГЭС.

Обнаружены следующие особенности фильтрационного поведения системы «правобережная плотина – ее основание»:

В ПК15+00 измерительном створе на В пьезометрах, расположенных у оси плотины с фильтрами в ядре на различных отметках (1521, 1522), наблюдаются уровни воды идентичные УВБ и полностью колебания. Ранее повторяющие его В ходе проведения опытов С индикаторами, проведении буровых работ были получены при подтверждения дефектов ядра в районе ПК15.

На участке плотины от ПК18+00 до ПК25+00 с 2016 года начали
отмечаться изменения фильтрационного режима, проявляющиеся в

повышении пьезометрических уровней в аллювиальных отложениях под низовой призмой. Вследствие данного явления изменилась функциональная связь показаний пьезометров с уровнем воды в нижнем бьефе, что, в свою очередь, вызвало превышение критериев безопасности показаний пьезометров низовой упорной призмы, назначенных с помощью регрессионных моделей.

– Пьезометрические уровни, наблюдаемые в шпунтовом коридоре на ПК24+25 по данным пьезометра 2423, значительно выше, чем в шпунтовом коридоре в сечениях островной части плотины. Именно на этом участке шпунтовый коридор имеет дефекты и непроектную конструкцию.

– Справа от оси сооружения №4 на ПК27+37 (по течению) по данным пьезометров (2712-2756) наблюдаются значительно более высокие пьезометрические уровни, чем с противоположной стороны (по данным пьезометров 2711-2755), что, вероятно, указывает на более активную контактную фильтрацию с правой стороны сооружения.

– Показания двух пьезометров 2961 и 3061 на участке ПК29+60 – ПК30+80, расположенных со стороны нижнего бьефа от линии дренажа плотины, с середины 2016 года стали характеризоваться отклонениями от ранее наблюдавшейся функциональной связи с УВБ. На этом участке дренажной системы также было отмечено появление воды в колодце К-5. Вероятной причиной данного явления может быть техногенный фактор, связанный с притоком фильтрационных вод со стороны объектов гражданского строительства, активно развивающихся на данном участке. Для подтверждения этого предположения, необходимо провести химический анализ воды в дренажной системе на данном участке сооружения, а также сравнение результатов химического анализа фильтрационных вод с водой из водохранилища.

В период 2018-2020 гг. были достигнуты исторические максимумы зафиксированных расходов в колодцах К-9, К-10 и К-12 (для К-9: 391,3 л/мин и для К-10: 352,9 л/мин при УВБ=456,36 м 16.09.2020 г.; для

К-12: 574,5 л/мин при УВБ=456,49 м 29.10.2019 г.). Необходимо отметить, что измерению расходов в дренажной системе правобережной плотины 16.09.2020 предшествовали ливневые дожди, продолжавшиеся в период с 12.09.2020 по 15.09.2020.

В 2019-2020 гг. при относительно более низких отметках в верхнем бьефе по сравнению с 2018 годом, в дренажных колодцах К-9, К-12 и К-13 зафиксированы исторические максимумы величин расходов. В случае повторения характера изменения величины дренажного расхода в колодцах правобережного участка плотины в последующие годы наблюдений, аналогично характеру, отмеченному в 2018-2019 гг., когда рост величины расходов в дренаже не определялся внешней нагрузкой (УВБ), можно будет констатировать о негативных фильтрационных процессах на данном участке плотины И необходимости дополнительных исследований причин выявленных аномалий. При этом при проведении замеров, необходимо дополнять инструментальный замер величины расхода информацией о, наблюдавшихся накануне, атмосферных осадках.

Отмечены потери части фильтрационного расхода между колодцами К-9 и К-10. Анализ данных натурных наблюдений за величиной дренажного расхода в этих соседних колодцах с 2000 года показал, что превышение величин расхода в колодце К-9 фиксировалось на всем протяжении наблюдений, что свидетельствует о непроектной работе дренажной системы на этом участке. Для определения места утечки и пути дальнейшей фильтрации воды из дренажной системы рекомендуется проведение исследований с применением геофизических методов.

– На графиках осадок поверхностных марок створа 3 можно отметить «места перегиба» (в районе 2015-2016 гг.), в которых характер деформационного процесса низового клина изменился с затухающего на близкий к линейному. В настоящий момент, сделать однозначный вывод о развитии негативных деформационных процессов в низовом клине плотины преждевременно – необходимо получить более длительный ряд наблюдений

за осадками, подтверждающий или опровергающий изменение характера деформирования плотины.

Обоснованность назначения критериев безопасности ГТС

Критерии безопасности для диагностических показателей состояния правобережной плотины разработаны с учетом анализа данных натурных наблюдений с использованием статистических методов прогнозирования изменения значений диагностических показателей.

В Критериях безопасности Иркутской ГЭС [29] достаточно подробно описаны методики назначения критериев безопасности. Примененные методики отвечают требованиям современных нормативных требований к назначению критериев безопасности.

Между тем, в ходе анализа данных натурных наблюдений сделан вывод, что по некоторым пьезометрам правобережной плотины критериальные значения назначены чрезмерно консервативно и требуют уточнения с учетом удлиненного ряда наблюдений.

Также при пересмотре критериев безопасности по величине дренажного расхода необходимо учитывать возможность влияния поверхностных осадков на величину расходов.

Оценка достаточности контрольно-измерительной аппаратуры и достоверности ее показаний

По результатам оценки достаточности имеющейся на правобережной плотине контрольно-измерительной аппаратуры и достоверности ее показаний можно отметить следующее:

1. Деформационное состояние плотины и ее основание контролируется с помощью глубинных и поверхностных марок. В ходе эксплуатации ГТС часть КИА была утрачена (глубинные марки), некоторые элементы, наоборот, были дооснащены геодезическими марками (крепление верхового откоса, гребень плотины). В целом, с учетом стабильного деформационного поведения плотины количество геодезической КИА достаточно, достоверность ее показаний не вызывает сомнений.

2. Вследствие конструктивных особенностей плотины на ее островном и русловом участках, контроль величины дренажных расходов организован только на правобережном участке в смотровых колодцах трубчатого дренажа.

В ходе анализа данных наблюдений отмечено, что существующий волюметрический метод определения дренажного расхода не может считаться достаточно точным. Также было отмечено, что существующая периодичность наблюдений за дренажными расходами недостаточна для накопления представительного ряда наблюдений: как показал замер расходов в сентябре 2020 года, на величину расходов существенно влияют поверхностные осадки.

Вследствие вышесказанного необходимо рассмотреть вопрос по совершенствованию системы мониторинга величины расходов в дренажной системе.

3. Инструментальное обследование фильтровых колонн пьезометрической сети правобережной сети позволило сделать вывод, что в большинство пьезометров находится в работоспособном состоянии.

В некоторых пьезометрических створах не ведется контроль пьезометрических уровней в песчаниках основания, что требует точечной доработки схемы размещения пьезометров в рамках проекта дооснащения КИА правобережной плотины. Рекомендуется рассмотреть вопрос автоматизированной системы опроса пьезометрической КИА для усиления системы мониторинга ГТС.

Оценка прочности, устойчивости и долговечности ГТС и их оснований с учетом, выявленных по результатам анализа изменений характеристик материалов и интенсивности расчетных нагрузок и воздействий, произошедших за период эксплуатации ГТС.

Результаты обследования правобережной плотины геофизическими методами не выявили каких-либо признаков наличия негативных фильтрационных процессов в плотине на ПК14 – ПК33. На участке

устройства шпунтового коридора фильтрационный поток равномерно распределен, что свидетельствует об удовлетворительном состоянии зоны противофильтрационного контура в аллювиальных отложениях правобережной плотины. Дренажная система правобережной части плотины работает эффективно.

По результатам подводно-технического обследования железобетонных плит верхового откоса правобережной плотины не отмечено значительных дефектов, снижающих эксплуатационную пригодность крепления.

Результаты проведенных расчетов позволяют сделать вывод о том, что фильтрационная прочность, статическая И сейсмическая а также устойчивость правобережной плотины ГЭС в настоящий момент являются требованиям, обеспеченными И соответствуют предъявляемым К сооружениям I класса.

По результатам выполненного многофакторного исследования напорных ГТС ГЭС их техническое состояние можно признать работоспособным.

По результатам выполненных многофакторных исследований напорных ГТС ГЭС необходимо выполнить следующие мероприятия, направленных на обеспечение безопасности и надежности правобережной плотины:

провести в 2025 году комплексное обследование правобережной плотины;

выполнить инклинометрические измерения фильтровых колонн
пьезометров, фильтры которых по паспортным данным расположены в
противофильтрационном устройстве плотины и ее основания (ядро,
шпунтовый коридор);

– провести специальные исследования индикаторными методами;

– выполнить пространственное моделирование системы «правобережная плотина – основание» на участке ПК18-ПК25 с оценкой

влияния нарушения сплошности противофильтрационного контура на фильтрационный режим низовой упорной призмы;

 выполнить инструментальное обследование состояния плит крепления верхового откоса плотины на ПК18+00 - ПК25+00 на предмет наличия подплитных полостей;

 провести мониторинг химического состава воды в дренажной системе на участке ПК29+60 – ПК30+80 и его сравнение с химическим составом воды из водохранилища;

 провести исследования с применением геофизических методов участка дренажной системы правобережной плотины между колодцами К-9 и К-10;

 провести техническое обследование элементов дренажной системы правобережной плотины;

 провести лабораторные исследования песчано-гравелистых грунтов упорных призм плотины в приборах, размер которых позволяет учитывать наличие крупных отдельностей, с целью уточнения прочностных и деформационных характеристик грунтов данного элемента плотины;

 провести исследования по определению расчетных акселерограмм землетрясений уровня ПЗ и МРЗ на различных участках плотины.

Для усиления системы мониторинга состояния правобережной плотины ГЭС, увеличения оперативности получения данных натурных наблюдений и своевременного выявления возможных нарушений сплошности или каких-либо иных дефектов в противофильтрационных устройствах плотины и ее основания рекомендуется:

разработать и реализовать проект дооснащения КИА правобережной плотины;

разработать и реализовать проект автоматизированной системы
опроса фильтрационной КИА правобережной плотины.

3. Технический отчет «Техническое обследование дренажной системы грунтовых плотин, в том числе геофизические исследования участка дренажной системы правобережной плотины между колодцами К-9 и К-10», ООО «Спецгеосервис», 2022г.[1]

Цель работы: техническое обследование дренажной системы грунтовых плотин, в том числе геофизические исследования участка дренажной системы правобережной плотины между колодцами К-9 и К-10.

В процессе данной работы были выполнены:

– анализ работы дренажной системы грунтовых плотин по данным натурных наблюдений;

– визуальное обследование элементов дренажной системы грунтовых плотин и близлежащей территории;

– инструментальное обследование дренажной системы грунтовых плотин (видеокаротаж дренажных труб, обмерные работы элементов дренажной системы, геофизическое обследование участка правобережной плотины вдоль трассировки труб дренажной системы между колодцами К-9 и К-10);

расчетные исследований фильтрационного режима системы
«плотина – основание» с учетом фактического состояния дренажной системы в плоской постановке;

– разработаны рекомендации по усилению системы контроля грунтовых плотин и по дальнейшим исследованиям ГТС для обеспечения безопасности и надежности грунтовых плотин в условиях их длительной эксплуатации.

