



ГИДРО- ТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Ежемесячный
научно-технический журнал

УЧРЕДИТЕЛИ:

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РФ,

ОАО «РУСГИДРО»,

АССОЦИАЦИЯ «КОРПОРАЦИЯ ЕЭЭК»,

ЗАО НТФ «ЭНЕРГОПРОГРЕСС»,

НП «НТС ЕЭС»

Основан в 1930 г.

№ 4

апрель

2013

Содержание

Безопасность гидротехнических сооружений

Лащёнов С. Я., Гуцин М. Ю. Выписка из протокола № 4/2012 заседания комиссии экспертов по оценке системы “плотина — основание” Саяно-Шушенской ГЭС. 2

Юсупов Т. М., Решетникова Е. Н., Александров Ю. Н. Оценка состояния системы “плотина — основание” Саяно-Шушенской ГЭС по завершении этапа наполнения водохранилища в 2012 г. 3

Вульфвич Н. А. Оценка несущей способности плотины Саяно-Шушенской ГЭС по данным натурных наблюдений в послеварийный период эксплуатации (2009 – 2012 гг.). 10

Савич А. И., Газиев Э. Г. Предложения ЦСГНЭО по совершенствованию критериев безопасности плотины Саяно-Шушенской ГЭС. 19

Гордон Л. А., Скворцова А. Е. Актуализация критериев безопасности для основных диагностических показателей плотины Саяно-Шушенской ГЭС. 22

Беллендир Е. Н., Храпков А. А., Скворцова А. Е., Евстифеев А. Д. Оптимальное регулирование уровня верхнего бьефа для Саяно-Шушенской ГЭС, обеспечивающее нормальное техническое состояние плотины 32

Костылев В. С. Применение математической модели “сооружение — основание” к анализу изменений в кинематических показателях бетонной арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС за 2004 – 2012 гг. 37

Расчеты, исследования, эксперименты

Ферингер А. Б., Дерюгин Г. К. Модельные исследования и перекрытие русла р. Колыма в створе Усть-Среднеканского гидроузла. 47

Волшаник В. В., Зуйков А. Л., Орехов Г. В., Чурин П. С. Пропуск холостых расходов через турбинный блок средне- или высоконапорной ГЭС (часть 1) 51

За рубежом

Пехтин В. А., Беллендир Е. Н., Радченко В. Г. Большие плотины и гидроэнергетика Японии 57

Хроника

Новости гидроэнергетики и гидротехники 67

Памяти К. Д. Пердикиса 70

Безопасность гидротехнических сооружений

Публикуемые ниже статьи написаны по материалам докладов, заслушанных на заседании комиссии экспертов по оценке состояния системы “плотина — основание” Саяно-Шушенской ГЭС. Выездное заседание комиссии состоялось 31 октября 2012 г.

Редакция

Выписка из протокола № 4/ 2012 заседания комиссии экспертов по оценке системы “плотина — основание” Саяно-Шушенской ГЭС

31 октября 2012 г.

пос. Черёмушки

Заслушав и обсудив представленные на заседание комиссии доклады и содоклады, комиссия решила:

I. По докладу службы натуральных наблюдений СШГЭС “Оценка состояния системы “плотина — основание” Саяно-Шушенской ГЭС”:

1. Состояние системы “плотина — основание” на 30.10.2012 г. оценивается как нормальное и соответствует действующим нагрузкам и воздействиям.

2. Контрольные параметры состояния плотины меньше предупреждающего критерия K1, определенного Декларацией безопасности.

3. Состояние отремонтированной зоны плотины стабильно.

II. По докладу ОАО “Ленгидропроект” о влиянии режима наполнения водохранилища на НДС плотины:

1. ОАО “Ленгидропроект” совместно со службой натуральных наблюдений СШГЭС продолжить работы по изучению состояния плотины с учётом изменившейся схемы её работы в период зимы 2009/10 г.

2. Продолжить работы по определению влияния температурного фактора на НДС плотины.

III. По докладу ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” “Динамические критерии безопасности для плотины Саяно-Шушенской ГЭС”:

1. Одобрить разработку ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” динамических критериев безопасности.

IV. По докладу ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” “Разработка алгоритма определения оптимального режима наполнения-сработки водохранилища СШГЭС в зависимости от технического состояния ГТС”:

1. Одобрить основные результаты работы. Рекомендовать ВНИИГу передать на Саяно-Шушенскую ГЭС сервисные программы для апробации.

V. По содокладам ЦСГНЭО об увеличении диагностических и критериальных показателей:

1. ЦСГНЭО направить разработанные материалы в ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” и ОАО “Ленгидропроект” для рассмотрения и последующего учёта при разработке критериев безопасности.

VI. Руководству филиала ОАО “РусГидро” — “Саяно-Шушенская ГЭС” продолжить расчётные исследования в части определения влияния динамических воздействий и наносов на систему “плотина — основание”.

VII. ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” и ОАО “Ленгидропроект” подготовить материалы докладов, изложенных на заседании комиссии, для публикации в журнале “Гидротехническое строительство”.

VIII. Опубликовать представленные материалы в журнале “Гидротехническое строительство”.

Председатель комиссии С. Я. Лащёнов

Секретарь комиссии М. Ю. Гуцин

Оценка состояния системы “плотина — основание” Саяно-Шушенской ГЭС по завершении этапа наполнения водохранилища в 2012 г.

Юсупов Т. М., Решетникова Е. Н., инженеры, Александров Ю. Н., кандидат техн. наук (Филиал ОАО “РусГидро” — “Саяно-Шушенская ГЭС имени П. С. Непорожного”)

Изложены данные натуральных наблюдений за состоянием плотины Саяно-Шушенской ГЭС и ее основания. В связи с признаками нарастания наклонов и перемещений плотины в сторону нижнего бьефа в последние годы дана расчетная оценка необратимой составляющей в перемещениях плотины.

Ключевые слова: арочно-гравитационная плотина, мониторинг состояния ГЭС, оценка состояния ГЭС по данным натуральных наблюдений, расчет, метод конечных элементов, необратимая составляющая в показателях состояния.

В течение последних трех лет плотина Саяно-Шушенской ГЭС эксплуатируется в условиях, несколько отличных от проектных. Наиболее необычным был пропуск расхода воды через эксплуатационный водосброс в зимний период 2009 – 2010 гг. По мере ввода в строй гидроагрегатов использование водосброса сокращалось, а в 2012 г. холостые сбросы не проводились. В настоящее время как отклонение от проектного режима эксплуатации можно отметить то, что в связи с реконструкцией гидроагрегатов отдельные турбинные водоводы длительное время остаются не заполненными водой. Это ведет к отклонениям в температурных полях железобетонной облицовки разных водоводов и в температурных полях бетона низовой грани соответствующих секций стационарной части плотины.

Период наполнения водохранилища в 2012 г. характеризовался низкой приточностью с обеспеченностью на уровне 80 – 96 %, за исключением первого месяца — мая. По этой причине накопление воды в водохранилище было возможным только

при минимальной загрузке гидроэлектростанции, при расходе в летние месяцы порядка 700 – 800 м³/с (санитарный попуск).

В 2012 г. наполнение водохранилища началось 3 мая. Температура бетона на начальном этапе наполнения была ниже, чем в предыдущие годы, что сказалось на значениях основных параметров состояния плотины — радиальных перемещениях, превысивших в этот период значения предыдущих лет (рис. 1). При УВБ = 505 м перемещение гребня секции 33 относительно 2011 г. было больше на 6,5 мм.

Дальнейшее наполнение водохранилища протекало в благоприятных условиях. Достаточно высокие температуры наружного воздуха в летние месяцы обеспечили прогрев бетона плотины и, как следствие, существенное снижение интенсивности роста перемещений и даже возврат плотины в сторону ВБ в конце июля (рис. 1).

В 2012 г. водохранилище было заполнено до отметки 537,55 м. Со 2 октября была начата сработка водохранилища: в связи с доставкой новых рабочих

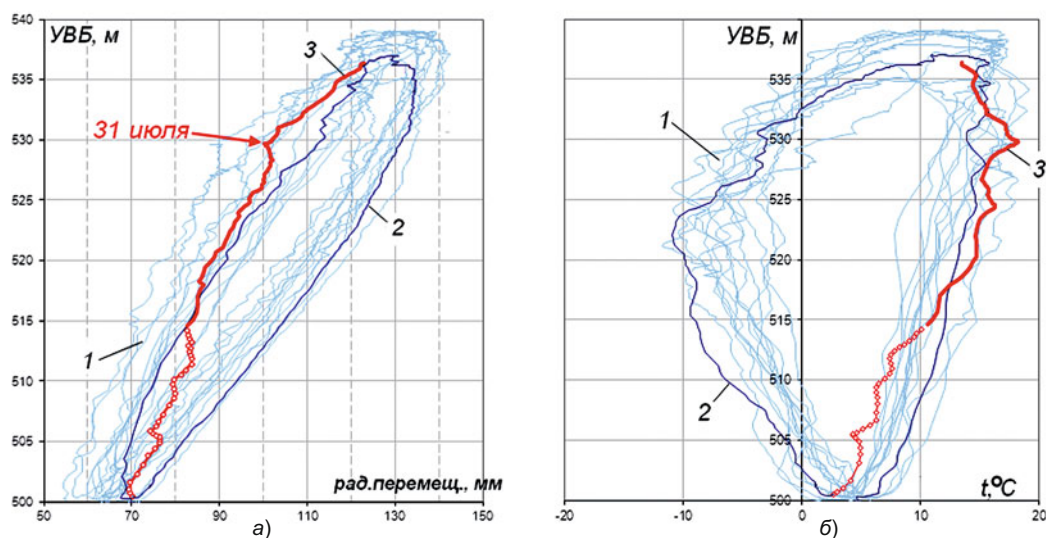


Рис. 1. Изменение радиального перемещения на гребне ключевой секции плотины (а) и изменение температуры бетона в характерной точке — 1,5 м от низовой грани (б):

1 — данные за 2000 – 2011 гг.; 2 — наполнение 2011 — сработка 2012 гг.; 3 — наполнение 2012 г.

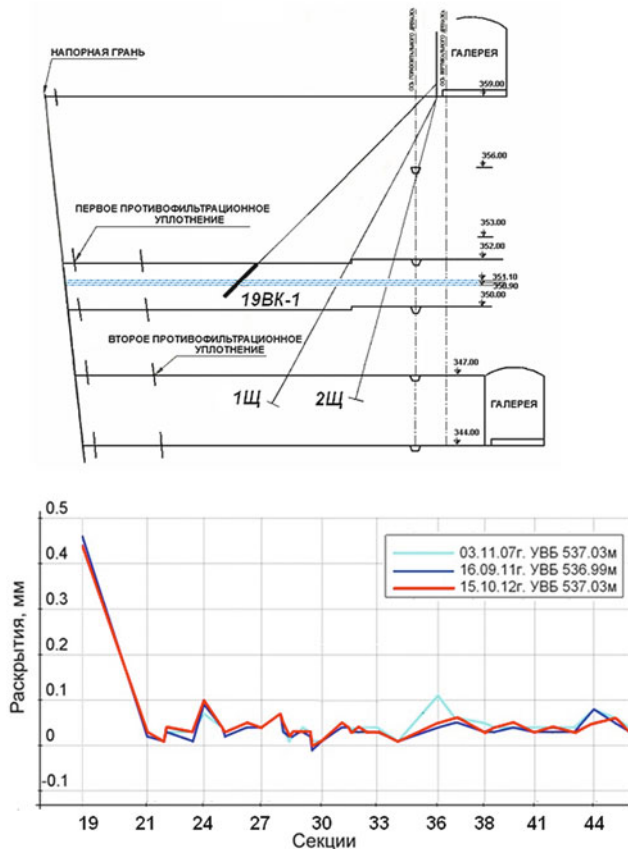


Рис. 2. Схема установки экстензометра 19 ВК-1(пример) и показания экстензометров по всей зоне между отметками 344 – 359 м

колес для СШГЭС потребовалось увеличение ппуска воды в нижний бьеф. В работу были введены все пять действующих гидроагрегатов, среднесуточный расход возрос с 645 до 1675 м³/с.

Таблица 1

Параметры начального и семи конечных состояний плотины, принятых в первой серии расчетов

Состояния	№	Дата	УВБ, м	Рад. перемещение, мм (с. 33, отм. 542 м)
Начальное	0	26.04.05	500,66	67,59
Конечные	1	06.05.06	500,10	68,69
	2	07.05.07	501,17	62,69
	3	04.05.08	500,21	64,62
	4	28.04.09	500,18	64,84
	5	13.05.10	500,04	70,36
	6	06.05.11	499,95	69,36
	7	27.04.12	500,91	72,96

Таблица 2

Параметры начального и семи конечных состояний плотины, принятых во второй серии расчетов

Состояния	№	Дата	УВБ, м	Рад. перемещение, мм (с. 33, отм. 542 м)
Начальное	0	02.08.05	533,44	108,35
Конечные	1	21.06.06	529,89	117,59
	2	25.07.07	531,96	104,66
	3	11.09.08	529,98	99,93
	4	13.07.09	531,48	109,64
	5	11.08.10	533,13	119,67
	6	28.07.11	533,67	119,22
	7	30.08.12	533,35	113,00

Текущее состояние плотины (на конец октября 2012 г.), оцениваемое по совокупности параметров состояния, следует признать нормальным.