Результаты проведенных исследований позволили сделать следующие выводы:

1. По результатам анализа данных натурных наблюдений:

 показания пьезометра установленного на участке сопряжения правобережной плотины со зданием ГЭС свидетельствуют об эффективном гашении напора на ПФУ и металлической диафрагме;

– фильтрационный режим руслового участка правобережной плотины характеризуется уровнями воды в низовой упорной призме близкими к уровню нижнего бьефа и пьезометрическими напорами в основании плотины, превышающими уровень нижнего бьефа на несколько метров. Аналогичные особенности фильтрационного режима наблюдаются и на островном участке плотины. Отмечено, что в створе на ПК19+00 напоры в основании имеют большую величину, чем в остальных измерительных створах на островном и русловом участках плотины;

– анализ показаний пьезометров с фильтрами в шпунтовом коридоре на островном и русловом участках правобережной плотины свидетельствует об относительно более высоких пьезометрических уровнях воды в шпунтовом коридоре на ПК24+25, что свидетельствует о дефектах в верхнем шпунтовом ряде и подтверждается данными исполнительной документации;

фильтрационный режим правобережного участка правобережной плотины, в связи с особенностями конструкции плотины и геологическим строением основания плотины на данном участке, отличается относительно высокими пьезометрическими уровнями в теле корреляционной связью показаний большинства плотины и сильной УВБ пьезометров с изменением отмечена неоднородность фильтрационного режима на участке размещения сооружения №4 в теле правобережного участка плотины. Справа от оси сооружения №4 на ПК27+37(по течению) по данным пьезометров (2712-2756) наблюдаются более значительно высокие пьезометрические уровни, чем c противоположной стороны (по данным пьезометров 2711-2755), что, вероятно, указывает на более активную контактную фильтрацию с правой стороны сооружения;

 по пьезометрам, расположенным в правобережном примыкании правобережной плотины, не наблюдается динамики развития негативных фильтрационных процессов;

– в период 2018-2020 гг. были зафиксированы исторические максимумы дренажных расходов в большинстве измерительных створов правобережной плотины. вероятно, это можно объяснить высоким стоянием УВБ в эти периоды и относительно коротким рядом наблюдений за величиной расхода при схожих высоких уровнях верхнего бьефа. В 2021-2022 гг. не отмечено дальнейшего роста дренажных расходов при относительно высоких уровнях воды в водохранилище;

 анализ показаний пьезометров, размещенных в левобережном примыкании левобережной плотины, свидетельствует об эффективной работе суглинистого экрана левого берега признаков развития негативных фильтрационных процессов в примыкании не наблюдается;

– фильтрационный режим левобережной плотины стабилен, показания части пьезометров, установленных в низовой упорной призме, ее основании, а также в береговом примыкании за плотиной, влияет режим верхнего бьефа. вероятно, связь с УВБ осуществляется преимущественно через аллювиальные отложения берегового примыкания, где проходят наиболее активные процессы фильтрации;

 как и в основании правобережной плотины, в песчаниках бортового примыкания и основания левобережной плотины наблюдаются напоры, превышающие УНБ на несколько метров.

2. По результатам визуального и инструментального обследования дренажной системы грунтовых плотин отмечено:

 выходов сосредоточенной фильтрации или оползневых явлений на берегах дренажного озера не выявлено;

 на участках вдоль трассы трубчатого дренажа плотин не зафиксированы просадки грунта, суффозионные воронки, выходы фильтрационных вод или намокание участков откосов;

 конструктивные элементы дренажных колодцев находятся в удовлетворительном состоянии;

– более 50% всех дренажных труб колодцев имеют засорение камнями и/или песком. В связи с отсутствием результатов ранее проведенных обследований дренажной системы грунтовых плотин, оценить динамику процесса засорения дренажных труб не представляется возможным.

геофизических 3. Анализ результатов исследований участка дренажной системы правобережной плотины между колодцами К-9 и К-10 позволил выявить два аномальных участка. Всеми тремя методами исследований (ЕП, МЗТ, георадарное исследование) геофизических определены участки с аномальными величинами как градиента ЕП, так и п отенциала МЗТ на ПК27+75 и ПК28+20. На этих же участках, на радарограммах прослежи- ваются нарушения границ под острыми углами одних к другим. В целом, отмеченные участки можно интерпретировать как участки грунтового массива с повышенной степенью водонасыщенности грунтов.

4. Результаты проведенных расчетов позволяют сделать вывод о том, что фильтрационная прочность, а также статическая и сейсмическая устойчивость правобережной плотины ГЭС в расчетных сечениях на ПК27+00 и ПК27+60 в настоящий момент являются обеспеченными и соответствуют требованиям, предъявляемым к сооружениям I класса.

В сечении на ПК27+00 дренажное устройство используется только для отвода дренажных вод, поступающих с более высоких отметок, и не способствует понижению депрессионной поверхности. В сечении на ПК27+60 выход из строя дренажного устройства приведет к выходу депрессионной поверхности на низовой откос плотины и скажется, в первую очередь, на показаниях пьезометра 2761 (рост на 4.3 м).

Обобщая вышесказанное, в настоящий момент техническое состояние дренажной системы правобережной плотины можно признать как

ограниченно работоспособное, вследствие частичного засорения дренажных труб.

Причиной потери части дренажного расхода между колодцами К-9 и К-10 является отвод части фильтрационного потока мимо системы дренажа в направлении нижнего бьефа, вероятнее всего, через дефекты и нарушения сплошности дренажной системы, возникших на участке замещения проницаемых грунтов основания суглинистым материалом в период строительства. Наличие подобного дефекта подтверждено тремя методами геофизических исследований на пикете ПК28+20, расположенном между колодцами К-9 и К- 10.

Рекомендации по обеспечению безопасности грунтовых плотин:

Для поддержания технически исправного состояния дренажной системы грунтовых плотин в условиях длительной эксплуатации комплекса ГТС, а также грунтовых плотин в целом, разработаны следующие рекомендации:

1. По результатам комплексного анализа данных натурных наблюдений за фильтрационным режимом грунтовых плотин ГЭС выявлена необходимость выполнения следующих мероприятий, направленных на обеспечение безопасности ГТС:

 мониторинг химического состава воды в дренажной системе на участке ПК29+60 – ПК30+80 и его сравнение с химическим составом воды из водохранилища.

Для усиления системы мониторинга состояния грунтовых плотин ГЭС, увеличения оперативности получения данных натурных наблюдений и своевременного выявления возможных нарушений сплошности или какихлибо иных дефектов в противофильтрационных устройствах плотин и их основания рекомендуется:

разработка и реализация проекта дооснащения КИА правобережной плотины;

разработка и реализация автоматизированной системы опроса
КИА грунтовых плотин.

2. По результатам комплексного обследования дренажной системы грунтовых плотин выявлена необходимость выполнения следующих мероприятий, направленных на обеспечение безопасности ГТС:

 заменить изношенные ходовые скобы на лестничные спуски (аналогичной конструкции с уже существующими в большинстве колодцев);

восстановить маркировку и выполнить покраску ДК16;

восстановить заглушку дренажной трубы ДК14 согласно проекту;

восстановить маркировку для колодцев левобережной плотины
№1, 18, 23, 25;

 провести мероприятия по фиксации треснувшего кольца в ДК2 (правобережная плотина). Возможным вариантом ремонта является установка скоб, препятствующих дальнейшему раскрытию существующей трещины;

 разработать техническое решение и в соответствии с ним выполнить прочистку дренажных труб от камней/песка/мусора, а также дна колодцев от строительного и бытового мусора согласно ведомости дефектов;

– вести журнал визуальных наблюдений за состоянием дренажной системы, в т.ч. предусмотреть ежегодный осмотр дренажных колодцев;

провести повторное обследование дренажной системы
грунтовых плотин в 2027 году.

3. По результатам геофизических исследований, в связи с обнаружением мест вероятного нарушения целостности дренажной системы правобережной плотины рекомендуется дополнительные исследования дренажной системы методами электротомографии, естественного

электрического поля и выборочно методом заряженного тела (при наличии воды в колодцах).

4. Технический отчет «Инклинометрические измерения фильтровых колонн пьезометров в противофильтрационном устройстве правобережной плотины и ее основании и специальные исследования индикаторными методами правобережной плотины, обследование пьезометрической сети с помощью индикаторов-маркеров Иркутской ГЭС», ООО «Спецгеосервис», 2022 г.[22]

Цель работы:

 инклинометрические измерения с целью уточнения пространственного положения фильтровых колонн пьезометров, размещенных в правобережной грунтовой плотине ГЭС;

 определение в ходе специальных исследований основных кинематических характеристик фильтрационного потока из водохранилища ГЭС через систему «правобережная плотина – ее основание» с помощью индикаторных методов.

В ходе работы выполнено:

инклинометрические измерения 44 пьезометров правобережной плотины;

– выборочный видеокаротаж пьезометрических скважин правобережной плотины, в дальнейшем использовавшихся в качестве пусковых и наблюдательных скважинах при специальных исследованиях;

 специальные исследования индикаторным методом на 15-ти измерительных створах правобережной плотины;

 разработка рекомендаций по результатам выполненных инклинометрических и специальных исследований.

Выполненные инклинометрические измерения показали, что среднее смещение забоя скважины относительно устья составляет ≈ 0.8 м, максимальное отклонение – 2.3 м выявлено у пьезометрической скважины

1623 (направление в сторону ВБ), что дает возможность заключить, что качество проходки скважин достаточно высокое.

Результаты специальных исследований индикаторным методом позволили сделать следующие выводы:

– в большинстве наблюдательных скважин не обнаружено прихода индикатора, что может свидетельствовать об отсутствии системы сообщающихся нарушений сплошности (трещин) грунтового массива (или шпунтового коридора) на участках между фильтрами пусковых и наблюдательных скважин.

– приход индикатора зафиксирован в наблюдательных скважинах в ядре на ПК25+00, что свидетельствует об относительно большей проницаемости области фильтрации между пусковой и наблюдательной скважинами по сравнению с другими измерительными створами.

– приход индикатора также зафиксирован в наблюдательной скважине, расположенной с левой стороны от галереи ликвидированного городского водопровода, что свидетельствует о более активной контактной фильтрации вдоль галереи на данном участке сооружения.

– необходимо отметить, что имеющаяся пьезометрическая сеть правобережной плотины не во всех измерительных створах соответствует целям проведения исследований индикаторными методами. Это связано как с большим расстоянием между пусковой и наблюдательной скважиной, так и не самым удачным размещением их фильтров.

В целом, в настоящий момент не наблюдается признаков нарушения сплошности противофильтрационного контура правобережной плотины на исследованных участках. Между тем, учитывая высокую сейсмичность района размещения ГЭС, следует контролировать динамику изменения фильтрационных свойств грунтов ядра правобережной плотины и шпунтового коридора в ее основании путем периодических повторных специальных исследований индикаторными методами.

По результатам специальных исследований индикаторным методом рекомендуется выполнить следующие мероприятия:

 провести расширенные специальные исследования индикаторным методом на ПК25+00;

 – разработать и реализовать проект размещения исследовательских скважин для проведения периодических исследований индикаторными методами с целью контроля динамики изменения фильтрационных свойств грунтов ядра плотины;

– выполнять с периодичностью раз в 5 лет повторные специальные исследования индикаторными методами (по аналогичной методике) для контроля динамики изменения фильтрационных свойств грунтов ядра плотины и проницаемости шпунтового коридора в ее основании.

5. Технический отчет «Инструментальное обследование защитного крепления верхового откоса правобережной плотины филиала ООО «ЕвроСибЭнерго- Гидрогенерация» ИГЭС, ООО «ИЦ «ЕвроСибЭнерго», 2022 г. [23]

Цель работы: определение технического состояния крепления верхового откоса правобережной плотины.

В процессе работы были выполнены:

инструментальное обследование с определением прочности
бетона (неразрушающим методом), фотофиксацией и составлением
ведомости дефектов;

 укрупненные обмеры плит верхового откоса с определением их геометрических размеров.

В ходе обследования измерялись прочность и глубина раскрытия трещин бетонных конструкций. Согласно результатам измерений, глубина поверхностных трещин в плитах крепления верхового откоса составила от 30 до 160 мм. Определения прочности строительных конструкций с использованием прибора Оникс-2.5 производилось методом ударного

импульса, который заключается в регистрации энергии удара, возникающей в момент соударения бойка с поверхностью бетона.

Согласно результатам выполненных испытаний материалов конструкций, на прочность неразрушающим методом (ударный импульс), установлено:

прочность бетона плит крепления верхового откоса в пределах
от 17,1 МПа до 24,3 МПа, что в среднем соответствует марке бетона М150.

В результате обследования конструкций плит крепления верхового откоса было выявлено:

 деструкция и коррозионное разрушение поверхности плит (в том числе с оголением арматуры) в результате гидроабразивного износа и морозного выветривания;

трещины в теле бетона плит шириной раскрытия до 2,5мм и глубиной от 30 до 160 мм;

 сколы, вывалы бетона участков плит ряда Б в зоне переменного смачивания, в том числе с оголением и коррозией арматуры;

локальные просадки плит ряда А в районе стыка с плитами
ряда Б, а также плит ряда Б в зоне переменного смачивания;

искривление горизонтальной поверхности плит, образование
бермы шириной до 0,5 м на участках между ПК18+30 и ПК19+90, между
ПК22+10 и ПК22+50, а также между ПК22+60 и ПК32+80 (дефект
бетонирования);

разрушение межплитных стыковых швов;

 прорастание растительности в швах и трещинах, захламление техногенным мусором и бытовыми отходами поверхности плит ряда Б на участке между ПК32+50 и ПК32+70.

В ходе обследования в характерных местах визуально выявленных локальных просадок плит ряда А (ПК19+10, ПК19+30, ПК19+50, ПК19+60, ПК19+70 – ПК19+90, ПК20+20, ПК20+30) было выполнено выборочное бурение отверстий для зондирования эндоскопом на предмет обнаружения

полостей между плитой и ленточным однослойным фильтром из гравия. В результате зондирования были выявлены полости глубиной до 5 см, а также определено несоответствие толщины плит данным техпаспорта.

Техническое состояние конструкций плит крепления верхового откоса оценивается как работоспособное, за исключением мест и участков, указанных в ведомостях дефектов, их состояние оценивается как ограниченно-работоспособное.

Рекомендации:

независимо ОТ ремонтных работ, типа принятые работы конструктивные решения И ПО приведению строительных конструкций в работоспособное техническое состояние, не должны негативного оказывать влияния на нормальную эксплуатацию обследуемого сооружения и ухудшать состояние существующих основных несущих конструкций;

 продолжать наблюдение за осадками поверхностных и глубинных марок правобережной плотины;

 произвести геофизические исследования плит крепления верхового откоса правобережной плотины с составлением подробной карты-развертки с расположением участков с полостями под плитами крепления в течении 5 лет (не позднее 2027 года);

 установить мониторинг локальных просадок плит крепления верхового откоса правобережной плотины;

- выполнить ремонт разрушенных швов между плитами;

 в случае появления новых дефектов, не установленных данным обследованием, либо при прогрессии существующих необходимо провести мероприятия по внеочередному комплексному обследованию сооружения;

следующее обследование выполнить не позднее 2027 года.

2. АНАЛИЗ ДАННЫХ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ПРАВОБЕРЕЖНОЙ ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНОЙ ГЭС НА УЧАСТКЕ ПК18 – ПК25

На участке ПК18 – ПК25 правобережной плотины выполняется инструментальный контроль за деформационным и фильтрационным режимом системы «сооружение – основание».

2.1. Анализ наблюдений за фильтрационным режимом правобережной плотины на участке ПК18-ПК25

Рассматриваемый участок ПК18 – ПК25 с ПК18+00 до ПК23+30 относится к островному участку, с ПК23+30 до ПК25+00 к русловому участку правобережной плотины. Контроль фильтрационного режима рассматриваемого участка ведется по показаниям пьезометрической сети, пьезометрические створы расположены на ПК 18+00.

Схема размещения фильтрационной КИА приведена на рисунке 2.1.1.



Рисунок 2.1.1. Схема размещения фильтрационной КИА на правобережной плотине

Контроль пьезометрических уровней воды на ПК18+00 выполняется по показаниям пяти пьезометров. Фильтры пьезометров 1851, 1861, 1871 расположены в аллювиальных грунтах основания и характеризуют фильтрационный режим низовой упорной призмы плотины. Показания рассматриваемых пьезометров имеют выраженную корреляционную связь с колебаниями уровня нижнего бьефа. Фильтры пьезометров 1852, 1873 расположены в песчаниках основания, также характеризуются корреляцией характера колебаний показаний пьезометрических уровней с данными УНБ.

Контроль пьезометрических уровней воды в створе на ПК19+00 ведется по десяти пьезометрам. Пьезометры, расположенные со стороны верхнего бьефа, фильтры которых расположены в грунтах основания 1911, 1912 (аргиллитах и древнем аллювии), а также пьезометр 1923, фильтр которого расположен в ядре показывают уровни близкие к уровню верхнего бьефа, характер изменений коррелируется с УВБ. Понижение показаний пьезометра 1911, вероятно вызвано его промывкой, выполненной в сентябре 2017 года (рисунок 2.1.2).



Рисунок 2.1.2. – Графики уровней воды в пьезометрах, расположенных на ПК19+00 в верховой призме (1911,1912, 1923)

Показания пьезометров 1922, 1921, фильтры которых расположения в противофильтрационных элементах плотины (в ядре по оси плотины и шпунтовом коридоре) также коррелируются с уровнем верхнего бьефа. В показаниях пьезометра 1922, фильтр которого расположен в ядре плотины отмечается резкий рост уровня воды на 6,8 м в период с мая по июнь 2023 года (рисунок 2.1.3).



Рисунок 2.1.3. – Графики уровней воды в пьезометрах, расположенных на ПК19+00 внутри противофильтрационного элемента (1921, 1922)

Показания пьезометров, расположенных на ПК 19+00 в низовой призме плотины, показывают следующее:

 показания пьезометров 1971, 1961, фильтры которых размещаются в аллювиальных грунтах основания низовой призмы плотины коррелируются с показаниями уровня нижнего бьефа;

– показания пьезометров 1952, 1973, фильтры которых расположены в песчаниках основания коррелируют с характером изменения уровня воды в нижнем бьефе, разница в показаниях с УНБ составляет до 5,5 м.


Рисунок 2.1.4. – Графики уровней воды в пьезометрах, расположенных на ПК19+00 в основании низовой упорной призмы (1952, 1961, 1971, 1973, 1974)

Контроль пьезометрических уровней воды в створе на ПК20+00 ведется по трем пьезометрам 2051, 2061, 2071, фильтры которых расположены в аллювиальных грунтах основания под низовой призмой плотины. Показания всех пьезометров коррелируются с показаниями УНБ



(рисунок 2.1.5).

Рисунок 2.1.5. – Графики уровней воды в пьезометрах, расположенных на ПК20+00 в основании низовой упорной призмы (2051,2061,2071)

Контроль пьезометрических уровней воды в створе на ПК21+00 ведется по восьми пьезометрам. Фильтры пьезометров 2121, 2122 расположены в теле ядра плотины с верховой стороны и в центральной части, фильтр пьезометра 2123 расположен в шпунтовом коридоре.

На рисунке 2.1.6 приведены графики изменения уровней воды в пьезометрах 2121, 2122, 2123 из которых видно, что показания пьезометра 2121 имеют функциональную связь в УВБ, показания пьезометров 2122, 2123 не имеют выраженной связи с УВБ, при этом значительно коррелируют между собой.



Рисунок 2.1.6. – Графики уровней воды в пьезометрах, расположенных на ПК21+00 в теле ядра плотины (2121, 2122, 2123)

На рисунке 2.1.7 приведены графики изменений уровней воды в пьезометрах 2152, 2173, фильтры которых расположены в песчаниках основания низовой призмы, характер изменений показаний пьезометров коррелируется с изменениями УНБ и превышает значения УНБ до 3,5 м. Графики изменений уровней воды в пьезометрах 2151, 2161, 2171 (рисунок 2.1.7), фильтры которых расположены в аллювиальных отложениях низовой призмы, показания указанных пьезометров повторяют характер изменений УНБ и практически совпадают.



Рисунок 2.1.7. – Графики уровней воды в пьезометрах, расположенных на ПК21+00 в основании низовой упорной призмы (2151, 2161, 2171, 2152, 2173)

Контроль пьезометрических уровней воды в створе на ПК22+00 ведется по трем пьезометрам 2251, 2261, 2271, фильтры которых расположены в аллювиальных грунтах основания низовой призмы плотины. Показания всех пьезометров коррелируются с показаниями УНБ (рисунок 2.1.8).





Контроль пьезометрических уровней воды в створе на ПК22+80 ведется по пяти пьезометрам. На рисунке 2.1.9 приведены графики изменений уровней воды в пьезометрах 2222, 2223, 2224, фильтры которых расположены в ядре плотины, как видно из графика показания пьезометров имеют прямую связь с УВБ, в показаниях 2223, расположенного в верховой части ядра наблюдается падение напора. Фильтр пьезометра 2221 расположен в шпунтовом коридоре, как видно из графика, характер изменений показаний пьезометра не имеет прямой корреляции с УВБ, прослеживается незначительная динамика понижения уровня воды в пьезометре, единичный скачек уровня воды вероятно может быть вызван проверкой чувствительности пьезометра.



Рисунок 2.1.9. – Графики уровней воды в пьезометрах, расположенных на ПК22+80 в теле ядра плотины (2222, 2223, 2224)

На рисунке 2.1.10 показан график изменений уровня воды в пьезометре 2252, фильтр которого расположен в аллювиальных грунтах основания исходя из графика видна корреляция показаний уровня воды в пьезометре с отметками УНБ.



Рисунок 2.1.10. – Графики уровней воды в пьезометре, расположенном на ПК22+80 в низовой призме плотины (2252)

Контроль пьезометрических уровней воды в створе на ПК23+00 ведется по шести пьезометрам. Фильтры пьезометров 2352, 2373 расположены в песчаниках основания коррелируются с характером изменения уровня воды в нижнем бьефе, разница в показаниях с УНБ составляет до 4 м. Фильтры пьезометра 2351 расположен в гравийногалечниковых грунтах тела плотины, фильтр пьезометра 2361, 2371 расположены в древнеаллювиальных грунтах основания низовой призмы плотины.