Традиционно существенное внимание при этом отводится оценке состояния напорной грани и ее отремонтированной зоны [1]. По показаниям экстензометров (рис. 2), установленных для контроля состояния этой зоны вблизи напорной грани плотины между отметками 344 – 359 м, изменений в состоянии данной зоны в последние годы (2007 – 2012 гг.) практически не отмечается.

Деформации вертикального направления в бетоне напорной грани в более широком диапазоне отметок 312 – 392 м при максимальных уровнях верхнего бьефа в 2012 г. соответствуют деформациям предыдущего года (рис. 3).

Фильтрационные расходы через напорную грань в этой зоне плотины (отметки 344 – 359 м) остаются незначительными. Суммарный расход по вышеуказанной зоне в середине октября (начальный этап сработки водохранилища) составил 2,4 л/с, а в пределах одной секции — в основном не более 0,2 л/с (рис. 4).

Суммарные фильтрационные расходы в целом через бетон напорной грани (11,4 л/с) и основание плотины (60,9 л/с) в течение всего периода наполнения водохранилища оставались меньше, чем в предыдущие годы (рис. 5), и существенно ниже критериальных значений К1 (40 и 350 л/с соответственно). Отмеченное снижение фильтрационных расходов через бетон плотины в период с 2005 по 2012 г. главным образом обусловлено снижением максимальной гидростатической нагрузки в последние годы, а также ликвидацией водопроявлений на локальных участках напорного фронта.

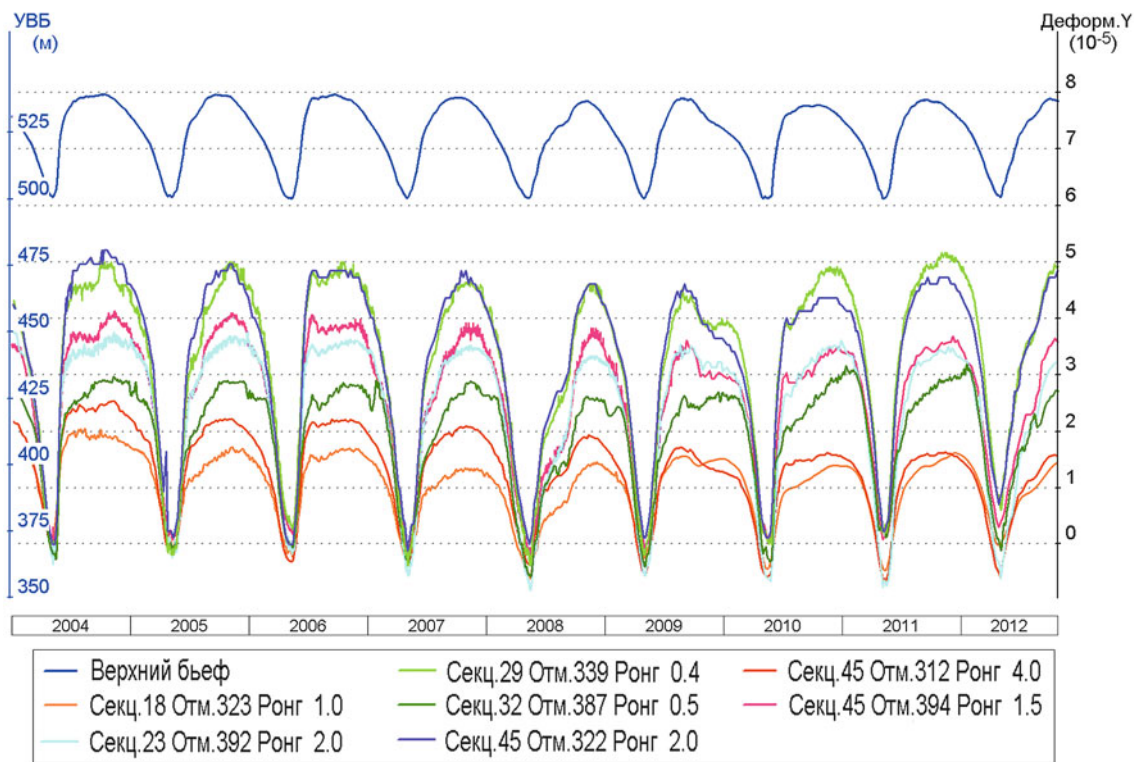


Рис. 3. Показания деформометров (деформации в вертикальном направлении) в напорной грани плотины (РОНГ — расстояние от напорной грани)

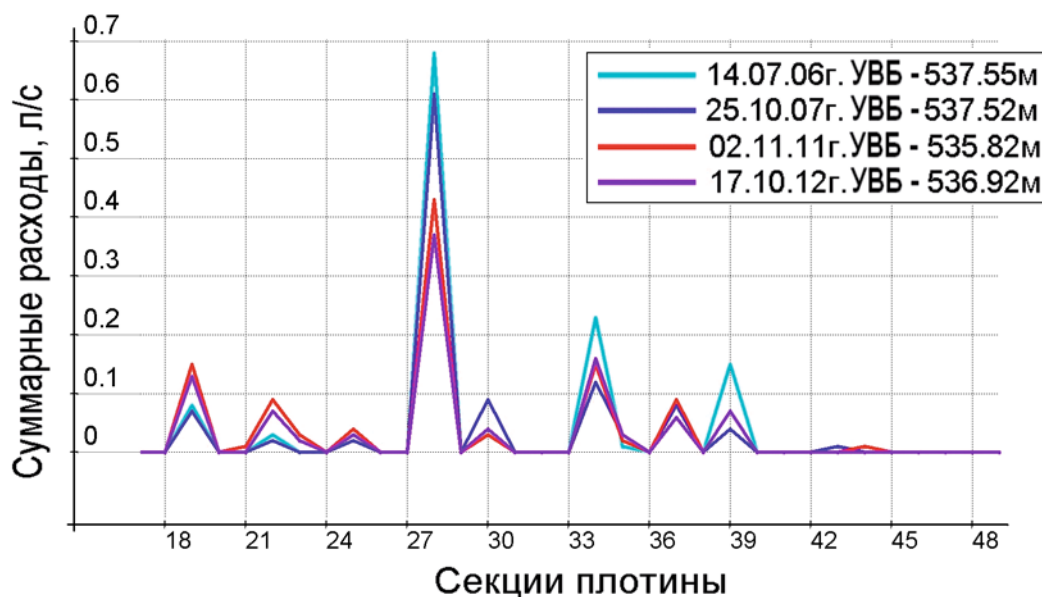


Рис. 4. Фильтрационный расход через бетон плотины по секциям в зоне между отметками 344 – 359 м

Снижение расходов в основании плотины обусловлено в основном ремонтом цементзавесы в береговых примыканиях в период с 2006 по 2009 г. (рис. 6).

Наиболее значимыми сейсмическими событиями в последний год явились три землетрясения, произошедшие в Республике Тыва к востоку от г. Кызыла. На рис. 7 показаны расположение эпицентров и параметры этих землетрясений. Эти события не оказали негативного влияния на состояние

гидротехнических сооружений, что подтверждено выполненными в полном объеме инструментальными и визуальными наблюдениями (после каждого землетрясения).

После работы водосброса в 2011 г. существенных изменений в состоянии водобойного колодца не обнаружено, а в 2012 г. холостые сбросы не проводились. Водобойный колодец, ограждающие его конструкции и водосливные лотки эксплуатацион-

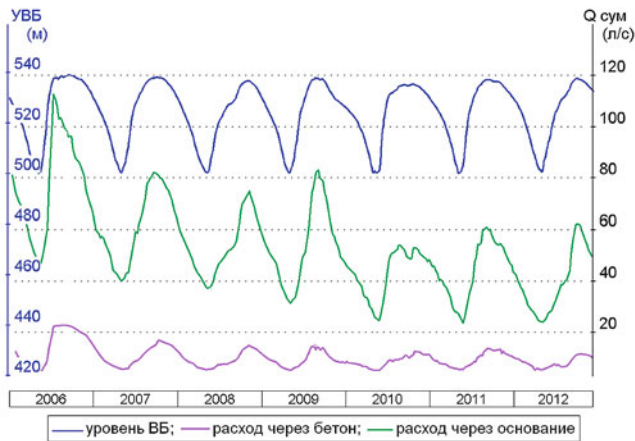


Рис. 5. Фильтрационный расход через бетон плотины и основание плотины

ного водосброса находятся в удовлетворительном состоянии.

Обобщая приведенные выше материалы, можно отметить, что состояние системы “плотина — основание” по завершении этапа наполнения водохранилища в 2012 г. оценивается как нормальное. Все контрольные параметры состояния ГТС меньше соответствующих предупреждающих критериев К1, определенных Декларацией безопасности.

В связи с аварией на втором гидроагрегате, произошедшей в августе 2009 г., состояние плотины оказалось под пристальным вниманием научной

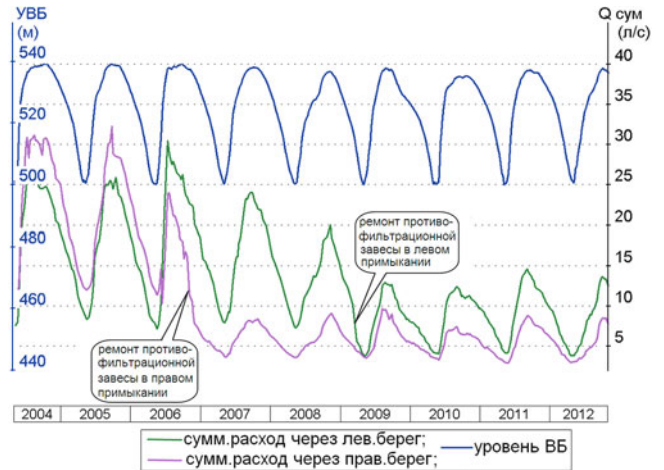


Рис. 6. Фильтрационный расход через основание плотины в левом и правом береговых примыканиях

общественности. Непосредственного влияния на состояние плотины авария не оказала, в этом сходятся мнения всех специалистов. Однако в последующие 2010 – 2012 гг. отмечается заметное при простом сопоставлении некоторое нарастание наклонов сечений плотины и радиальных перемещений в сторону нижнего бьефа, что пока не получило однозначной оценки.

В зимний период 2009 – 2010 гг. при непроектном режиме эксплуатации в плотине произошли су-

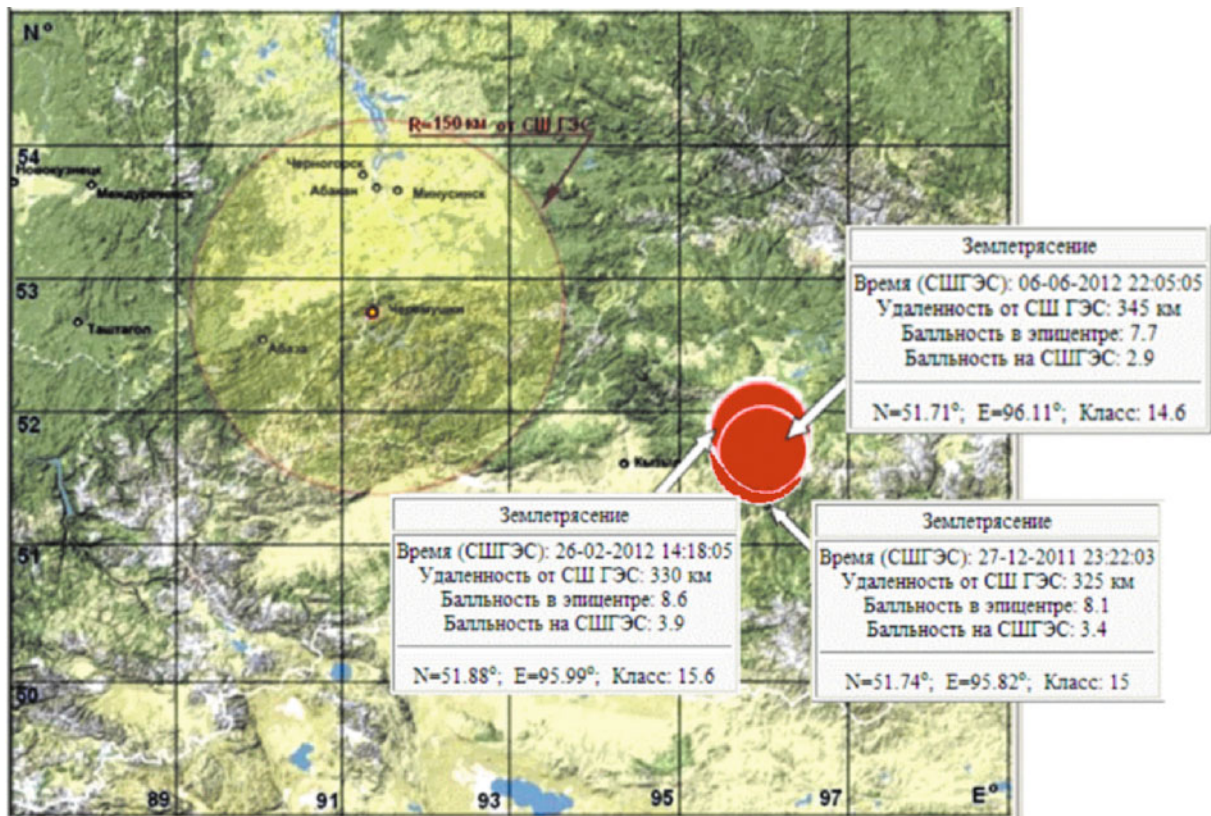


Рис. 7. Расположение эпицентров наиболее сильных землетрясений в районе расположения СШГЭС, произошедших за последний год

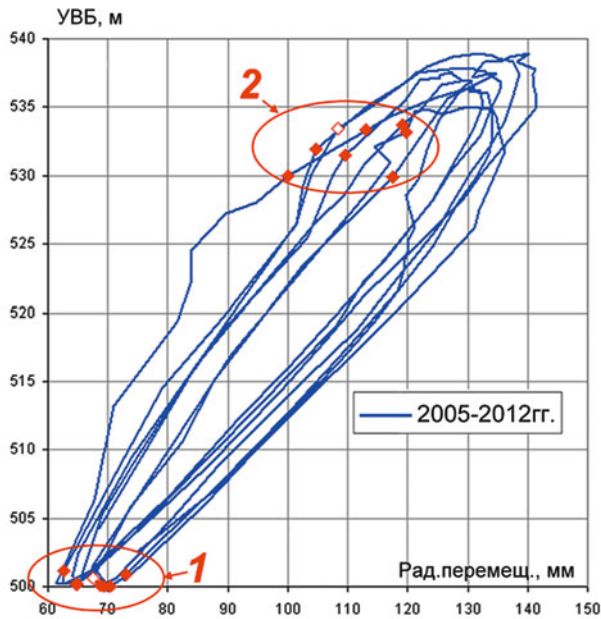


Рис. 8. Подбор состояний плотины для двух серий расчетов по определению необратимой составляющей в перемещениях плотины:

1 — набор состояний плотины для первой серии расчетов; 2 — набор состояний плотины для второй серии расчетов

ущественные изменения в температурном поле, которые могли быть причиной отмеченного приращення перемещений плотины. В последующий год определенное влияние на перемещения плотины оказали менее благоприятные относительно предыдущих лет внешние температурные условия, так как, по данным наблюдений, в 2010 г. среднегодовая температура воздуха в районе гидроузла составила всего 2,4 °С при среднемноголетней температуре 4,5 °С. В последнем цикле наполнение — сработка водохранилища ожидаемого уменьшения радиальных перемещений плотины не произошло. Следовательно, более объективная картина происходящего может быть получена при выделении в перемещениях плотины составляющей, зависящей от температурного фактора.

В службе мониторинга ГТС с применением конечно-элементной модели гидротехнических сооружений СШГЭС [2, 3] проведены расчетные исследования с целью определить, имеет ли место рост необратимых перемещений плотины в сторону нижнего бьефа. Был выбран ряд состояний плотины при минимальном УВБ, по которым были сформированы данные для первой серии расчетов. В качестве “начального” состояния плотины выбрано ее состояние на 26 апреля 2005 г., а в последующие 2006 – 2012 гг. выбрано еще семь “конечных” состояний (табл. 1, рис. 8).

Дополнительно, для подтверждения результатов первой серии расчетов была проведена вторая серия расчетов с подбором состояний при достаточно

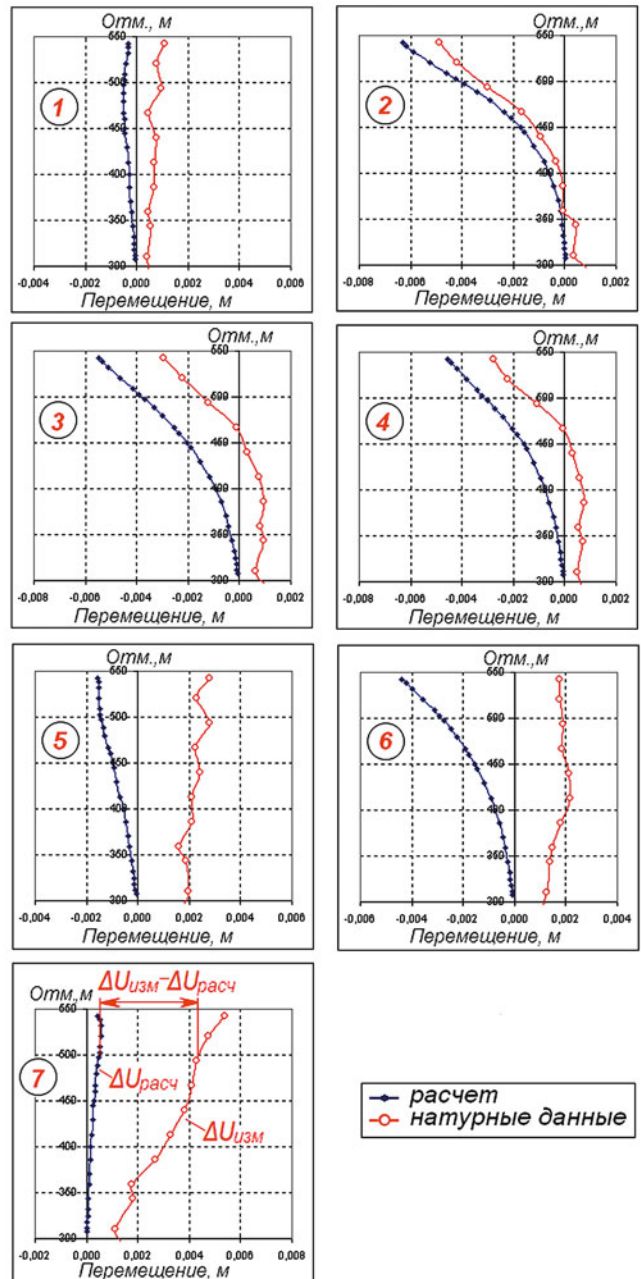


Рис. 9. Радиальные перемещения в секции 33. Рост расхождения между результатами расчета и данными измерений: номера в кружках — номера расчетных случаев

больших УВБ, в диапазоне 530 – 534 м, на ветви наполнения водохранилища (табл. 2). Следует отметить, что выбор даты для того или иного состояния был продиктован моментом проведения полного цикла замеров плановых перемещений плотины с помощью прямых и обратных отвесов.

Результаты расчетов первой серии частично приведены на рис. 9. На рисунке для каждого расчетного случая показаны приращения перемещений относительно начального состояния $\Delta U_{изм}$ в секции 33 и $\Delta U_{расч}$, которые получены при расчете. Разницу $\Delta U_{изм} - \Delta U_{расч}$ можно трактовать как искомую величину необратимой составляющей в пере-

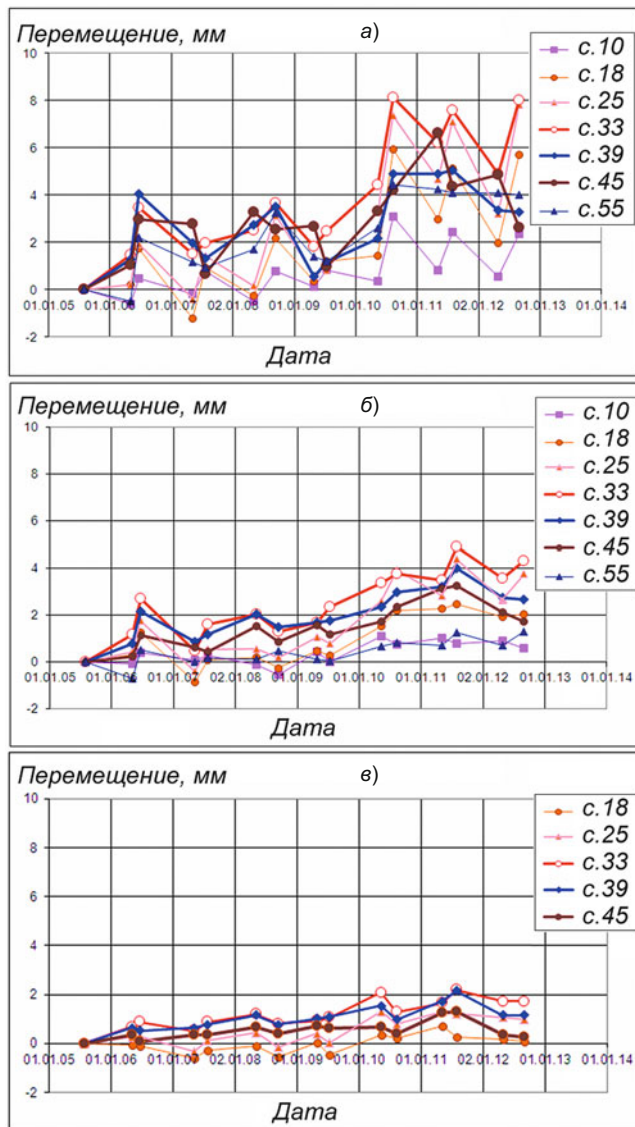


Рис. 10. Рост необратимой составляющей в радиальных перемещениях плотины по результатам двух серий расчетов на гребне (а), в средней части (б) и в нижней части плотины (в)

мещениях. На рис. 9 показано, что во всех случаях расчетная кривая располагается левее линии, полученной при измерениях. Можно отметить и увеличение полученного расхождения с течением времени.

Графики $\Delta U_{\text{изм}} - \Delta U_{\text{расч}}$ для каждой из контрольных секций (10, 18, 25, 33, 39, 45 и 55) показаны на рис. 10 для отметок 542 м (а); 440 м (б) и 344 м (в). Графики объединяют результаты двух серий расчетов, и по характеру ломаных линий, по размаху резких скачков полученных параметров можно судить о точности расчетов (в совокупности с точностью измерений). При этом общая тенденция накопления необратимых перемещений просматривается для всех секций. По графикам видно, что указанный процесс имеет общие признаки для верхней, средней и нижней части плотины. Их общность в том, что в течение 2006 – 2009 гг. накопление перемещений происходило более интенсивно в правой части плотины, в последующие

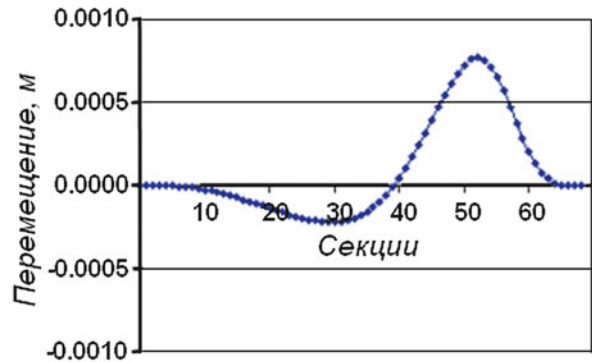


Рис. 11. Радиальные перемещения на гребне плотины, обусловленные инъекционными работами в правобережном примыкании в 2006 г. (расчет)

2010 – 2012 гг. накопление происходило в целом по всему фронту плотины. В численном выражении данный процесс характеризуется суммарным приращением перемещений на гребне за семь лет порядка 4 – 6 мм, что составляет менее 1 мм в год.

В связи с нарастанием необратимых перемещений плотины в течение всего так называемого постремонтного периода (после 2004 г.) необходим анализ причин, обуславливающих этот процесс.

В первую очередь следует отметить, что процесс накопления перемещений плотины происходил в условиях, когда максимальный уровень ВБ в последние пять лет по разным причинам был ниже НПУ = 539 м на 1,1; 2,5; 1,3; 3,9; 2,0 м. Следовательно, проблему накопления необратимых перемещений неправомерно связывать с тем, что отметка нормального подпорного уровня, равная 539 м, является завышенной и, по мнению ряда специалистов, для обеспечения должного уровня безопасности гидротехнических сооружений СШГЭС ее необходимо понизить.

Можно указать в качестве предположений ряд причин, которые имели место в те или иные годы в течение рассматриваемого периода.

Одной из причин накопления перемещений могут являться отклонения в температурных полях в бетоне низовой грани станционной части плотины за счет изменения температуры железобетонной облицовки турбинных водоводов, не заполненных водой. Однако данный фактор стал действовать в течение последних трех лет.

Не исключено, что и в основании плотины могли произойти некоторые процессы необратимого характера, чему способствовало динамическое воздействие от проведенных в 2005 – 2009 гг. многочисленных взрывов, осуществленных при строительстве объектов берегового водосброса [4]. Первые взрывы в 2005 г. были проведены со стороны ВБ при разработке котлована под входной оголовок. В 2006 г. общее количество взрывов достигло 606. Взрывы в подходной штольне и в водосброс-

ных туннелях, расположенных на удалении от плотины от 100 м и более, имели массу заряда в несколько килограммов. Но массовые взрывы на перепадном участке водосброса на удалении от плотины 1000 – 1500 м имели суммарную массу заряда взрывчатых веществ до 15 т. С точки зрения статической и динамической прочности подобные воздействия считаются незначительными.

К одной из причин накопления необратимых перемещений плотины можно отнести техногенные вмешательства в состояние основания. В период после 2004 г. (постремонтный) проводились работы по ремонту цементационной завесы в скальном массиве правобережного и левобережного примыканий плотины.

Так, в течение 2006 г. при ремонте цемзавесы в скальное основание секций 52 – 56 было закачено в общей сложности более 10 т эпоксидных компаундов и более 26 т цемента (в виде раствора).