На рисунке 2.1.11 приведены графики изменений уровней воды в пьезометрах 2351, 2361, 2371 как и отмечалось ранее фильтрационный режим данного створа характеризуется превышением показаний уровня нижнего бьефа для пьезометров 2352, 2373 до 4 м и корреляцией показаний уровня воды в пьезометрах низовой призмы плотины с отметками УНБ.



Рисунок 2.1.11. – Графики уровней воды в пьезометре, расположенном на ПК23+00 (2352,2373, 2351, 2361, 2371)

Контроль пьезометрических уровней воды в створе на ПК24+00 ведется по трем пьезометрам. Фильтры пьезометров 2461, 2471 расположены в аллювиальных грунтах основания низовой упорной призмы плотины, пьезометр 2410 расположен выше оси плотины пред шпунтовым коридором, фильтр пьезометра расположен в песчаниках основания.

Как видно из графиков на рисунке 2.1.12, показания уровней воды в пьезометрах 2461,2471 имеют выраженную связь с уровнем нижнего бьефа, отметки уровней воды в пьезометрах близки к УНБ, график на рисунке 2.1.13 показывает, что показания пьезометра 2410, характеризуется связью с уровнем верхнего бьефа. Контроль фильтрационного режима в ядре в данном створе не ведется.



Рисунок 2.1.13. – Графики уровней воды в пьезометре, расположенном на ПК24+00 (2410)

Контроль пьезометрических уровней воды в створе на ПК24+25 ведется по двенадцати пьезометрам. Фильтры пьезометров 2411, 2412, расположены перед шпунтовым коридором,2413, 2421, 2422 в ядре плотины, 2423 в шпунтовом коридоре. Показания пьезометров 2411, 2412, как видно из графика на рисунке 2.1.14 характеризуются близостью значений к УВБ, показания пьезометров 2421, 2422 фильтры, которых расположены также в ядре плотины, но на более низки отметках характеризуются некоторым понижением отметок уровней воды.



Рисунок 2.1.14. – Графики уровней воды в пьезометрах, расположенных на ПК24+25(2411, 2412, 2413, 2421, 2422, 2423)

Контроль фильтрационного режима низовой призмы плотины выполняется по следующим пьезометрам:

– пьезометры 2453, 2475 с фильтрами, расположенными в аллювиальных грунтах основания. Как видно из графиков на рисунке 2.1.15 показания уровней воды в пьезометрах характеризуются превышением отметок уровня нижнего бьефа до 6 м;

– пьезометры 2454, 2462, 2472, фильтры которых размещены в гравийно-галечниковых грунтах современного аллювия (насыпные грунтытела плотины). На рисунке 2.14, видна функциональная зависимость показаний уровней воды в пьезометрах с УНБ, значение показаний уровней воды в пьезометрах практически совпадают с УНБ;

– пьезометр 2475, фильтр которого размещен в песчаниках основания, характеризуется показаниями уровней воды в пьезометре,

превышающем УНБ, также, как и в пьезометрах, расположенных в аллювиальных грунтах основания (рисунок 2.1.15).



Рисунок 2.1.15. – Графики уровней воды в пьезометрах, расположенных на ПК24+25 в основании низовой призмы плотины (2453, 2454, 2462, 2472, 2475)

Контроль пьезометрических уровней воды в створе на ПК25+00 ведется по двенадцати пьезометрам. Фильтр пьезометра 2511 расположен в гравийно-галечниковых грунтах современного аллювия, 2512 в алевролитах основания, 2524 в ядре плотины.

На рисунке 2.1.16 приведены графики уровней воды в пьезометрах 2511, 2512, 2524 характеризующиеся видимой связью показаний уровней воды в пьезометрах с отметками верхнего бьефа.



Рисунок 2.1.16. – Графики уровней воды в пьезометрах, расположенных на ПК25+00 (2511, 2512, 2521, 2522, 2523, 2524)

На рисунке 2.1.16 приведены графики уровней воды в пьезометрах 2522, 2523, расположенные в центральной части расширенного ядра плотины и 2521, фильтр которого расположен в шпунтовом коридоре. Единичные скачки уровня воды в пьезометре вероятно могут быть вызваны с проверкой чувствительности.

Стоит отметить, что как показано на рисунке 2.1.17, показания пьезометров, фильтры которых размещены в шпунтовом коридоре на русловой части плотины (ПК24+25) значительно выше чем на островном участке плотины (1921, 2123, 2221). Единичные скачки уровня воды в пьезометре вероятно могут быть вызваны с проверкой чувствительности. Пьезометры, размещенные в шпунтовом коридоре, имеют достаточно выраженную корреляционную связь с уровнем верхнего бьефа.



Рисунок 2.1.17. – Графики уровней воды в пьезометрах, расположенных в шпунтовом коридоре (1921, 2123, 2221, 2423, 2521)



Рисунок 2.1.18. – Графики уровней воды в пьезометрах, расположенных на ПК25+00 в основании и теле низовой призмы плотины (2551, 2561, 2571, 2552, 2572)

Контроль фильтрационного режима низовой призмы плотины на ПК25+00 выполняется по следующим пьезометрам:

– пьезометры 2551, 2561, 2571, фильтры которых размещены в гравийно-галечниковых грунтах современного аллювия (насыпные грунты тела плотины). На рисунке 2.17, видна функциональная зависимость показаний уровней воды в пьезометрах с УНБ, значение показаний уровней воды в пьезометрах практически совпадают с УНБ;

 пьезометры 2552, 2572, фильтр которых размещены в песчаниках основания, характеризуется показаниями уровней воды в пьезометрах, превышающих УНБ (рисунок 2.1.18).



Рисунок 2.1.19. – Графики уровней воды в пьезометрах, расположенных в основании низовой призмы плотины (1952, 1973, 2152, 2173, 2352, 2373, 2475)

На рисунке 2.1.19 приведены графики изменения фильтрационного режима в низовой призме плотины по пьезометрам 1952, 1973, 2152, 2173, 2352, 2373, 2475, фильтры которых расположены в песчаниках основания. Как отмечалось ранее, характер колебаний уровней воды в рассматриваемой группе пьезометров характеризуется выраженной корреляционной зависимость с колебаниями уровня нижнего бьефа. Во всех рассматриваемых

створах отмечается превышение уровней воды в пьезометрах отметок УНБ на 3-6 м, наибольшее превышение наблюдается на ПК19+00 (1952).

На основании выполненного анализа материалов натурных наблюдений за фильтрационным режимом правобережной плотины на участке ПК18-ПК25 можно отметить следующее:

– анализ показаний уровней воды в пьезометрах, фильтры которых расположены в шпунтовом коридоре показывает, наличие более высоких пьезометрических уровнях воды в шпунтовом коридоре на ПК24+25, в что может быть обусловлено дефектами шпунтового коридора, отступлением от проектной работы конструкции, что также подтверждается материалами исполнительной документации;

 фильтрационный режим исследуемого участка плотины в больше степени характеризуется показаниями пьезометрических уровней воды в низовой упорной призме плотины, имеющими явно выраженную корреляционную зависимость с колебаниями уровня нижнего бьефа;

– исследуемый участок плотины, также характеризуется наличием пьезометрических напоров в основании низовой призмы плотины, наибольшее превышение отметок УНБ за период с января 2017 г. по июль 2023 г. составляет от 3 до 6 м и наблюдается на ПК19+00 (пьезометр 1952).

2.2 Анализ наблюдений за деформационным поведением правобережной плотины на участке ПК18-ПК25

Вертикальные перемещения правобережной плотины на участке ПК18-ПК25контролируются путем измерения осадок поверхностных марок, расположенных в четырех продольных створах:

– Створ 1 расположен на гребне, со стороны верхнего бьефа;

- Створ 2 – на гребне, со стороны нижнего бъефа;

– Створ 3 - на средней берме низовой упорной призмы на отметке 447,0 м;

Створ 4 - на нижней берме низовой упорной призмы на отметке 431,0 м.

Схема размещения высотных марок на правобережной плотине ГЭС приведена на рисунке 2.2.1.



Рисунок 2.2.1. – Схема размещения высотных марок на правобережной плотине

Далее приведены результаты анализа данных инструментальных натурных наблюдений за правобережной плотиной на участке ПК18 – ПК25.

Графики вертикальных перемещений поверхностных марок правобережной плотины на участке ПК18-ПК25 в период с 2006 по 2022 год в четырех контрольных створах представлены на рисунках 2.2.2 – 2.2.5.



Рисунок 2.2.2. – Графики вертикальных перемещений поверхностных марок в створе «1»



Рисунок 2.2.3. – Графики вертикальных перемещений поверхностных марок в створе «2»



Рисунок 2.2.4. – Графики вертикальных перемещений поверхностных марок





Рисунок 2.2.5. – Графики вертикальных перемещений поверхностных марок в створе «4»

Графики осадок, приведенные на рисунках 2.2.3 – 2.2.5 показывают, что большинство поверхностных марок, установленных на исследуемом участке островной и русловой части правобережной плотины имеют затухающий характер с достаточно малыми величинами годовых приращений вертикальных перемещений. Суммарные вертикальные перемещения поверхностных марок створа 1, расположенных на участке ПК18-ПК25 в период с 2006 по 2022 год составили от 4,08 до 6,37 мм, створа 2 – от 3,86 до 4,95 мм, створа 3 – от 2,51 до 4,57 мм, створа 4 – от 3,42 до 3,79 мм.

3. РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И УСТОЙЧИВОСТИ ПРАВОБЕРЕЖНОЙ ПЛОТИНЫ НА УЧАСТКЕ ПК18-ПК25

Расчеты конструктивных элементов сооружения выполнены в соответствии с СП 58.13330.2019, СП 39.13330.2012 [27, 28].

При расчетах гидротехнических сооружений, их конструкций и оснований подлежит проверке следующее условие, обеспечивающее недопущение наступления предельных состояний:

$$\gamma_{lc} \cdot F \le \frac{\gamma_c \cdot R}{\gamma_n} \tag{3.1}$$

где:

 F – расчётное значение обобщённой сдвигающей силы, определяемое с учётом коэффициента надёжности по нагрузке;

R – расчётное значение обобщённой несущей способности системы «сооружение – основание», определяемое с учётом коэффициента надёжности по грунту т.е. обобщённое расчётное значение сил предельного сопротивления сдвигу по рассматриваемой поверхности;

 γ_{lc} - коэффициент сочетания нагрузок, принимаемый:

- $\gamma_{lc} = 1,0 - для$ основного сочетания нагрузок;

– $\gamma_{lc} = 0.9 - для$ особого сочетания нагрузок;

γ_n – коэффициент надёжности по степени ответственности сооружений:

- γ_n=1,25 – правобережная плотина ГЭС относится к I классу надёжности;

 γ_c – коэффициент условий работы, либо учёт метода расчёта:

- *γ_c*=0,95 – инженерные методы расчётов;

- γ_c=1,0-с учетом напряженно-деформированного состояния.

В программных комплексах наряду с силами *F*, *R* вычисляется отношение этих сил *K*_s, соответствующее по форме коэффициенту устойчивости (СП 39.13330.2012 актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84 п.5.11):

$$K_s = \frac{R}{F} \ge \frac{\gamma_n \gamma_{lc}}{\gamma_c} = K_d \tag{3.2}$$

где: *К*_d – нормативный критерий устойчивости.