В работе [3] показано, как расчетным путем с применением конечно-элементной модели исследовались параметры воздействия при проведении ремонтных работ и соответствующие изменения в НДС сооружения. Наиболее важными в тот момент представлялись изменения в вертикальных перемещениях плотины, произошедшие на контакте плотины с основанием. Однако имеется влияние такого техногенного вмешательства и на радиальные перемещения плотины. На рис. 11 дан график приращений радиальных перемещений на гребне, обусловленных инъекционными работами в правобережном примыкании в пределах секций 52 – 56.

В 2008 – 2009 гг. в несколько этапов ремонтные работы проводились в левобережном примыкании. При этом зона воздействия была аналогичной, объемом закачанного через скважины материала составил 41 т цемента, что позволяет оценивать проведенное в левом примыкании вмешательство как симметричное, которое может вызвать такого же порядка изменения в состоянии плотины.

Влияние подобных воздействий на радиальные перемещения на гребне плотины можно оценить как незначительные, так как величина дополнительного перемещения, согласно расчету, не превышает 1 мм в береговых примыканиях (в секциях 10 – 15 и 50 – 55) и ничтожно мала для русловой

части плотины. Следовательно, мала вероятность, что данные инъекционные работы в скальном основании являются основной причиной роста перемещений плотины в последние годы.

Для выявления причин накопления необратимой составляющей перемещений плотины необходимо продолжить исследования в данном направлении с привлечением широкого круга научно-исследовательских организаций.

Выводы

1. Состояние системы “плотина — основание” на 30 октября 2012 г. оценивается как нормальное. Все контрольные параметры состояния ГТС меньше предупреждающего критерия К1, определенно Декларацией безопасности.

2. В отношении таких параметров, как наклоны сечений плотины и радиальные перемещения, в последние годы отмечаются рост и наличие необратимой составляющей. Проведенные расчетные исследования дают оценку накопления необратимых перемещений в сторону нижнего бьефа за период с 2005 г. по настоящее время на уровне 4 – 6 мм для гребня плотины.

3. Очевидные причины необратимых процессов в системе “плотина — основание”, такие, как адаптация плотины к основанию, присущая начальному периоду эксплуатации ГТС, или последствия ремонтных работ в теле плотины и основании, в настоящее время отсутствуют. Необходимо продолжение исследований по данной тематике.

Список литературы

1. Брызгалов В. И., Епифанов А. П., Булатов В. А. и др. Опыт инъекционного фильтрования трещин в напорной грани плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Гидротехническое строительство. 1998. № 2. С. 2 – 8.
2. Александров Ю. Н. Разработка математической модели для оценки напряженно-деформированного состояния гидротехнических сооружений СШГЭС // Вестник Краснояр. гос. архит.-строит. акад. 2003. Вып. 6. С. 16 – 27.
3. Александров Ю. Н. Использование расчетной модели плотины Саяно-Шушенской ГЭС для оценки и прогнозирования ее состояния // Гидротехническое строительство. 2008. № 11. С. 66 – 71.
4. Затеев В. Б. Сейсмометрический контроль плотины Саяно-Шушенской ГЭС при взрывах // Гидротехническое строительство. 2008. № 11. С. 52 – 57.

Оценка несущей способности плотины Саяно-Шушенской ГЭС по данным натуральных наблюдений в послеаварийный период эксплуатации (2009 – 2012 гг.)

Вульфович Н. А., зам. начальника отдела
расчетных обоснований сооружений (ОАО “Ленгидропроект”)

Анализируется влияние температурного фактора на напряженно-деформированное состояние плотины СШГЭС. Показывается необратимый характер изменений плотины после работы в штатном режиме зимой 2009/10 г. Называются возможные причины снижения конструкционного модуля деформации плотины. Даются рекомендации по величине предельно-допустимого уровня заполнения водохранилища.

Ключевые слова: плотина СШГЭС, напряженно-деформированное состояние, температурный фактор, предельно-допустимый уровень заполнения водохранилища.

До аварии 17 августа 2009 г., плотина Саяно-Шушенской ГЭС прошла через три стадии своей работы. На первом этапе, в 1990 – 1995 гг., на заполнение водохранилища производилось до проектного НПУ = 540 м в условиях, когда первые столбы плотины были ослаблены сквозными трещинами в зоне отм. 344 – 359 м, а под напорной гранью имелась зона разуплотнения основания, распространявшаяся до середины второго столба [1]. В этот период в плотине активно протекали процессы накопления необратимых деформаций. К началу ремонтных работ в 1995 г. необратимая составляющая перемещений гребня секции 33 составила 45 мм.

Ремонтные работы проводились в течение 1995 – 2003 гг. при УВБ, близком к НПУ, путем инъектирования трещин (при их максимальном раскрытии) полимерными материалами, которое сопровождалось изменениями в статической схеме работы сооружения, поскольку заполнитель трещин препятствовал их закрытию при сработке водохранилища.

Из-за невозможности возврата в первоначальное положение при УМО = 500 м необратимая составляющая радиальных перемещений гребня секции 33 увеличилась на 18 мм и после ремонта достигла 63 мм. В результате уменьшился размах радиальных перемещений гребня плотины при наполнении-сработке водохранилища с 90 – 95 до 70 – 75 мм. Изменился еще один показатель плотины. Необходимость обеспечения сохранности отремонтированных зон плотины и основания потребовала снизить НПУ до отм. 539,0 м.

Анализ данных натуральных наблюдений показал, что адаптация системы “плотина — основание” к новым условиям своей работы практически завершилась к 2005 г. В последующие годы вплоть до аварии 17 августа 2009 г. в сооружении не было выявлено сколько-нибудь значимого роста необратимой составляющей перемещений. Однако сработка водохранилища в 2009/10 г. протекала в условиях

беспрецедентно холодной зимы и асимметричного изменения режима охлаждения низовой грани плотины, когда на водосливной грани плотины при работающем водосбросе поддерживалась положительная температура, а в опорожненных водоводах станционных секций — отрицательная температура.

После зимы 2009/10 г. плотина испытала уже три цикла наполнения-сработки водохранилища. Если в годы, предшествовавшие аварии, показатели смещения плотины в сторону НБ на момент сработки водохранилища стабилизировались и составляли порядка 63 мм с некоторыми отклонениями от этой величины, вызванными локальными причинами статического и температурного происхождения, то в последние три года указанный показатель вырос до 72 мм (табл. 1). В первый год после аварии предполагалось, что это явление временного порядка, связанное с переохлаждением низовой грани. И в качестве меры, компенсирующей последствия этого эффекта, начало заполнения водохранилища в 2010 г. было отодвинуто до конца мая с целью создать условия для предварительного прогрева низовой грани плотины. Однако показатели 2011 – 2012 гг. остались на этом же уровне 73 мм, что свидетельствует о том, что невозврат плотины в положение, предшествующее аварии, имеет необратимый характер.

Одним из способов выявления необратимой составляющей перемещений состоит в том, что при сравнении натуральных перемещений для учета различий в нагрузках и воздействиях на момент проверки используют расчетные значения гидростатической и температурной составляющих перемещений, полученных в предположении упругого характера деформирования материалов плотины и основания.

Температурное воздействие для арочной плотины, как многократно статически неопределимой неразрезной конструкции, имеет существенное влияние на поведение сооружения в эксплуатации

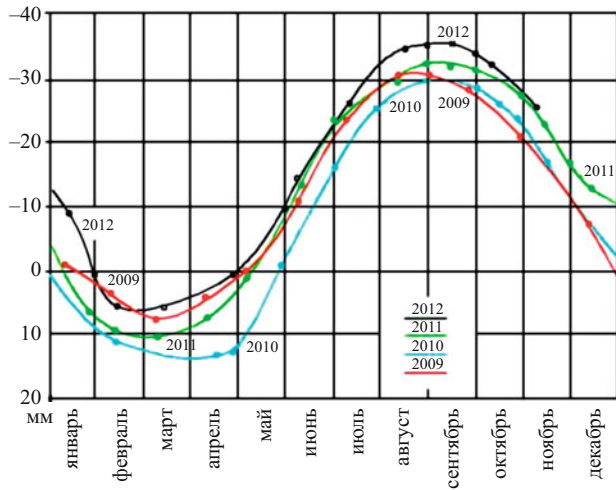


Рис. 1. Температурные составляющие радиальных перемещений в 2009 – 2012 гг.

онный период. Для оценки его роли в формировании напряженно-деформированного состояния плотины до и после аварии были выполнены расчеты термонапряженного состояния сооружения с использованием полей температур, построенных по данным натурных измерений. На рис. 1 представлены графики изменения температурных составляющих радиальных перемещений гребня секции 33, построенные для 2009 – 2012 гг. В табл. 2 приведены экстремальные значения указанных величин. Как следует из представленных графиков, температурные составляющие перемещений периодически изменяются в годовом цикле.

В холодный период года при охлаждении низовой грани плотина под влиянием температур получает смещение в сторону НБ, т.е. по направлению действия гидростатической нагрузки. Как следует из приведенных графиков, эти смещения достигают своего максимума в марте и охватывают диапазон значений 6,2 – 13,0 мм. К этому времени водохранилище уже сработано до отм. 518 – 523 м, т.е. гидростатическая составляющая перемещений составляет половину от максимального значения при НПУ, поэтому равнонаправленность двух воздействий не представляет опасности для сооружения.

В теплый период года имеет место обратная картина. За счет нагрева низовой грани плотина получает перемещение, направленное против действия гидростатического давления. Как следует из результатов температурных расчетов, разгружающий эффект температурного фактора является весьма значительным — до 29,8 – 35,0 мм, что составляет 30 % от величины гидростатической составляющей перемещений. Отметим, что пиковых значений температурная составляющая перемещений достигает в середине августа — середине сентября, т.е. к моменту завершения процесса наполнения водохранилища.

Различие в максимальных значениях температурной составляющей перемещений, как это следует из табл. 2, может достигать 5 мм. Это эквивалентно перемещениям, вызываемым изменением уровня воды в водохранилище на 1,5 м. Таким об-

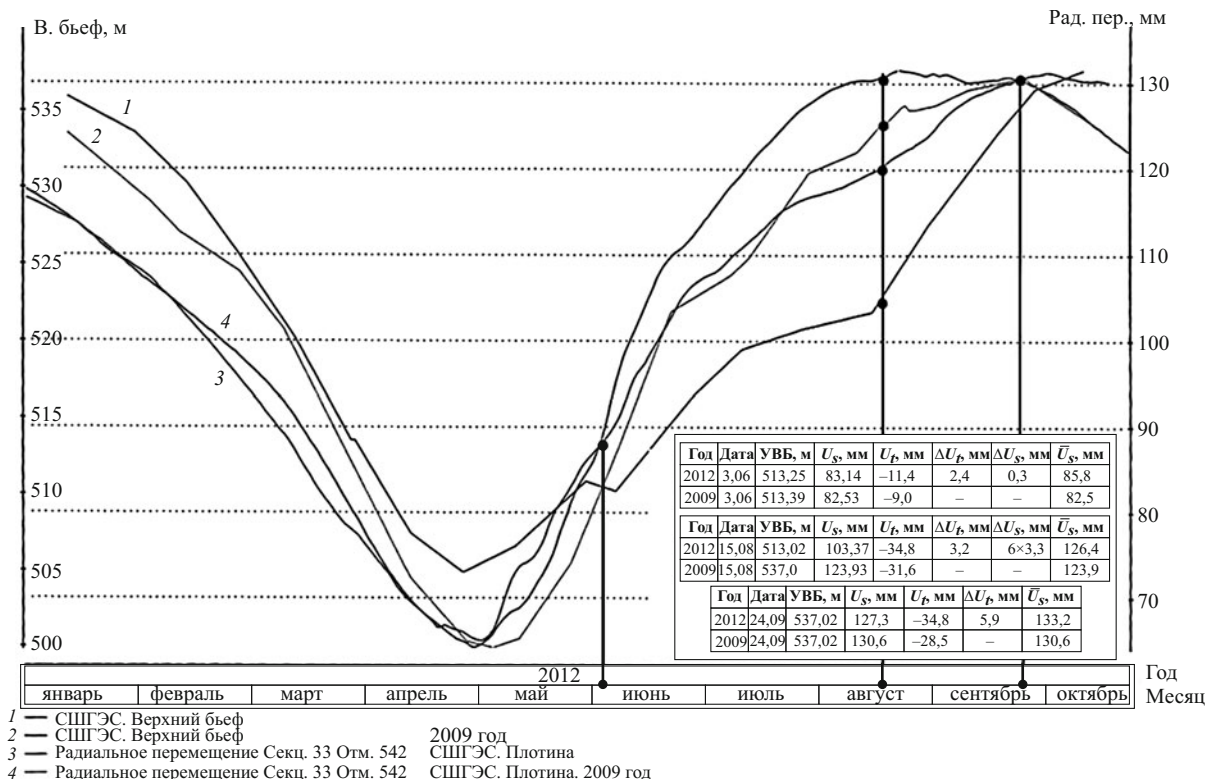


Рис. 2. Изменение УВБ и радиальных смещений гребня секции 33 в 2009 и 2012 гг.

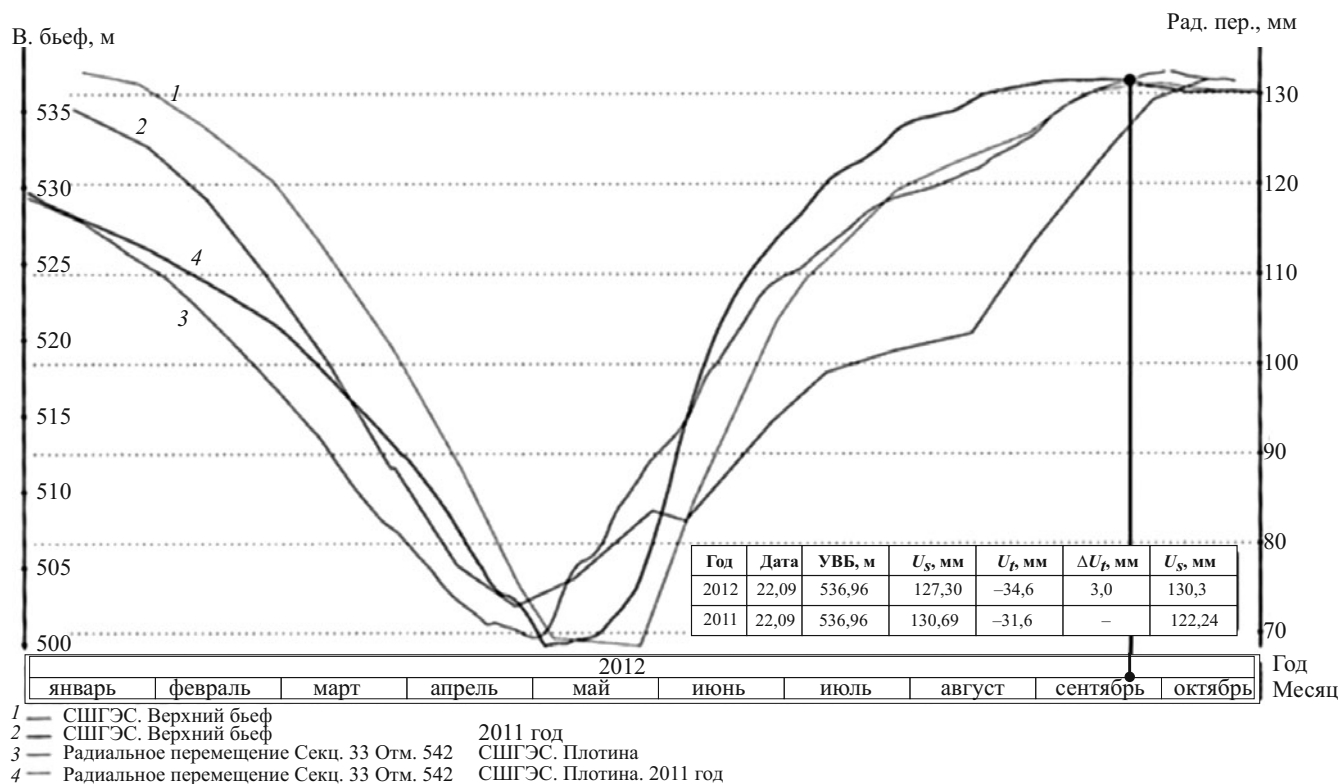


Рис. 3. Изменение УВБ и радиальных смещений гребня секции 33 в 2011 и 2012 гг.

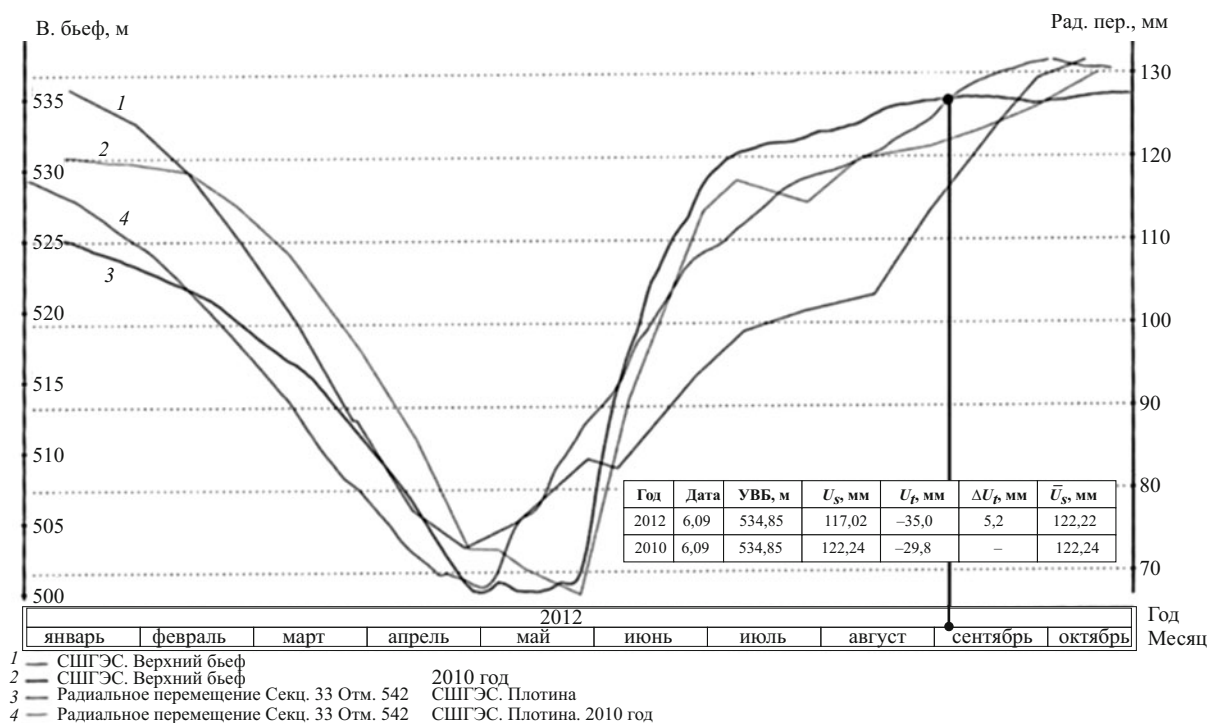


Рис. 4. Изменение УВБ и радиальных смещений гребня секции 33 в 2010 и 2012 гг.

разом, вопрос выбора допустимой отметки заполнения водохранилища следует увязывать с прогнозом ожидаемого эффекта разгрузки от прогрева низовой грани плотины. Как свидетельствуют данные табл. 2, размах температурных перемещений плотины

представляет собой практически постоянную величину. Отсюда следует, что чем меньшим оказывалось охлаждение плотины в холодный период года, тем большего эффекта от разогрева низовой

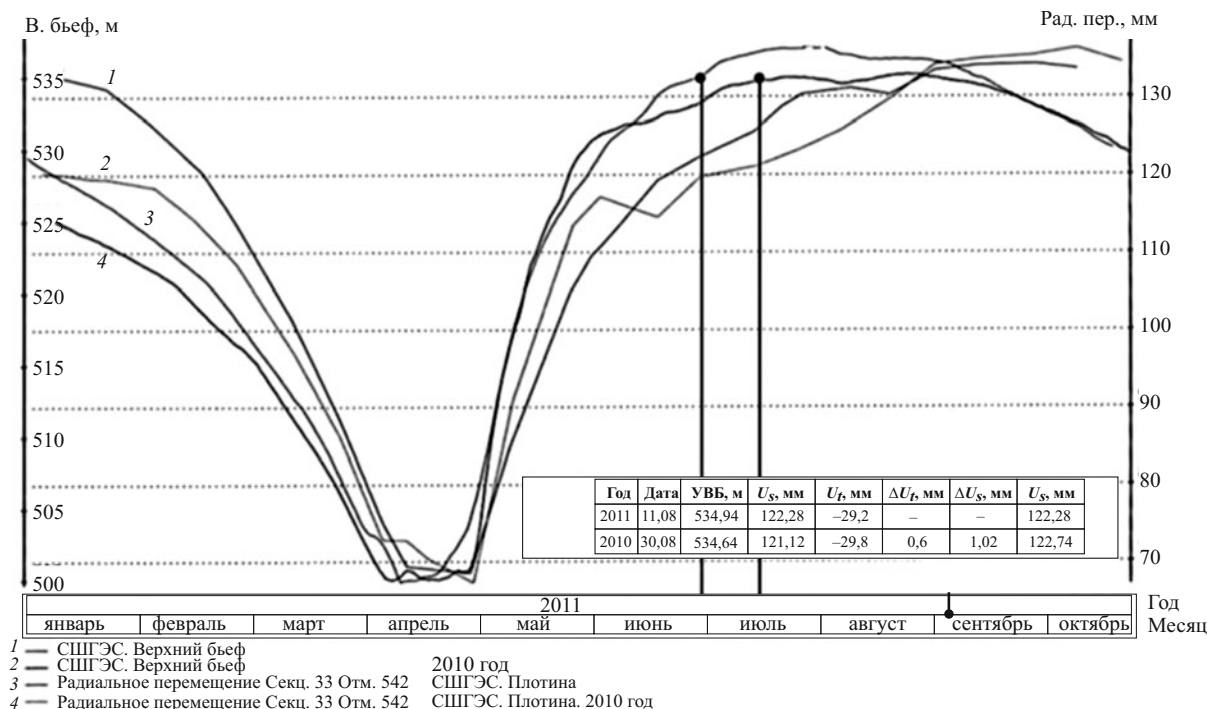


Рис. 5. Изменение УВБ и радиальных смещений гребня секции 33 в 2010 и 2011 гг.

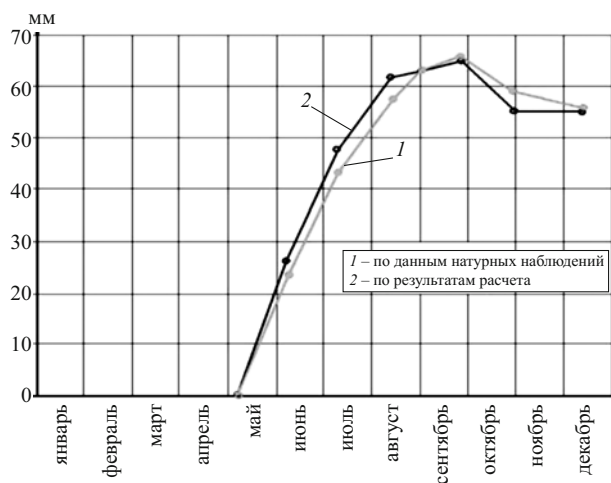


Рис. 6. Приращения перемещений в секции 33 на отм. 542,0 м в 2009 г.

границы можно ожидать в летний период, как это имело место, например, в 2012 г.

С учетом температурной составляющей, определенной расчетным путем, был проведен анализ измеренных значений радиальных перемещений плотины в 2009 – 2012 гг. При этом сравнивались показатели 2009 и 2012 гг. (рис. 2), а также показатели 2011 и 2012 гг. (рис. 3), 2010 и 2012 гг. (рис. 4), 2010 и 2011 гг. (рис. 5). В первом случае в качестве контрольных точек рассматривались моменты времени при разных (15,08) и одинаковых (3,06 и 24,09) уровнях заполнения водохранилища в указанные годы. На эти даты расчетом определялись разности значений гидростатической (ΔU_s) и тем-

пературной (ΔU_t) составляющих радиальных перемещений для сравниваемых лет наблюдений, затем значения полных перемещений приводились к одинаковым статическим и температурным условиям (U_s). В результате было выявлено наличие необратимой составляющей в перемещениях, полученных плотиной после 2009 г. Она достигает 3 – 3,5 мм. Вместе с тем сравнительный анализ натуральных перемещений, полученных плотиной в 2010 – 2012 гг., не выявил тенденции дальнейшего развития деструктивных процессов в сооружении. Правда, в эти годы уровень заполнения водохранилища не превышал отм. 537,5 м.

Рассмотрим еще один прием, используемый для анализа данных натуральных наблюдений. Оценку изменений состояния сооружения проведем путем сравнения измеренных и расчетных значений перемещений и анализа невязки между этими показателями. Если расчеты выполнялись в предположении упругого характера деформирования плотины, то в случае работы сооружения в упругой стадии на всем пути циклического нагружения (разгрузки) следует ожидать сохранения устойчивого характера согласования данных измерений и результатов расчетов. При увеличении невязки можно говорить о неупругом поведении плотины.

Сравнение расчетных и измеренных показателей состояния плотины в 2009 г. показывает достаточно высокую степень их согласования. Это является свидетельством того, что плотина в ходе годового цикла в целом сохраняла упругий характер своей работы. Вместе с тем в 2010 – 2012 гг. отме-

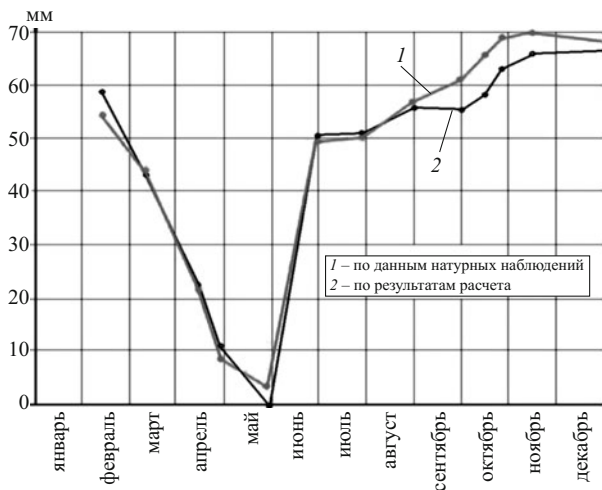


Рис. 7. Приращения перемещений в секции 33 на отм. 542,0 м в 2010 г.