Для оценки устойчивости откоса определяется наиболее опасная поверхность сдвига с минимальным коэффициентом запаса устойчивости *K*₈ для основного и особого сочетания нагрузок для каждого расчётного случая. Полученный результат сопоставляется с нормативным критерием устойчивости откоса:

- для основного сочетания нагрузок: $K_d = \frac{1,25 \cdot 1}{1} = 1,250$

- для особого сочетания нагрузок: $K_d = \frac{1,25 \cdot 0,9}{1} = 1,125$

Расчётные нагрузки при расчёте конструкций по деформациям и перемещениям (по второй группе предельных состояний) приняты равными нормативным значениям.

Расчётные нагрузки для расчёта конструкций на прочность и устойчивость (по первой группе предельных состояний) определены умножением нормативных нагрузок на коэффициент перегрузки.

3.1 Методика расчетных исследований

Метод конечных элементов (МКЭ) позволяет приближённо численно решать широкий спектр физических проблем, которые математически формулируются в виде системы дифференциальных уравнений или в вариационной постановке. Этот метод можно использовать для анализа напряжённо деформированного состояния конструкций, для термического анализа, для решения гидро-газодинамических задач и задач электродинамики. Могут решаться и связанные задачи.

Историческими предшественниками МКЭ были различные методы строительной механики и механики деформируемого твёрдого тела, использующие дискретизацию, в частности, метод сил и метод перемещений. Основные идеи и процедуры МКЭ впервые были использованы Курантом в 1943 г. при решении задачи о кручении стержня. Но только с 50-х годов началось активное практическое применение МКЭ, сначала в области авиации и космонавтики, а затем и в других направлениях. Термин «конечные элементы» (КЭ) ввёл в

1960 году Клаф. Развитию этого метода способствовало совершенствование цифровых электронных вычислительных машин.

Область применения МКЭ значительно расширилась, когда для его обоснования стали применяться методы взвешенных невязок Галёркина и наименьших квадратов. МКЭ превратился в универсальный способ решения дифференциальных уравнений.

Исходным объектом для применения МКЭ является материальное тело (в общем случае

- область, занимаемая сплошной средой или полем), которое разбивается на части - конечные элементы (КЭ) (рисунок 3.1.1). В результате разбивки создаётся сетка из границ элементов. Точки пересечения этих границ образуют узлы. На границах и внутри элементов могут быть созданы дополнительные узловые точки. Ансамбль из всех конечных элементов и узлов является основной конечно-элементной моделью деформируемого тела. Дискретная модель должна максимально полно покрывать область исследуемого объекта.



Рисунок 3.1.1 – Материальное тело разбитое на конечные элементы

Выбор типа, формы и размера конечного элемента зависит от формы тела и вида напряжённо-деформированного состояния. Стержневой КЭ применяется для моделирования одноосного напряжённого состояния при растяжении (сжатии), а также в задачах о кручении или изгибе. Плоский двумерный КЭ в виде, например, треугольной или четырёхугольной пластины используется для моделирования плоского напряжённого или плоского деформированного состояния. Объёмный трёхмерный КЭ в виде, например, тетраэдра, шестигранника или призмы служит для анализа объёмного напряжённого состояния. КЭ в форме кольца применяется в случае осесимметричного напряжённого состояния. Для расчёта изгиба пластины берётся соответствующий плоский КЭ, а для расчёта оболочки используется оболочечный КЭ или также изгибаемый плоский элемент. В тех зонах деформируемого тела, где ожидаются большие градиенты напряжений, нужно применять более мелкие КЭ или элементы большего порядка.

Конечные элементы наделяются различными свойствами, которые задаются с помощью констант и опций. Например, для стержневого ферменного КЭ указывается площадь поперечного сечения, а если

моделируется трос, работающий только на растяжение, то назначается соответствующая опция. Для плоских несгибаемых КЭ может указываться толщина и задаваться вид напряжённого состояния: плоское напряжённое, плоское деформированное или осесимметричное. Для плоских изгибаемых и оболочечных КЭ должна задаваться толщина.

Все элементы и узлы нумеруются. Нумерация узлов бывает общей (глобальной) для всей конечно-элементной модели и местной (локальной) внутри элементов. Нумерацию элементов и общую нумерацию узлов желательно производить так, чтобы трудоёмкость вычислений была наименьшей. Существуют алгоритмы оптимизации этой нумерации. Должны быть определены массивы связей между номерами элементов и общими номерами узлов, а также между местными и общими номерами узлов.

Для расчета полей различных физических величин с помощью МКЭ в рассматриваемой области необходимо определить материалы элементов и задать их свойства. В задачах деформирования, прежде всего, нужно указать упругие свойства - модуль упругости и коэффициент Пуассона. Если предполагается пластическое течение, то необходимо задать истинные диаграммы деформирования, которые аппроксимируются билинейными или мульти линейными кривыми. Когда тело неравномерно нагрето, указанные выше механические свойства требуется задать для ряда температур и, кроме того, нужно ввести коэффициент теплового расширения. Для динамических необходимо определить задач плотность материала И, возможно, коэффициент вязкого демпфирования.

В стационарных задачах теплопроводности для выбранного материала тела должен быть задан коэффициент теплопроводности. При нестационарной теплопроводности нужно дополнительно знать плотность материала и его теплоёмкость. Если рассматривается нелинейная задача теплопроводности, то указанные физические свойства требуется определять как функции температуры.

Состояние тела характеризуется конечным числом независимых параметров, определённых в узлах конечно-элементной сетки. Такие параметры называются степенями свободы. В рассматриваемых ниже деформационных задачах в качестве степеней свободы применяются перемещения узлов, среди компонентов которых могут быть и угловые перемещения. В задачах теплопроводности степенями свободы являются температуры узлов.

Координаты узлов, перемещения узлов и произвольных точек элементов, силы и другие объекты могут определяться в различных системах отсчёта (системах координат). В алгоритме МКЭ используются общая (глобальная) система координат, привязанная ко всей конечно- элементной модели (рисунок 3.1.1), и местные (локальные) системы координат, связанные с конкретными конечными элементами, в силу чего их называют элементными системами отсчёта. Переход от одной системы отсчёта к другой производится с помощью матриц преобразования.

В деформационной задаче число степеней свободы одного узла зависит от типа задачи и от системы отсчёта. На рисунке 3.1.1 показан узел z, имеющий в общей системе координат x, y, z три степени свободы, составляющих узловой вектор степеней свободы (перемещений). В общей системе координат этот вектор может быть записан в виде

$$U_i = \{U_i\} = \begin{cases} u_{ix} \\ u_{iy} \\ u_{iz} \end{cases}$$
(3.1.1)

Если узел *i* имеет n_i ,- степеней свободы, а конечный элемент включает n_e узлов, то число степеней свободы одного элемента равно $n_e \cdot n_i$. Число степеней свободы всей модели, имеющей *n* однотипных узлов равно $N = n \cdot n_i$. Набор всех степеней свободы модели составляет общий (глобальный) вектор степеней свободы (то есть узловых перемещений модели), в котором нумерация степеней свободы может быть общей (глобальной) или пономерам узлов с добавлением индекса узловой степени свободы

$$\{U\} = \begin{cases} u_1 \\ \vdots \\ u_q \\ \vdots \\ u_N \end{cases} = \begin{cases} U_1 \\ \vdots \\ U_i \\ \vdots \\ U_n \end{cases}$$
(3.1.2)

где $\{U_i\}$ - подматрица, составленная из всех *n*, компонентов перемещения узла *i*. В частности, для трёхмерной задачи при использовании общей декартовой системы координат x, y, z эта подматрица является вектором перемещений узла. Переход от узловой нумерации к общей очевиден. Например, для рассмотренного выше случая трёх степеней свободы в узле формулы преобразования имеют следующий вид:

 $u_{ix} = u_{3i-2}, u_{iy} = u_{3i-1}, u_{iz} = u_{3i}.$

Для тепловой задачи один узел с глобальным номером i имеет одну степень свободы - температуру T_i). Общий (глобальный) вектор степеней свободы в этом случае имеет вид

$$\{T\} = \begin{cases} T_1 \\ \vdots \\ T_n \end{cases}$$
(3.1.3)

Процедура интерполяции поля перемещений на примере одномерной задачи деформирования стержня АВ, показанного на рисунке 3.1.2.



Рисунок 3.1.2 – Пример интерполяции поля перемещений

Интерполирование может выполняться с помощью множества кусочно-непрерывных функций, называемых функциями формы. Каждая функция формы отлична от нуля только в области одного «своего» конечного элемента, равна единице в одном узле этого элемента и равна нулю во всех других узлах. Такой выбор интерполирующих функций позволяет рассчитывать вектор перемещения произвольной точки элемента $u_e(x)$ через вектор узловых перемещений элемента {U}_e виде сумм

$$u_e(x) = [N(x)]_e \{U\}_e \tag{3.1.4}$$

где х- координата, определяющая положение точки в элементе, $[N(x)]_e$ в-матрица функций формы элемента.

Разобьём стержень AB на два элемента с узлами 1-2 и 2-3. Узловые значения функции u(x) образуют общий вектор-столбец $\{U\} = \{u_1 u_2 u_3\}^T$. Для первого элемента интерполирующую функцию примем в виде полинома первой степени, то есть в виде линейной зависимости

$$u_1(x) = \alpha_1 + \alpha_2 x$$
 (3.1.5)

В узлах первого элемента зависимость даст два равенства:

$$u_1 = \alpha_1 + \alpha_2 x_1, u_2 = \alpha_1 + \alpha_2 x_2 \tag{3.1.6}$$

Из равенства (3.1.6) найдём коэффициенты α₁, α₂ и подставим их в (3.1.5). Получим

$$u_1(x) = [N]_1 \{u\}_1 \tag{3.1.7}$$

где $[N]_1 = [N_1^1 N_2^1]$ -матрица функций формы для первого элемента. Функции формы первого элемента:

$$N_1^1 = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1}, N_2^1 = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}$$
(3.1.8)

Заметим, что для функций формы в узлах справедливы соотношения $N_1^1(x_1) = 1, N_1^1(x_2) = 0, N_2^1(x_1) = 0, N_2^1(x_2) = 1, N_1^1 + N_2^1 = 1$ (3.1.9)

Аналогично выражаются перемещения второго элемента:

$$u_2(x) = [N]_2 \{u\}_2 \tag{3.1.10}$$

где $\{u\}_2 = {u_2 \atop u_3}, [N]_2 = [N_2^2 N_3^2]_2$ - матрица функций формы второго элемента.

Функции формы второго элемента:

$$N_2^2 = \frac{x_3 - x}{x_3 - x_2}, \qquad \qquad N_3^2 = \frac{x - x_2}{x_3 - x_2}$$
(3.1.11)

На общей границе элементов в узле 2 аппроксимирующая функция остаётся непрерывной благодаря равенству $u_1(x_2) = u_2(x_2) = u_2$.

Таким образом, для одномерных конечных элементов построены линейные функции формы. Конечные элементы с линейной аппроксимацией называются элементами первого порядка или симплекс-элементами.

Представим весь стержень AB как один одномерный конечный элемент с тремя узлами. Тогда для аппроксимации функции u(x) можно использовать полином второй степени:

$$u(x) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 x^2 \tag{3.1.12}$$

Преобразования, аналогичные вышеприведенным, дают выражение

$$u(x) = [N_1 N_2 N_3] \{u\}$$
(3.1.13)

Где $N_1 = \frac{(x-x_2)(x-x_3)}{(x_1-x_2)(x_1-x_3)}, N_2 = \frac{(x-x_1)(x-x_3)}{(x_2-x_1)(x_2-x_3)}, N_3 = \frac{(x-x_1)(x-x_2)}{(x_3-x_1)(x_3-x_2)}$

квадратичные функции формы.

Элемент, для которого используется функция формы в виде многочлена второй степени, называется одномерным квадратичным, или одномерным элементом второго порядка. Обобщая рассмотренные примеры, видим, что степень полиномов, используемых в качестве функций формы,

определяет порядок конечного элемента. Выбор порядка аппроксимации накладывает определённые условия на количество узлов элемента.

Для многих типов конечных элементов функции формы и другие соотношения МКЭ эффективно определяются в местных (элементных) естественных системах координат. Связь между такими местными координатами и общими декартовыми координатами осуществляется с помощью некоторых отображающих функций.

В задачах теплопроводности аппроксимация искомого температурного поля с помощью функций формы производится аналогично.

Линейно-упругая задача деформирования твёрдого тела при малых деформациях и малых перемещениях. Принимается, что конечные элементы взаимодействуют только через общие узлы. Внутренние распределённые силы, действующие по границам элемента *е* заменяются статически эквивалентными узловыми силами, составляющими вектор узловых сил элемента $\{F\}_e$. Внешние распределённые массовые и поверхностные силы, действующие на конечный элемент, приводятся к статически или энергетически эквивалентным узловым силам, образующим соответственно векторы $\{P\}_e^g$ и $\{P\}_e^q$ - К эквивалентным узловым силам приводятся также силы инерции (как массовые силы), начальные деформации, в том числе $\{P\}_e^{\sigma_0}$).

Матричное уравнение жёсткости элемента имеет вид

 $[K]_e \{U\}_e = \{F\}_e + \{P\}_e^q + \{P\}_e^g + \{P\}_e^{\varepsilon_0} + \{P\}_e^{\sigma_0}$ (3.1.14)

Где $[K]_e$ - матрица жесткости элемента, состоящая из коэффициентов жесткости, $\{U\}_e$ - вектор узловых перемещений элемента.

Обоснование уравнения (3.1.14) может быть выполнено с помощью теории упругости или сопротивления материалов, но такой подход имеет ряд недостатков. Более эффективными и во многих случаях более корректными

способами обоснования уравнений жёсткости элементов являются вариационные методы и методы невязок.

Заметим, что вариационные методы позволяют получать общую систему- уравнений равновесия всей модели без введения узловых сил $\{F\}_e$ то есть без предположения о взаимодействии элементов только через узлы и без составления соотношений (3.1.14) для жёсткости элементов. Однако в вычислительном процессе МКЭ удобно вначале определять матрицы элементов $[K]_e$, $\{P\}_e^g$, $\{P\}_e^q$, $\{P\}_e^{\varepsilon_0}$, $\{P\}_e^{\sigma_0}$, а затем из них собирать общие матрицы системы уравнений равновесия модели по стандартным правилам суммирования компонентов матриц с одинаковыми индексами.

Если задача деформирования динамическая, то, на основании принципа Даламбера, в уравнения (3.1.14) добавляются узловые силы, эквивалентные массовым силам инерции, зависящим от ускорения. Демпфирование учитывается эквивалентными объёмными силами вязкого сопротивления, пропорциональными скорости. В результате получается дифференциальное матричное уравнение

$$[m]_e \frac{d^2}{dt^2} \{U\}_e + [C]_e \frac{d}{dt} \{U\}_e + [K]_e \{U\}_e = \{F\}_e$$
(3.1.15)

где $[C]_e$ - матрица демпфирования элемента, зависящая от коэффициента вязкого демпфирования μ ; $[m]_e$ -матрица масс элемента, зависящая от плотности материала элемента ρ .

Программный комплекс ANSYS решает методом конечных элементов стационарные и нестационарные, линейные и нелинейные задачи из таких областей физики, как механика твёрдого деформируемого тела, механика жидкости и газа, теплопередача, электродинамика.

Возможно решение связанных задач. Для решения задач деформирования конструкций МКЭ применяется в варианте метода перемещений.

Расчёты могут производиться в пакетном (Batch) или интерактивном (Interactive) режимах. Для пакетного режима предварительно должна быть

написана программа пользователя с помощью встроенного языка APDL (ANSYS Parametric Design Language) и команд ANSYS. Текстовый командный файл, содержащий эту программу, считывается средствами пакета ANSYS и выполняется. Пакетный режим удобен при решении сложных задач, алгоритм которых содержит циклы, переходы, структуры «если - то» и пр.

Интерактивный режим работы реализуется или с помощью графического интерфейса пользователя (GUI) классического ANSYS, или на платформе нового продукта Workbench. Эти оболочки состоят из командных меню и окон. Каждая вводимая через меню команда при интерактивном моделировании сразу же выполняется, а результат или сообщение о нём выводятся в соответствующие окна. Интерактивный режим - основной режим моделирования, даже командные файлы для пакетного режима создаются обычно с использованием инструментов интерактивного режима.

Решение МКЭ поставленной краевой задачи осуществляется программой ANSYS в три этапа соответственно логике метода. На первом этапе (препроцессинге) создаётся основа конечно-элементной модели исследуемого объекта. Этот этап включает в себя нижеследующие процедуры:

1. Устанавливается физический тип задачи (механика деформируемого твёрдого тела, теплопередача, гидродинамика и т.д.), производится соответствующая настройка программы.

2. Выбирается тип конечного элемента в зависимости от размерности объекта и других его свойств. Могут быть заданы некоторые характеристики элемента.

3. объекта Выбирается материал И указываются все его необходимые свойства.Свойства могут быть заданы с клавиатуры или импортированы из библиотеки ANSYS. Задание материалов свойств определяет модель материала (линейно-упругий, упруго-пластичный, билинейный и т.д.), что влияет на выбор определяющих уравнений МКЭ.

4. Строится геометрическая твёрдотельная модель объекта. В классическом ANSYS для этого используется программный модуль PREP7. В Workbench используется модуль Design Modeler. Геометрическая модель может быть экспортирована из какого-либо CAD-пакета.

5. Геометрическая модель разбивается на конечные элементы. При разбивке могут быть заданы различные параметры сетки.

6. В случае контактной задачи устанавливаются контактные пары, определяется модель контакта и её характеристики.

Второй этап - наложение на модель необходимых физических условий и решение задачи - состоит из трёх основных шагов:

1. Задаются граничные условия - силы, перемещения (связи) и пр.

2. Выбирается тип анализа (статический, динамический, модальный и т.д.). Возможен выбор метода решения системы уравнений МКЭ и задание параметров вычислительных процедур (числа шагов нагружения, числа итераций и др.).

3. Осуществляется решение системы уравнений, полученной методом МКЭ. В результате решения формируется файл результатов, который содержит вектор найденных степеней свободы (узловых перемещений, узловых температур и т.д.).

Третий этап (пост-процессинг) - анализ результатов расчёта. Рассчитанные МКЭ физические величины (перемещения, деформации, напряжения, температуры и др.) представляются в графическом окне ANSYS в виде картинок, таблиц, графиков, анимации. Все эти результаты можно записать в соответствующие файлы.

При выполнении рассмотренных выше этапов решения задачи программа ANSYS создаёт в памяти компьютера базу данных, содержащую полную информацию о модели. Эту базу данных можно сохранить в бинарном файле и использовать для продолжения анализа.

Для всех грунтов использована модель идеального упругогопластичного грунта с предельной поверхностью, описываемой критерием

Мора-Кулона – модель MC (Бугров и др., 1987; Фадеев, 1987; Brinkgreveetal., 2012). В общем случае данная модель требует задания следующих шести основных параметров: удельный вес γ, модуль деформации Е, коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона) ν, сцепление *c*, угол внутреннего трения φ и угол дилатансии ψ.

Предполагается, что сжатие будет положительным. Если сжатие является отрицательным, *о* следует заменить на *-о*.

Используемая упругопластическая модель МС является простейшей нелинейной моделью грунта. Модель отражает линейный характер разрушения и состоит из двух компонент прочности: С – удельное сцепление и φ – угол внутреннего трения – и описывает зависимость касательных напряжений (τ - прочность на сдвиг) от действующих нормальных напряжений (σ):

$$\tau = \sigma \cdot tg\varphi + C$$

При φ=0°, критерий Мора – Кулона сводится к критерию Треска, если φ=90°, модель Мора – Кулона эквивалентна модели Ранкина. Более высокие значения φ недопустимы.

Поверхность разрушения Мора – Кулона представляет собой конус с гексагональным поперечным сечением в пространстве девиаторных напряжений.



Рисунок 3.1.3 – Поверхность разрушения Мора–Кулона

Угол дилатансии используется в теории пластичности для учета объемного деформирования при пластическом течении.

Помимо поверхности текучести, определяемой законом Мора-Кулона, дополнительно вводится вторая поверхность - потенциал пластичности, наклон которой определяется углом дилатансии. В случае если угол дилатансии у равен углу внутреннего трения ф, поверхность текучести одновременно рассматривается как потенциальная поверхность (g = f), т.е. действует ассоциированный закон течения. Для большинства грунтов в этом случае возникают нереалистично большие объемные деформации, а реальный угол дилатансии обычно в разы меньше угла внутреннего трения. При указании $\psi < \phi$ модель использует неассоциированный закон течения, а при $\psi = 0$ объемные деформации при сдвиге будут отсутствовать (потенциал пластичности становится горизонтальной линией).



Нормальные напряжения о, кПа

Рисунок 3.1.4 – К определению угла дилатансии

3.2 Исходные данные для выполнения расчетных исследований

В соответствии с техническим заданием (Приложение 1) расчетные исследования напряженно-деформированного состояния и устойчивости выполнены на участке ПК18- ПК25правобережной плотины ГЭС.

Расчетная модель участка исследования выполнена по материалам исследований прошлых лет, рабочей и исполнительной документации [26].

Программный комплекс, использованный при проведении расчетных исследований правобережной плотины ГЭС, основан на методе конечных элементов.

При выполнении расчетных исследований правобережной плотины ГЭС были использованы результаты инженерно-геологических изысканий, многофакторных и лабораторных исследований, выполненных в различные годы [1, 2, 25,26,].

В таблице 3.2.1 приведены используемые в расчетах значения физикомеханических характеристик грунтов тела и основания правобережной плотины ГЭС.