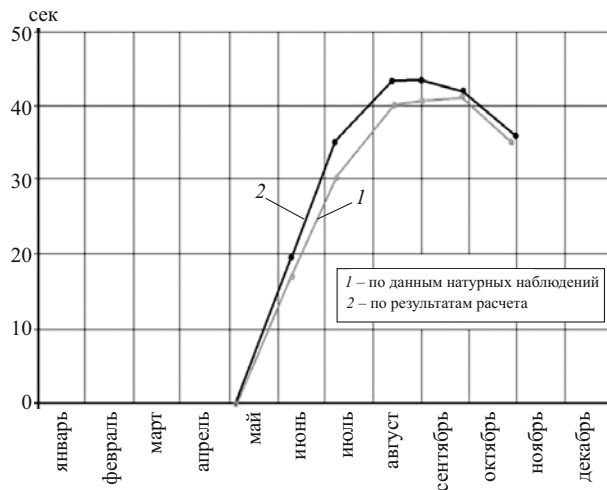


Рис. 8. Приращения углов поворота в секции 33 на отм. 359,0 м в 2009 г.

чается расхождение измеренных и расчетных значений перемещений в сентябре — феврале за счет роста измеренных значений, что свидетельствует об уменьшении реального конструкционного модуля плотины в этот период работы сооружения.

Причиной снижения конструкционного модуля плотины могло стать дополнительное раскрытие межстолбчатых и межсекционных швов, обусловленное особенностями температурного режима сооружения, условиями ее статического нагружения зимой и весной в 2009 – 2010 гг.

Как известно, для обеспечения совместной работы арочной плотины температуру замыкания швов принимают близкой к средней установившейся температуре в период эксплуатации [2]. Для арочно-гравитационной плотины СШГЭС по высоте были назначены две температуры: + 7 °С ниже отм. 500 м и + 5 °С выше отм. 500 м. Более низкая температура замыкания, принятая для верхней части плотины, была выбрана с целью создать перво-

начальное обжатие верхних арок в зоне контакта с береговыми примыканиями. Дело в том, что плотина СШГЭС работает по схеме так называемых ныряющих арок. У нее в русловой части максимум сжимающих напряжений располагается на отм. 504 – 515 м, в зоне береговых примыканий — на отм. 355,0 – 375,0 м. При такой схеме работы ненагруженными оказываются береговые секции в верхней части плотины, что в зимний период создает опасность раскрытия строительных и контактных швов.

Весной 2010 г., когда средние значения эксплуатационных температур в обширных зонах бетона плотины оказались ниже температур замыкания, положение усугублялось тем, что там, где охлаждение в строительных швах привело к появлению растягивающих напряжений, они не были компенсированы сжатием от действия гидростатического давления, поскольку после сработки водохранилища до УМО его заполнение не производилось в течение месяца.

Положение дел с нижней частью плотины можно оценить, рассматривая изменение углов поворота горизонтальных сечений ключевой секции 33, расположенных на отм. 308, 344 и 359 м. Как и при анализе радиальных перемещений, исследовались изменения углов поворота в процессе наполнения и опорожнения водохранилища в 2009 – 2012 гг. При этом имелось в виду, что углы поворота горизонтальных сечений, определяемые по значениям осадок марок поперечных гидронивелиров в минимальной степени зависят от сезонных изменений температур окружающей среды, т.е. значения углов в основном определяются величиной гидростатического давления. Это подтверждается результатами сравнения углов поворота, построенных по данным натурных наблюдений. На рис. 6 – 7 представлены попарно графики изменения УВБ и углов по-

Т а б л и ц а 1

Радиальные перемещения гребня секции 33 на момент сработки водохранилища, мм

Год	Дата	УВБ	** $t_{бет}$	U_s , мм	U_s^* , мм
2007	3,05	500,18	9,0	62,6	62,3
2008	3,05	500,33	5,3	65,0	64,4
2009	3,05	500,31	6,6	64,3	63,7
2010	3,05	500,14	5,2	72,8	72,5
2011	3,05	500,26	6,4	71,5	71,0
2012	3,05	500,48	5,0	74,3	73,4

* С приведением УВБ к отм. 500 м.

** $t_{бет}$ на расстоянии 0,6 м от низовой грани на отм. 504 м.

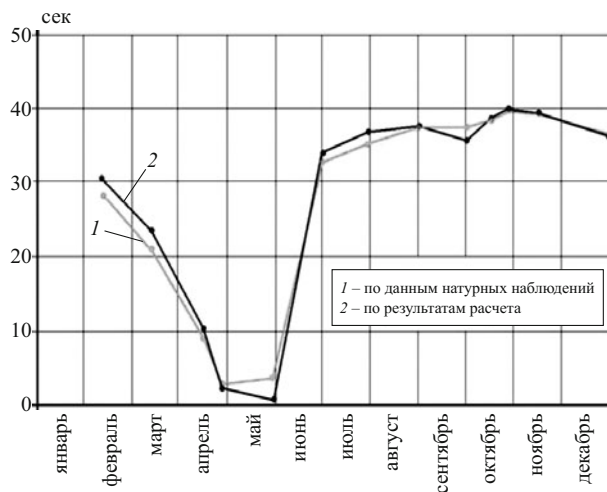


Рис. 9. Приращения углов поворота в секции 33 на отм. 359,0 м в 2010 г.

ворота для 2009 и 2010 гг. Сопоставление значений углов, полученных при одинаковых УВБ (отсчет от 04.05.1989 г.), показывает их идентичность. Это свидетельствует об упругом характере деформирования нижней части плотины СШГЭС и отсутствии каких-либо изменений в схеме работы этой части плотины, произошедших после 2009 г.

К тем же выводам можно прийти путем сравнения измеренных и расчетных значений углов поворота. На рис. 8 – 9 приведены временные графики изменения этих показателей, где за начало отсчета принято 05.05.2009 г. Следует отметить высокую степень согласованности результатов расчета и данных натуральных наблюдений как до аварии в 2009 г., так и после аварии в 2010 г. Принимая во внимание, что расчеты выполнялись в предположении упругой работы плотины, можно сделать вывод о том, что в углах поворота, построенных по данным натуральных наблюдений, отсутствует необратимая составляющая.

Если плотина после зимы 2009/10 г. получила необратимые перемещения в сторону НБ, то при равных статических и температурных условиях следовало бы ожидать в плотине повышения уров-

Т а б л и ц а 2

Экстремальные значения температурных составляющих радиальных перемещений гребня секции 33

Год	min U_r , мм	max U_r , мм	Размах перемещений, мм
2009	6,2	- 31,9	38,1
2010	13,0	- 29,8	42,8
2011	10,5	- 32,0	42,5
2012	6,4	- 35,6	42,0

ня сжимающих напряжений в арочном направлении.

Поскольку анализ углов поворота горизонтальных сечений показал, что нижняя часть плотины не получила необратимых изменений в результате нештатных условий эксплуатации после аварии 17 августа 2009 г. этот эффект должен был проявить себя по отношению к верхним арочным поясам плотины.

Данные табл. 3 – 4 подтверждают правильность этих предположений о характере изменений напряженного состояния плотины.

Т а б л и ц а 3

Арочные напряжения в бетоне секции 33, МПа

Розет.	РОНГ	Отметка, мм	УВБ, м				
			500,3	500,3	500,3	500,1	500,5
			Годы				
			2008	2009	2010	2011	2012
174	1,5	534,4	- 3,5	- 3,7	- 3,5	- 4,2	- 3,9
176	13,3		- 5,7	- 5,8	- 6,0	- 6,1	- 6,3
177	17,9		- 3,4	- 3,5	- 3,3	- 3,4	- 3,5
178	23,7		- 4,7	- 4,8	Н. з.	- 5,0	- 4,8
151	1,3	504,5	- 4,0	- 4,1	- 4,0	- 4,3	- 4,9
152	8,5		- 6,0	- 6,1	- 6,3	- 6,3	- 6,5
153	11,8		- 4,4	- 4,5	- 4,8	- 4,9	- 5,1
155	25,6		- 3,8	- 3,8	- 3,6	- 4,3	- 3,7
83	1,4	462,5	- 7,5	- 7,3	- 7,6	- 7,6	- 7,6
195	29,7	462,5	- 1,5	- 1,5	- 1,4	- 1,6	- 1,6
196	32,1		- 2,6	- 2,6	Н. з.	- 2,8	- 2,6
193	35,2		0,3	0,4	0,4	0,4	0,3
194	37		- 2,9	- 3,1	- 3,2	- 3,3	- 3,4
95	38	436	- 6,9	- 6,8	- 6,2	- 7,1	- 6,6
73	1,7	432	- 7,4	- 7,5	- 7,7	- 7,6	- 7,6
68	27,5	393,5	- 2,7	- 2,6	Н. з.	- 2,6	- 2,6
71	50,91		- 4,7	- 4,6	- 4,6	- 4,7	- 4,7
43	1,5	392,5	- 6,7	- 6,8	- 6,8	- 6,9	- 6,9
44	12,5		- 4,2	- 4,3	- 4,2	- 4,3	- 4,3
45	25,5		- 5,4	- 5,5	- 5,5	- 5,6	- 5,5
131	57	384,2	- 1,0	- 1,1	- 1,2	- 1,1	- 1,2

Дополнительное деформирование, полученное плотиной, приводит к необходимости пересмотра показателей заполнения водохранилища.

Вообще говоря, характерными уровнями водохранилища являются форсированный подпорный уровень (ФПУ), нормальный подпорный уровень (НПУ), уровень мертвого объема (УМО). Нормальным подпорным уровнем, согласно ГОСТ 19185–73, называют наивысший проектный подпорный уровень верхнего бьефа, который может поддерживаться в нормальных условиях эксплуатации гидротехнических сооружений. При этом име-

ется в виду, что этот уровень может длительно поддерживаться подпорным сооружением.

Согласно общепринятой практике при назначении НПУ руководствуются исключительно топографическими, гидрологическими, водохозяйственными и экономическими условиями. Именно на этих основаниях для СШГЭС был принят НПУ = 540,0 м. После проведения ремонтных работ в 1996 – 2003 гг. он был снижен до 539,0 м с целью обеспечения целостности отремонтированных зон в теле плотины и в основании.

Из вышеизложенного следует, что при назначении НПУ для плотины СШГЭС не принимался во внимание температурный фактор, играющий для статически-неопределимых систем, к которым относятся арочные плотины, важную роль. Пока плотина работала по вторичной схеме, т.е. с образованием двух систем трещин — в плотине и под первыми столбами в основании, различия в температурных условиях работы плотины в ходе годичных циклов наполнения-опорожнения водохранилища нивелировались за счет адекватных изменений статической схемы работы плотины, т.е. большим или меньшим раскрытием этих трещин. После инъецирования трещин способность к саморегуляции была утрачена. Для обеспечения целостности отремонтированных зон теперь требуется обеспечить запас сжатия на верховой грани плотины во всем диапазоне изменения УВБ. Для этого величина ра-

Таблица 4
Арочные напряжения в бетоне секции 33, МПа

Розет.	РОНГ	Отметка, мм	УВБ, м		
			537,0	536,8	537,1
			Годы		
			2009	2011	2012
174	1,5	534,4	- 8,5	- 8,9	- 9,2
176	13,3		- 8,3	- 8,6	- 8,7
177	17,9		- 7,4	- 7,4	- 7,4
178	23,7		- 9,9	- 9,9	- 10,3
151	1,3	504,5	- 11,8	- 11,9	- 12,0
152	8,5		- 8,4	- 8,3	- 8,4
153	11,8		- 6,1	- 6,2	- 6,4
155	25,6		- 8,3	- 8,5	- 9,0
83	1,4	462,5	- 10,3	- 9,7	- 9,4
195	29,7		- 4,1	- 4,2	- 4,4
196	32,1		- 4,7	- 5,0	- 5,5
193	35,2		- 0,5	- 0,5	- 0,8
194	37		- 3,4	- 4,0	- 4,1
95	38	436	- 9,9	- 10,0	- 10,5
73	1,7	432	- 8,8	- 8,8	- 8,8
68	27,5	393,5	- 3,4	- 3,3	- 3,3
71	50,91		- 7,3	- 7,6	- 7,6
43	1,5		392,5	- 7,3	- 7,4
44	12,5	- 5,2		- 5,5	- 5,5
45	25,5	- 6,1		- 6,2	- 6,2
131	57	384,2	- 1,9	- 2,1	- 2,2

Таблица 5
Секция 33. Изменение радиальных перемещений U_s и их температурных составляющих U_t в начальный период сработки водохранилища в 2010 – 2012 гг.

Дата	Фактические значения		Допустимые значения		U_p , мм, по расчету
	УВБ, м	U_s , мм по данным измерений	УВБ, м	U_s , мм	
9.09.2010	534,94	123,20	537,0	130,0	29,7
14.10.2010	535,06	129,92	537,0	136,9	26,0
28.10.2010	534,88	134,14	537,0	141,5	23,3
15.09.2011	536,98	130,31	538,0	133,9	32,0
30.09.2011	536,46	131,07	538,0	136,5	31,2
28.10.2011	536,00	133,38	538,0	140,4	27,6
30.11.2011	532,92	134,19	534,5	141,8	16,8
30.09.2012	537,46	129,34	538,0	131,8	33,6
29.10.2012	536,31	135,46	538,0	141,1	29,4
15.11.2012	534,95	135,70	536,0	141,1	24,9

диальных смещений гребня секции 33 плотины не должна превышать максимального значения 141,1 мм (начало отсчета май 1989 г.), достигнутого на момент завершения ремонтных работ в 2003 г. Выполнение этого условия возможно при определенных соотношениях между гидростатической и температурной составляющих радиальных перемещений. При этом управление ситуацией осуществимо только путем регулирования уровня заполнения водохранилища.