Таблица 3.2.1–Значения физико-механических характеристик грунтов тела и основания правобережной плотины ГЭС

Обозн.	Наименование грунта	Плотность		Угол	Сионногио
		грунта	насыщенно го грунта	трения	Сцепление
		ρ	ρsat	φ	с
		кг/м ³	кг/м ³	0	кПа
А	Песчано- гравелистый материал упорных призм	2090	2180	33	0
Б	Суглинок ядра	2000	2060	17	76,52
Ц	Цементационная завеса	-	2290	24	49,05
7, 8,10	Суглинок	-	2190	20	27,47
3, 13,14	Галечниково-валунные отложения	-	2220	21	11,77
20	Песчаник среднезернистый	-	2220	24	27,47
16	Песчаник крупнозернистый гравелистый	-	2220	25	29,82
23	Алевролит слабый	-	2290	20	43,16
24	Алевролит крепкий и средний	-	2290	24	49,05
24'	Алевролит крепкий и средний(глубоко залегающие слои)	-	2290	24	49,05

3.3 Результаты расчетных исследований напряженнодеформированного состояния и устойчивости правобережной плотины на участке ПК18 – ПК25

Результаты расчетных исследований напряженно-деформированного состояния и устойчивости правобережной плотины ГЭС на участке ПК18 – ПК25 выполнены на основе пространственной модели.

На рисунке 3.3.1 показана общая пространственная модель правобережной плотины ГЭС на участке ПК18-ПК25.



Рисунок 3.3.1 – Пространственная модель правобережной плотины ИГЭС

На рисунке 3.3.2 показана конечно-элементная модель участка ПК18 – ПК25.



Рисунок 3.3.2 – Конечно-элементная модель участка ПК18 – ПК25 плотины ИГЭС Результаты расчёта по состоянию на 2023 год показаны ниже.



Рисунок 3.3.3 – 2006-2023 год. Горизонтальные перемещения вдоль потока, мм

Из рисунка 3.3.3 видно, в период с 2006 по 2023 г. за счёт уплотнения тела плотины, горизонтальные перемещения составляют 2,2 мм.



Рисунок 3.3.4 – 2006-2023 год. Вертикальные перемещения, мм

Из рисунка 3.3.4 видно, в период с 2006 по 2023 г. за счёт уплотнения тела плотины, вертикальные перемещения составляют 4,9 мм.

На рисунках 3.3.5, 3.3.6 показано положение наиболее опасной поверхности обрушения откосов правобережной грунтовой плотины ИГЭС при основном сочетании нагрузок.



Рисунок 3.3.5 – Расчетное положение поверхности обрушения низового откоса правобережной плотины, k_s=1,800



Рисунок 3.3.6 – Расчетное положение поверхности обрушения верхового откоса правобережной плотины, ks=2,010

Расчетные значения коэффициентов статической устойчивости откосов правобережной грунтовой плотины в настоящее время отвечают требованиям, предъявляемым СП 39.13330.2012 к сооружениям I класса (не менее 1,25 для основного сочетания нагрузок в период эксплуатации).

4. РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО РЕЖИМА И УСТОЙЧИВОСТИ ПРАВОБЕРЕЖНОЙ ПЛОТИНЫ НА УЧАСТКЕ ПК18-ПК25 ПРИ НАРУШЕНИИ СПЛОШНОСТИ ФИЛЬТРАЦИОННОГО КОНТУРА

4.1. Исходные данные для выполнения расчетных исследований

При оценке фильтрационной прочности тела правобережной плотины ГЭС необходимо обеспечение условия СП 39.13330.2012 п.9.5:

$$J_{est,m} \le \frac{J_{cr,m}}{\gamma_n} \tag{4.1}$$

где *Jest, m* – действующий средний градиент напора в расчетной области фильтрации;

Jcr,m – критический средний градиент напора, принимаемый на основании исследований грунтов в условиях, отвечающих условиям эксплуатации сооружения; в предварительных расчетах и при отсутствии
необходимых исследований значения при расчете общей фильтрационной прочности принимаются в соответствии с имеющимися аналогами или по таблице 8 п. 9.5 СП 39.13330; принят для суглинистых грунтов ядра равным 8.0;

уп – коэффициент надёжности по ответственности сооружений:

Фильтрационные характеристики грунтов основания и тела плотины в расчетных исследованиях принимались по материалам многолетних исследований и приведены в таблицах 1.2.1 – 1.2.4.

Необходимо отметить, что в связи с отсутствием современных фильтрационных характеристик грунтов тела и основания плотины в качестве исходных данных для расчетного моделирования системы «сооружение – основание» использовались результаты исследований прошлых лет, а также некоторые упрощения.

При выполнении фильтрационных расчетов предварительно была выполнена калибровка расчетной модели правобережной плотины на участке ПК18-ПК25 таким образом, чтобы расчетные показания пьезометров, установленных в теле и основании плотины, соответствовали натурным данным. Калибровка расчетной модели правобережной грунтовой плотины ГЭС производилась соответственно при отметке УВБ 457,00 м.

При выполнении расчетных исследований были рассмотрены следующие расчетные случаи:

- 1 расчетный случай (основное сочетание нагрузок): отметка УВБ соответствует НПУ 457, 00 м;

- 2 расчетный случай (особое сочетание нагрузок): нарушение работы цементационной завесы;

- 3 расчетный случай (особое сочетание нагрузок): нарушение работы ядра.

4.2. Результаты расчетных исследований фильтрационного режима и устойчивости правобережной плотины на участке ПК18-ПК25 при нарушении сплошности фильтрационного контура

Результаты расчетных исследований фильтрационного режима и устойчивости правобережной плотины ГЭС на участке ПК18 – ПК25 выполнены на основе пространственной модели.

На рисунках 4.2.1- 4.2.7 показано расчетное положение депрессионной поверхности в теле правобережной плотины для первого расчетного случая.



Рисунок 4.2.1 – Расчетное положение депрессионной поверхности в теле правобережной плотины на участке ПК18-ПК19



Рисунок 4.1.2 – Расчетное положение депрессионной поверхности в теле правобережной плотины на участке ПК18-ПК20



Рисунок 4.2.2 – Расчетное положение депрессионной поверхности в теле правобережной плотины на участке ПК18-ПК21



Рисунок 4.2.3 – Расчетное положение депрессионной поверхности в теле правобережной плотины на участке ПК18-ПК22



Рисунок 4.2.4 – Расчетное положение депрессионной поверхности в теле правобережной плотины на участке ПК18-ПК23



Рисунок 4.2.5 – Расчетное положение депрессионной поверхности в теле правобережной плотины на участке ПК18-ПК24



Рисунок 4.2.6 – Расчетное положение депрессионной поверхности в теле правобережной плотины на участке ПК18- ПК25

На рисунках 4.2.8 - 4.2.14 приведены результаты расчёта депрессионной поверхности с учётом нарушения работы цементационной завесы (второй расчетный случай).



Рисунок 4.2.7 – Расчетное положение депрессионной поверхности в теле правобережной плотины на участке ПК18-ПК19



Рисунок 4.2.8 – Расчетное положение депрессионной поверхности в теле правобережной плотины на участке ПК18-ПК20



Рисунок 4.2.9 – Расчетное положение депрессионной поверхности в теле правобережной плотины на участке ПК18-ПК21



Рисунок 4.2.10 – Расчетное положение депрессионной поверхности в теле правобережной плотины на участке ПК18-ПК22



Рисунок 4.2.11 – Расчетное положение депрессионной поверхности в теле правобережной плотины на участке ПК18-ПК23



Рисунок 4.2.12 – Расчетное положение депрессионной поверхности в теле правобережной плотины на участке ПК18-ПК24



Рисунок 4.2.13 – Расчетное положение депрессионной поверхности в теле правобережной плотины на участке ПК18- ПК25

Из результатов расчетов фильтрационного режима правобережной плотины с учетом нарушения работы цементационной завесы, виден подъем положения депрессионной поверхности в центральной части низовой упорной призмы.

На рисунках 4.2.15 – 4.2.21 приведены результаты расчёта депрессионной поверхности с учётом нарушения работы ядра (третий расчетный случай).



Рисунок 4.2.14 – Расчетное положение депрессионной поверхности в теле правобережной плотины на участке ПК18-ПК19



Рисунок 4.2.15 – Расчетное положение депрессионной поверхности в теле правобережной плотины на участке ПК18-ПК20



Рисунок 4.2.16 – Расчетное положение депрессионной поверхности в теле правобережной плотины на участке ПК18-ПК21



Рисунок 4.2.17 – Расчетное положение депрессионной поверхности в теле правобережной плотины на участке ПК18-ПК22



Рисунок 4.2.18 – Расчетное положение депрессионной поверхности в теле правобережной плотины на участке ПК18-ПК23



Рисунок 4.2.19 – Расчетное положение депрессионной поверхности в теле правобережной плотины на участке ПК18-ПК24



Рисунок 4.2.20 – Расчетное положение депрессионной поверхности в теле правобережной плотины на участке ПК18- ПК25

Из результатов расчетов фильтрационного режима правобережной плотины с учетом нарушения работы суглинистого ядра, также виден подъем положения депрессионной поверхности и выход ее на поверхность низового откоса в центральной части низовой упорной призмы плотины. В тоже время положение депрессионной поверхности при наличии повреждений ядра будет определяться их количеством, размерами, а также коэффициентом фильтрации грунтов ядра в пределах поврежденного участка. На рисунках 4.2.21, 4.2.22 приведены результаты расчетов градиентов напора и противофильтрационных элементах правобережной плотины.

Выполненными расчетными исследованиями установлено, что наибольшие градиенты напора наблюдаются в ядре и цементационной завесе плотины, достигая величины 2,8 в ядре и 6,5 в цементационной завесе основания, что существенно ниже критических значений. Таким образом, фильтрационная прочность тела и основания плотины обеспечена.



Рисунок 4.2.21 – Расчётные градиенты напора в ядре и цементационной завесе. Вид со стороны ПК25+00



Рисунок 4.2.22 – Расчётные градиенты напора в ядре и цементационной завесе. Вид со стороны ПК18+00

Расчеты устойчивости откосов правобережной плотины были проведены с учетом результатов выполненных фильтрационных расчетов. На рисунках 4.2.23, 4.2.24 показаны положения наиболее опасных поверхностей обрушения откосов плотины при особом сочетании нагрузок и полученные для них коэффициенты устойчивости.



Рисунок 4.2.23 – Расчетное положение поверхности обрушения низового откоса правобережной плотины, ks=1,63 (второй расчетный случай)

Расчетные значения коэффициента устойчивости откоса правобережной грунтовой плотины при сценарии отказа цементационной завесы составляют 1,63, что выше нормативного значения в соответствии с СП 39.13330.2012 для сооружений I класса (не менее 1,125 для особого сочетания нагрузок).



Рисунок 4.2.24 – Расчетное положение поверхности обрушения низового откоса правобережной плотины, ks=1,02 (третий расчетный случай)

Расчетные значения коэффициента устойчивости откоса правобережной грунтовой плотины при сценарии отказа ядра составляют 1,02, что ниже нормативного значения в соответствии с СП 39.13330.2012 для сооружений I класса (не менее 1,125 для особого сочетания нагрузок).

выводы и рекомендации

1. В соответствии с техническим заданием выполнен анализ, обобщение материалов проектной и исполнительной документации, натурных наблюдений, разработана пространственная математическая модель правобережной грунтовой плотины ГЭС, включающая в себя участок ПК18-ПК25. Модель учитывает геометрические особенности плотины, свойства грунта, нагрузки и воздействия.