В этом контексте рассмотрим вопросы определения безопасной отметки заполнения водохранилища СШГЭС, используя данные измерений радиальных перемещений плотины в 2010 – 2012 гг. (табл. 5).

В 2010 г. водохранилище было заполнено до отм. 535 м. Эта отметка выдерживалась в течение более 1,5 месяцев (9.09 – 28.10). К концу периода из-за снижения температурной составляющей радиальные перемещения достигли 134,14 мм. Это существенно ниже критериального значения 141,1 мм. Нетрудно подсчитать, что безопасная в статическом отношении отметка заполнения водохранилища в 2010 г. могла быть повышена до 537,0 м (табл. 5).

В 2011 г. водохранилище было заполнено до отм. 537,0 м (15.09). В течение последующих 1,5 месяцев оно было сработано на 1 м. При этом радиальные перемещения возросли до 133,4 мм за счет снижения величины температурной составляющей перемещений. С учетом изменения гидростатической составляющей перемещений (табл. 6) можно показать, что безопасная отметка “стояния” в период 15.09 – 28.10 могла бы составить 538,0 м.

В 2012 г. водохранилище было заполнено до отм. 537,5 м (30.09). В последующий месяц оно было сработано на 1,1 м. При этом за счет снижения величины температурной составляющей радиальные перемещения достигли 135,5 мм. При указанных обстоятельствах отметка заполнения водохранилища могла быть поднята до 538,0 м и ее можно было удерживать в течение месяца 30.09 – 28.10.2012.

От правильной оценки роли температурного фактора зависит и характер ограничений, накладываемых на темпы заполнения водохранилища. Нетрудно установить, что в рамках четырех послед-

них циклов заполнения водохранилища отм. 530 м достигалась не ранее начала июля (4.07) и не позднее начала августа (6.08). При этом температурная составляющая перемещений в начале указанного периода находилась в диапазоне 17 – 24 мм, а в конце — в диапазоне 27 – 33 мм. Если соотнести эти показатели с перемещениями от гидростатической нагрузки, которые к отм. 530 м составляют 73 мм (принимая отм. 500 м за начало отсчета), то даже при самом неблагоприятном сочетании температурного и силового факторов суммарная величина радиальных перемещений, как это имело место в 2010 г., не превысила 115 мм (начало отсчета — май 1989 г.).

При таких смещениях не возникает опасность перегрузить последующие этапы заполнения водохранилища и создать тем самым угрозу для безопасной эксплуатации сооружения. Поэтому можно практически не вводить ограничений на интенсивность заполнения водохранилища до отм. 525 м.

Стратегия наполнения водохранилища выше указанных отметок должна разрабатываться с учетом принятой для текущего цикла отметки заполнения водохранилища.

Анализ диагностических показателей состояния сооружения в 2010 – 2012 гг. показал, что необратимые радиальные смещения в сторону НБ на гребне плотины достигают 2,5 – 3,0 мм. Это эквивалентно 0,5 – 0,7 метров дополнительного напора. Отсюда следует необходимость снижения максимальной отметки заполнения водохранилища с 539,0 м до 538,5 м с тем, чтобы обеспечить сохранность отремонтированных зон плотины и основания.

Принимая во внимание, что в 2012 г. была достигнута отметка заполнения водохранилища 537,5 м, и, руководствуясь принципом последовательного увеличения нагрузки на сооружение после аварии 17 августа 2009 г., рекомендуется следующий график подъема отметки УВБ: 2013 год – 538,0 м; 2014 год – 538,5 м, при условии положительной оценки состояния сооружения после прохождения предыдущего цикла наполнения-опорожнения водохранилища.

Т а б л и ц а 6

Расчетные значения гидростатической составляющей перемещений, мм, при подъеме УВБ на 1 м

Диапазон изменений УВБ							
500 – 505	505 – 510	510 – 515	515 – 520	520 – 525	525 – 530	530 – 535	535 – 537,5
2,0	2,2	2,4	2,4	2,6	3,0	3,3	3,5

Выводы

1. Анализ диагностических показателей состояния сооружения в 2010 – 2011 гг., проведенный с использованием результатов расчетных исследований, показал:

динамика изменений радиальных перемещений и углов наклона плотины при заполнении водохранилища превышает рост этих показателей в период стабилизации 2004 – 2009 гг., характеризуемой работой сооружения в упругой стадии;

при сработке водохранилища до УМО плотина не возвращается в первоначальное положение.

Все это нельзя объяснить влиянием силовых факторов и особенностями температурного состояния сооружения в рассматриваемые годы, а свидетельствует о необратимых изменениях в статической схеме работы плотины, связанных с нарушениями сплошности строительных швов и раскрытием трещин в основании.

2. Изменение характера работы плотины следует оценивать как последствие нештатных условий сработки водохранилища в 2009 – 2010 гг. после аварии 17 августа 2009 г.

3. Выявленные отклонения в работе плотины в условиях заполнения водохранилища до УВБ 535,0 м в 2010 г., УВБ 537,0 м в 2011 г. и УВБ 537,5 м в 2012 г., не создавали сколь-нибудь значимой угрозы для безопасной эксплуатации сооружения. При указанных параметрах нагружения показатели его состояния не превышали предельно допустимых значений.

4. Однако вопрос о дальнейшем повышении УВБ, вплоть до НПУ 539,0 м, не может решаться

без учета требований обеспечения сохранности отремонтированных зон тела плотины и основания и определенного снижения конструкционного модуля деформации сооружения. Поскольку полученное средневзвешенное значение необратимых радиальных перемещений плотины в сторону НБ составляет в 2,5 – 3,0 мм, что эквивалентно 0,5 – 0,7 м дополнительного напора, следует ограничить подъем максимума УВБ отметкой 538,5 м. При этом с целью проверки запаса несущей способности сооружения для 2013 г. принять отм. 538,0 м.

5. Возможность подъема УВБ до отм. 538,5 м рассматривать после проведения анализа показателей состояния сооружения на предшествующих отметках заполнения водохранилища.

6. Для устранения последствий, приведших к нарушениям сплошности тела плотины, следует рассмотреть возможность повторной цементации части строительных швов в верхней половине плотины перед заполнением водохранилища и инъектирования зоны примыкания межстолбчатого шва I–II плотины к основанию.

Список литературы

1. Вульфович Н. А., Гордон Л. А., Стефаненко Н. И. Арочно-гравитационная плотина Саяно-Шушенской ГЭС. Оценка технического состояния по данным натурных наблюдений. — СПб: ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2012.
2. Фрид С. А., Левених Д. П. Температурные воздействия на гидротехнические сооружения в условиях Севера. — Л.: Стройиздат, Ленинградское отделение, 1978.

Предложения ЦСГНЭО по совершенствованию критериев безопасности плотины Саяно-Шушенской ГЭС

Савич А. И., Газиев Э. Г. (члены комиссии экспертов по оценке системы “плотина — основание” Саяно-Шушенской ГЭС)

Выполненный анализ результатов измерений радиальных смещений плотины прямыми и обратными отвесами показал, что кривые изменения радиальных смещений плотины на различных отметках позволяют построить диаграммы приращений радиальных смещений по всей высоте плотины, т.е. наклонов оси плотины к вертикали.

Ключевые слова: плотина, радиальные смещения, наклон оси плотины.

На выездном заседании комиссии экспертов по оценке системы “плотина — основание” Саяно-Шушенской ГЭС представители филиала ОАО “Институт Гидропроект” — Центра службы геодезических наблюдений в энергетической отрасли выступили с докладами:

углы наклона оси плотины — важный диагностический параметр;

о критериальных показателях прочности сдвигоопасных зон в основании плотины СШГЭС.

В докладе д. т. н. Газиева Э. Г. предлагалось включить в состав диагностических параметров величину углов наклона оси плотины СШГЭС к вертикали.

В настоящее время контроль углов наклона плотины осуществляется поперечными гидростатическими нивелирами, измеряющими наклоны горизонтальных сечений в двух точках ключевой секции плотины на отметках 344 и 359 м. Всего в радиальных галереях шести секций плотины (№№ 18, 25, 32, 33, 39 и 45) установлено 35 поперечных гидронивелиров, которыми измеряются как углы наклона первого и второго столбов, так и общий наклон всего горизонтального сечения плотины статистической обработкой результатов наклона столбов методом наименьших квадратов с введением некоторых эмпирических коэффициентов. Из общего числа 35 контролируемых углов наклона в качестве диагностических параметров специалистами ВНИИГ были выбраны как наиболее достоверные углы наклона только в двух точках ключевой секции 33 плотины на отметках 344 и 359 м. При этом в качестве базы отсчета приняты измерения гидронивелирами, начатые 4 мая 1994 г.

Выполненный в ЦСГНЭО анализ результатов измерений Службой мониторинга СШГЭС радиальных смещений плотины прямыми и обратными отвесами показал, что кривые изменения радиальных смещений плотины на различных отметках позволяют построить диаграммы приращений радиальных смещений по всей высоте плотины, т.е. наклонов оси плотины к вертикали. Причем — это дает возможность определить наклоны с момента

начала измерения радиальных смещений, т.е. с 4 мая 1989 г.

Эти диаграммы позволяют с большой точностью (без использования эмпирических коэффициентов) определить углы наклона оси плотины на всех отметках и во всех сечениях, где проводятся измерения радиальных смещений отвесами. На рис. 1 приведены диаграммы углов наклона оси плотины в секции № 33 за период с 2006 по 2010 гг. при высоких и при низких уровнях водохранилища. В 2006 г. уровень водохранилища был самым высоким за последние годы (538,92 м), что и определило более высокие значения углов наклона оси плотины.

Рассмотрение этих диаграмм углов наклона центральной секции 33 показывает, что при заполнении водохранилища углы наклона вначале возрастают по высоте плотины, а в районе отметок 420 – 440 м их рост замедляется. Это свидетельствует о начале влияния пространственного характера деформирования тела арочно-гравитационной плотины, когда наличие арочного эффекта на верхних поясах плотины начинает сказываться на горизонтальных деформациях ее консолей.

На нижних отметках (до отметки 380 – 400 м) ось центральной консоли плотины имеет практически параболическую кривизну изгиба в сторону нижнего бьефа, о чем свидетельствуют линейные приращения радиальных смещений.

На этом интервале высоты плотины углы наклона горизонтальных сечений при заполнении водохранилища выше УМО практически линейно зависят от отметки и максимальные полученные значения для центральной секции 33 могут быть описаны в первом приближении зависимостью:

$$\alpha = 0,9 \cdot H,$$

где α — угол наклона горизонтального сечения плотины к горизонту в секундах; H — высота исследуемого сечения от отметки 260 м.

При уровне водохранилища 500 м (УМО) изгиб оси консоли прекращается, достигнув примерно

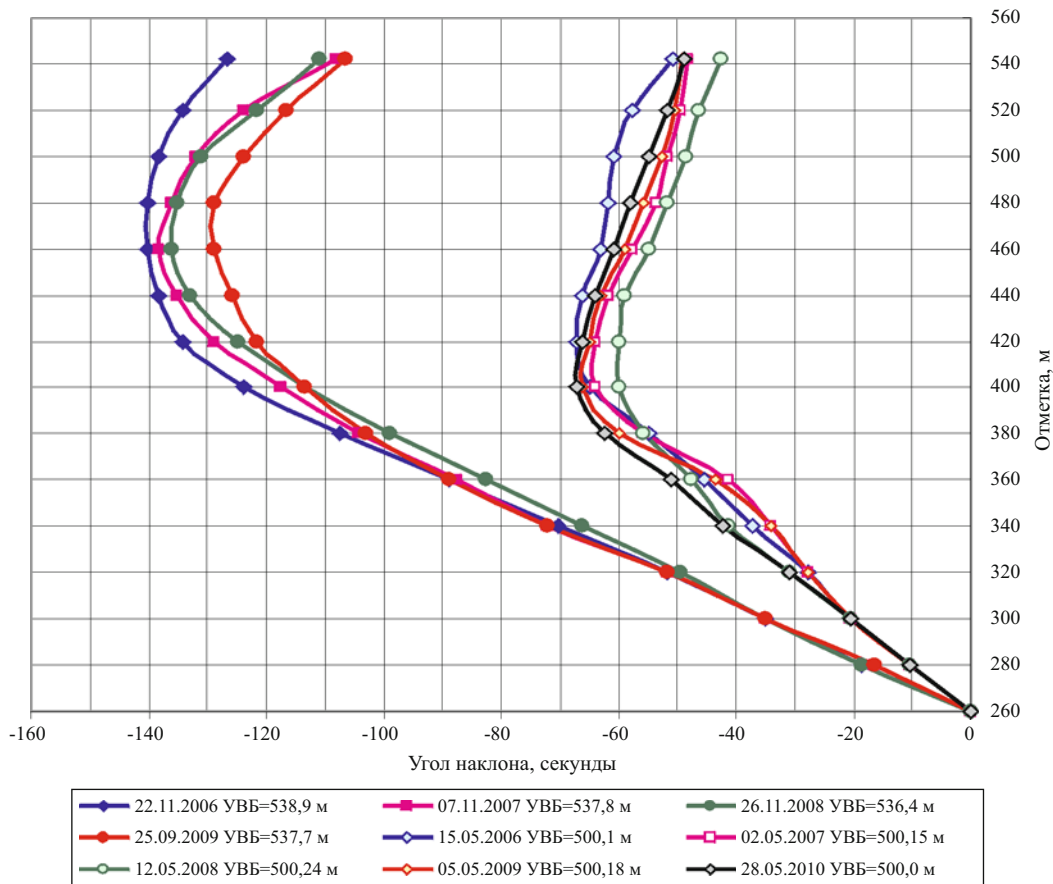


Рис. 1. Углы наклона горизонтальных сечений секции № 33 при высоких и низких УВБ

60 – 68 с на отметке 400 м, а вышерасположенная часть плотины практически не изгибается, лишь слегка выпрямляясь до угла наклона в 50 с (рис. 1).