2. Анализ данных натурных наблюдений позволил получить следующие выводы:

 характер вертикальных перемещений рассматриваемого участка плотины по данным поверхностных марок носит затухающий характер.
Наибольшие вертикальные перемещения на период с 2006 по 2022 г.
зафиксированы на ПК20+00 и составляют 6,37 мм;

– анализ показаний уровней воды в пьезометрах, фильтры которых расположены в шпунтовом коридоре показывает, наличие более высоких пьезометрических уровнях воды в шпунтовом коридоре на ПК24+25, что может быть обусловлено дефектами шпунтового коридора, отступлением от проектной работы конструкции, что также подтверждается материалами исполнительной документации;

 фильтрационный режим исследуемого участка плотины в большей степени характеризуется показаниями пьезометрических уровней воды в низовой упорной призме плотины, имеющими явно выраженную корреляционную зависимость с колебаниями уровня нижнего бьефа;

– исследуемый участок плотины, также характеризуется наличием пьезометрических напоров в основании низовой призмы плотины, наибольшее превышение отметок УНБ за период с января 2017 г. по июль 2023 г. составляет от 3 до 6 м и наблюдается на ПК19+00.

3. В ходе работы была выполнена калибровка разработанной математической модели путем сопоставления данных материалов натурных наблюдений и специальных исследований. Калибровка модели позволила учесть ее параметры и свойства таким образом, чтобы она соответствовала реальным условиям и характеристикам плотины и обеспечивала точное воспроизведение ее поведения, позволившее повысить достоверность модели и обеспечить более точные результаты расчетов.

4. Результаты выполненных расчетных исследований напряженнодеформированного состояния правобережной плотины на участке ПК18-ПК25 показали хорошую сходимость с материалами натурных наблюдений.

5. Полученные расчетные значения коэффициентов устойчивости откосов правобережной плотины ГЭС на участке ПК18-ПК25 для основного сочетания нагрузок соответствуют нормативным требованиям, предъявляемым к сооружениям I класса.

6. Результаты выполненного численного моделирования фильтрационного режима правобережной плотины на участке ПК18-ПК25 с учетом нарушения работы противофильтрационного контура плотины показали:

 при нарушении работы цементационной завесы происходит подъем положения депрессионной поверхности и дополнительное обводнение низовой упорной призмы плотины;

 при нарушении работы ядра плотины, происходит подъем положения депрессионной поверхности сопровождающийся выходом фильтрационного потока на низовой откос центральной части упорной призмы плотины.

7. Расчетные исследования устойчивости откосов плотины, выполненные с учетом нарушения работы противофильтрационного контура плотины показали (особое сочетание нагрузок):

 при нарушении работы цементационной завесы плотины расчетные значения коэффициентов устойчивости откоса плотины соответствуют нормативным требованиям, предъявляемым к сооружениям I класса;

– при нарушении работы ядра плотины расчетные значения коэффициентов устойчивости откоса плотины не соответствуют нормативным требованиям, предъявляемым к сооружениям I класса.

8. В целях оценки изменения депрессионной поверхности в теле плотины выполнить резистивиметрию и индикаторные специализированные исследования в пьезометрических створах на участке ПК18-ПК25 правобережной плотины.

9. Уточнить фактические фильтрационные характеристики грунтов тела и основания правобережной плотины. Выполнить оценку динамики изменения фильтрационных характеристик и ее влияние на фильтрационный режим правобережной плотины на участке ПК18-ПК25.

10. Выполнить расчетные исследования фильтрационного режима правобережной плотины с учетом уточненных фильтрационных характеристик тела и основания плотины в пространственной постановке.

11. В целях контроля динамики изменения фильтрационного режима правобережной плотины на участке ПК18-ПК25 провести специализированное комплексное обследование плотины геофизическими методами (методом электротомографии, методом естественного электрического поля).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- Понятие о фильтрации. Термины и определения. Напорная и безнапорная фильтрация. Уравнение Лапласа. Закон Дарси. Формула Дюпюи.
- 2. Фильтрационные деформации грунтов.
- 3. Общая и местная фильтрационная прочность грунтов оснований ГТС.
- 4. Назовите основные элементы плотин из грунтовых материалов.
- 5. Какие бывают противофильтрационные элементы в грунтовых плотинах?
- 6. Как проводится мониторинг плотин из грунтовых материалов?
- 7. Назовите контрольно-измерительную аппаратуру, применяемую при измерении фильтрационного режима грунтовой плотины.
- 8. Какие основные параметры и характеристики грунтовых плотин учитываются при разработке пространственных конечно-элементных моделей?
- 9. Какие основные нагрузки действуют на грунтовую плотину?
- 10.Как проводится расчет устойчивости откосов грунтовой плотины?
- 11.Виды расчётов плотин из грунтовых материалов. Основные принципы фильтрационных расчётов однородных грунтовых плотин.
- 12. Расчеты фильтрации через плотину с ядром на проницаемом и непроницаемом основании.
- 13.Оценка фильтрационной прочности грунтов в основаниях подпорных ГТС.

Библиографический список

1. Технический отчет «Техническое обследование дренажной системы грунтовых плотин, в том числе геофизические исследования участка дренажной системы правобережной плотины между колодцами К-9 и К-10», ООО «Спецгеосервис» – СПб, 2022;

2. Технический отчет «Проведение многофакторных исследований напорных ГТС Иркутской ГЭС», ООО «Спецгеосервис» – СПб, 2020;

3. Технический отчет «Геофизические исследования на грунтовых плотинах Иркутской ГЭС», ИЗК СО РАН.– Иркутск, 2008.

4. Технический отчет «Многофакторные исследования состояния гидротехнических сооружений Иркутской ГЭС», ЗАО «ГИДЭП», ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» – М., 2007;

5. Технический отчет «Выявление фактических физикомеханических характеристик грунтов основания и суглинистого ядра правобережной грунтовой плотины на базе полевых данных, полученных при бурении пьезометрических скважин», АО «ВНИИГ им. Веденеева» – СПб, 2003;

6. Технический проект. Иркутская гидроэлектростанция на реке Ангаре. Том 1. Природные условия. Часть 3. Инженерная геология. Гидроэнергопроект. – М., 1951;

7. Техническая информация «Выявление фактических физикомеханических характеристик грунтов основания и суглинистого ядра правобережной грунтовой плотины на базе полевых данных, полученных при бурении пьезометрических скважин», АО «ВНИИГ им. Веденеева» – СПб, 2002;

Технический отчет «Инженерно-геологическое изучение состояния суглинистого ядра русловой земляной плотины Иркутской ГЭС», ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева – Ленинград, 1963;

9. Технический отчет №32. Грунтовые плотины (заключительный).
Иркутская ГЭС, Гидроцех, группа НГТС, Иркутск, 1996;

10. Технический отчет «Исследование прочностных характеристик гравийно-галечного грунта», Этап 1, ЗАО «ГИДЭП». – М., 2007;

11. Технический отчет о работе «Трехосное консолидированнодренированное испытание крупнообломочных грунтов упорных призм грунтовых плотин, подвергающихся сезонному замораживанию и оттаиванию», АО «ВНИИГ им. Веденеева» – СПб, 2022;

 Технический отчет «Уточнение расчетных значений физикомеханических характеристик грунтов тела и основания плотины в соответствии с действующими нормативными документами», Этапы 3.1, 3.2, 3.3, СибНИИГ, КФ ЗАО «СибЭНТЦ» – Красноярск, 2011;

13. Технический отчет «Разработка мероприятий по мерам поддержания нормальных условий эксплуатации земляных сооружений Иркутского гидроузла», «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Ленинград, 1971;

14. Технический отчет «Оценка фильтрационного режима на сооружениях Иркутской ГЭС с целью повышения эксплуатационной надежности гидроэлектростанции», «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Ленинград, 1986;

15. Технический отчет «Специальные исследования индикаторными методами право-бережной плотины Иркутской ГЭС», ООО «Спецгеосервис», Санкт-Петербург, 2022;

16. Технический отчет «Разработка рекомендаций по текущему контролю состояния грунтовой плотины Иркутской ГЭС». Заключительный отчет о научно- исследовательских работах научно-производственного центра "Гидротехника", «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Нарва, 1991;

17. Технический отчет «Проведение специальных исследований по разработке рациональной методики контроля состояния грунтовой плотины Иркутского гидроузла», «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Ленинград, 1991;

18. Технический отчет «Многофакторные исследования состояния гидротехнических сооружений Иркутской ГЭС», раздел 2 «Разработка прогнозных математических моделей фильтрации в теле и основании грунтовых плотин», ЗАО «ГИДЭП», 2007;

19. Технический отчет «Научно-техническая помощь по обеспечению безопасности основных бетонных и грунтовых сооружений Иркутского гидроузла и по организации общего надзора за ними», АО "Сибирский НИИ Гидротехники", Красноярск, 1994;

20. Технический отчет «Оценка возможности обследования состояния шпунтовых рядов и грунта между шпунтами грунтовых плотин», СибНИИГ Красноярского филиала, ЗАО «Сибирский ЭНТЦ», Красноярск, 2011;

21. Технический отчет «Комплексное обследование правобережной грунтовой плотины ИГЭС», ООО «Спецгеосервис», Санкт-Петербург, 2020;

22. Технический отчет «Инклинометрические измерения фильтровых колонн пьезометров в противофильтрационном устройстве правобережной плотины и ее основании и специальные исследования индикаторными методами правобережной плотины, обследование пьезометрической сети с помощью индикаторов-маркеров Иркутской ГЭС», ООО «Спецгеосервис», Санкт-Петербург,2022;

23. Технический отчет «Инструментальное обследование защитного крепления верхового откоса правобережной плотины филиала ООО «ЕвроСибЭнерго-Гидрогенерация» ИГЭС, ООО «ИЦ «ЕвроСибЭнерго», Иркутск, 2022;

24. Джурик В.И. и др. Технические отчеты «Геофизические исследования на грунтовых плотинах Иркутской ГЭС». ИЗК СО РАН, Иркутск, 2002 – 2007;

25. Технический отчет «Уточнение расчетных значений физико-механических характеристик грунтов тела и основания плотины в соответствии с действующими нормативными документами». Этап 1.3 «Оценка современного состояния плотин на основе архивных материалов, данных натурных наблюдений и результатов лабораторных исследований». Часть 1. Договор № 11-176/322-П. Красноярский филиал ЗАО «Сибирский ЭНТЦ». Красноярск, 2011;

26. Технический проект. Иркутская гидроэлектростанция на реке Ангаре. Том 3, часть Компоновка сооружений и ТУ проектирования. Гидроэнергопроект. Московское отделение. Москва. 1951;

27. СП 58.13330.2019. Свод правил. Гидротехнические сооружения. Основные положения;

28. СП 39.13330.2012. Свод правил. Плотины из грунтовых материалов;

29. Критерии безопасности Иркутской ГЭС, 2019.

30. Технический отчет «Выявление фактических физикомеханических характеристик грунтов основания и суглинистого ядра правобережной грунтовой плотины на базе полевых данных, полученных при бурении пьезометрических скважин», АО «ВНИИГ им. Веденеева» – СПб, 2003.

Учебное издание

Рубин Олег Дмитриевич Ханов Нартмир Владимирович Антонов Антон Сергеевич Федорова Татьяна Сергеевна

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

системы «правобережная плотина — основание» с оценкой влияния нарушения сплошности противофильтрационного контура на фильтрационный режим низовой упорной призмы

Учебное пособие