Обращает на себя внимание достаточно тесное расположение кривых углов наклона оси плотины как при высоких, так и при низких отметках уровня верхнего бьефа, что позволяет говорить о стабильности полученных результатов и о возможности их использования в качестве диагностических параметров при анализе состояния плотины. Следует также иметь в виду, что наклоны оси плотины мо-

гут быть использованы в качестве диагностических показателей деформирования и поведения арочно-гравитационной или арочной плотины в любой секции, где имеются замеры радиальных смещений по высоте плотины.

Доклад д. ф.-м. н. Савича А. И. был посвящен предложению включить в число критериальных показателей параметры прочности сдвигоопасных зон в основании плотины СШГЭС.

Выполненные в ЦСГНЭО на основе разработанных детальных геомеханических моделей массива пород на участке СШГЭС поверочные расчеты НДС и устойчивости арочно-гравитационной плотины показали, что ее безопасность существенно зависит от физико-механических свойств и состояния массива в основании этого сооружения. В частности, установлено, что при определенном снижении прочностных свойств массива в основании плотины возникают локальные зоны пластических деформаций, по которым может произойти разрушение системы “плотина-основание” (рис. 2).

Поверочные расчеты свидетельствуют, что при НПУ = 539 м подобная аварийная ситуация может возникнуть при снижении прочностных свойств в указанных зонах на 25 – 30 %, а при УВБ = 547,5 м такая ситуация может наступить при снижении прочностных свойств всего на 16 – 22 %.

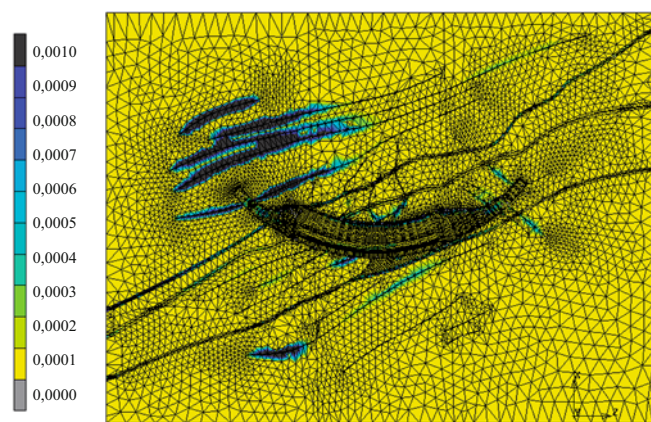


Рис. 2. Изохромы пластических деформаций в скальном основании СШГЭС при уменьшении прочностных параметров всех зон расчетной области в 1,32 раза

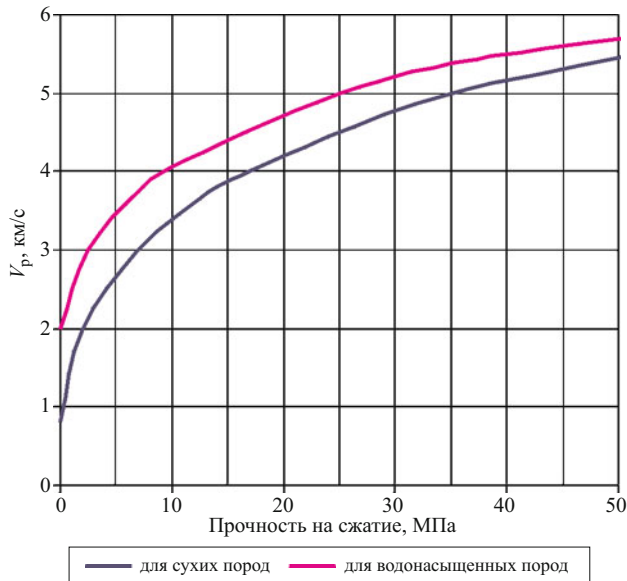


Рис. 3. Связь скоростей V_p с прочностью на сжатие $R_{сж}^M$ для массива сланцев

В проведенных расчетах исходные значения показателей прочности ослабленных частей массива, приуроченных к зонам влияния крупных пологопадающих трещин в сланцах и парасланцах, были приняты равными $\text{tg}\varphi = 0,86 - 1,25$; $C = 1,38 - 2,10$ МПа. Указанным параметрам соответствуют величины показателя прочности массива на сжатие $R_{сж}^M = 6,0 - 12,0$ МПа.

Зоны массива с указанными показателями прочности характеризуются скоростями распространения продольных волн сейсмического диапазона частот $V_p = 3,5 - 4,2$ км/с. Согласно расчетам, аварийная ситуация может возникнуть при снижении величины $R_{сж}^M$ до $4,5 - 9,0$ МПа, чему будет соответствовать уменьшение значений V_p в сдвигоопасных зонах до $3,28 - 3,89$ км/с, т.е. на $6,3 - 7,4$ % (рис. 3).

Поскольку современные технологии позволяют измерять относительные изменения скоростей упругих волн в массиве с погрешностью не более 1 %, то существует реальная возможность отслеживания изменений показателей прочности в локальных участках массива с целью оперативного контроля состояния сдвигоопасных зон.

Выводы

1. Предлагаемый метод измерения углов наклона оси плотины к вертикали позволяет получить

наиболее достоверную информацию о пространственном поведении плотины и об углах наклона ее оси без необходимости использования эмпирических коэффициентов, осредняющих наклоны, полученные гидронивелирами, установленными в различных частях сечения плотины.

2. На интервале высот до отметки 380 м максимальные углы наклона горизонтальных сечений центральной секции плотины (№ 33) в условиях нормальной эксплуатации сооружения практически линейно зависят от отметки, и могут быть описаны линейными зависимостями.

3. Полученный характер изгиба вертикального сечения центральной секции плотины позволяет сделать вывод о том, что наибольшие растягивающие напряжения в бетоне на верховой грани плотины должны быть приурочены к интервалу отметок, где происходят максимальные изменения углов наклона¹ горизонтальных сечений плотины. Для Саяно-Шушенской плотины — это интервал 260 – 380 м.

4. В соответствии с изложенными результатами, свидетельствующими о том, что безопасность плотины существенно зависит от физико-механических свойств и состояния массива в ее основании, предлагается включить в состав критериальных показателей надежности работы плотины СШГЭС величины скоростей упругих волн сейсмического диапазона частот для сдвигоопасных зон массива и организовать стационарные пункты измерения этих параметров.

В случае принятия этого предложения ЦСГНЭО готов подготовить предложения по конкретным значениям V_p для критериев K_1 и K_2 для основных сдвигоопасных зон в массиве основания плотины СШГЭС, выделить контролируемые участки массива, а также разработать эффективную технологию производства режимных наблюдений.

5. Кроме вышеперечисленных предложений, ЦСГНЭО считает необходимым для всех диагностических показателей определять их критериальные значения второго уровня K_2 по расчетам с доведением системы “плотина-основание” до предельного состояния.

¹ Предложения и рекомендации об использовании углов наклона плотины в качестве диагностических показателей были опубликованы на страницах журнала “Гидротехнические сооружения”, 2012 г. № 3 и № 11.

Актуализация критериев безопасности для основных диагностических показателей плотины Саяно-Шушенской ГЭС

Гордон Л. А., доктор техн. наук, Скворцова А. Е., инженер (ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева”)

Определены и предложены для включения в Декларацию безопасности допускаемые для каждого УВБ в диапазоне 520 – 539 м значения диагностических показателей [К] — ограничения на значения радиальных перемещений и углов поворота горизонтальных сечений плотины. Модифицированы эмпирические зависимости, используемые для разработки критериев безопасности K1, K2.

Ключевые слова: арочно-гравитационная плотина, Саяно-Шушенская ГЭС, критерии безопасности, эмпирические зависимости, радиальные перемещения, углы поворота горизонтальных сечений.

Схема диагностического контроля

В 1990 г. уровень водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС достиг НПУ (отм. 540 м), и с 1991 г. началась эксплуатация ГЭС в проектном режиме. Проектный режим регулирования УВБ состоял из ветви наполнения (май — октябрь) от УМО (отм. 500 м) до НПУ (отм. 540 м) и ветви сброски от НПУ до УМО (ноябрь — апрель следующего года).

В период начальной эксплуатации (1991 – 1995 гг.) в плотине со стороны верховой грани образовалось несколько магистральных горизонтальных трещин, а также зона разуплотнения скалы на контакте плотины с основанием. Причины и последствия образования трещин рассматривались в ряде работ, в том числе в [1, 2]. Для ликвидации трещин в 1996 – 2003 гг. были выполнены ремонтные работы — инъецирование в трещины вязких компаундов на эпоксидной основе [3, 4]. Чтобы обеспечить сохранность отремонтированных зон бетона напорной грани, генеральным проектировщиком (ОАО “Ленгидропроект”) были приняты решения о понижении НПУ с отм. 540 м до отм. 539 м и введении ограничений на скорость наполнения водохранилища при отметках УВБ выше 520 м.

В соответствии со статьей 9 Федерального закона “О безопасности гидротехнических сооружений” собственник ГТС обязан “обеспечивать разработку и своевременное уточнение критериев безопасности гидротехнического сооружения” [5]. Осенью 2014 г. завершается ремонт и реконструкция Саяно-Шушенской ГЭС. К этому времени необходимо разработать и утвердить в органах государственного надзора новую редакцию Критериев безопасности ГТС Саяно-Шушенской ГЭС.

Ниже предлагается схема оперативной оценки технического состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС и определяются критериальные (предельно допустимые) значения диагностических показателей. С целью повышения качества диагностического контроля наряду с традиционными критери-

альными значениями K1, K2 вводится величина [К] — допускаемое значение диагностического показателя. Здесь K1 — первый (предупреждающий) уровень значений диагностических показателей; K2 — второй (предельный) уровень значений диагностических показателей при любом УВБ, меньшем ФПУ; [К] — допускаемая для каждого конкретного значения УВБ величина диагностического показателя. Критериальные значения задают границы между возможными состояниями сооружения. В настоящее время для ГТС принята четырехуровневая шкала технического состояния и уровней безопасности. При четырехуровневой шкале наличие трех критериальных значений [К], K1, K2 позволяет однозначно определить уровень безопасности. Ниже приводится система неравенств, определяющих области значений диагностических показателей, соответствующих каждому из четырех уровней безопасности.

Техническое состояние ГТС исправное, уровень безопасности нормальный, если для всех значений диагностических показателей выполнены неравенства:

$$F_{\text{изм}} \leq [К]; F_{\text{изм}} \leq K1.$$

Техническое состояние ГТС работоспособное, уровень безопасности пониженный, если хотя бы для одного $F_{\text{изм}}$ превышено [К], однако не достигнуто K1:

$$F_{\text{изм}} > [К]; F_{\text{изм}} \leq K1.$$

Техническое состояние ГТС ограниченно работоспособное, уровень безопасности неудовлетворительный, если хотя бы одно значение $F_{\text{изм}}$ попадает в диапазон (K1, K2]:

$$F_{\text{изм}} > K1; F_{\text{изм}} \leq K2.$$

Техническое состояние ГТС неработоспособное (опасное, аварийное), если хотя бы для одного $F_{\text{изм}}$ превышено $K2$:

$$F_{\text{изм}} > K2.$$

В приведенных выше неравенствах $F_{\text{изм}}$ — измеренное (вычисленное) значение диагностического показателя.

Примечание. В стандарте НП “ИНВЭЛ” СТО 0238424.27.140.035 – 2009 “Гидроэлектростанции. Мониторинг и оценка технического состояния гидротехнических сооружений в процессе эксплуатации. Нормы и требования” рекомендуется схема диагностического контроля, где введены два критериальных значения $K1$, $K2$, три уровня технического состояния и четыре уровня безопасности. Границы между вторым и третьим уровнями безопасности задает критериальное значение $K1$, между третьим и четвертым — $K2$. Граница между первым и вторым уровнями безопасности назначается экспертно. В предлагаемой схеме экспертное назначение границы между нормальным и пониженным уровнями безопасности заменено на допускаемое значение $[K]$. Такая корректировка схемы диагностического контроля для конкретного гидроузла не противоречит СТО и допускается п. 1.8 упомянутого стандарта.

Очевидно, что чем больше перемещения плотины, тем больше вероятность повторного трещинообразования в бетоне плотины и разуплотнения скалы основания. В настоящей статье предлагается система ограничений на обобщенные перемещения плотины, позволяющие обеспечить нормальное техническое состояние плотины и сохранность отремонтированных зон бетона напорной грани. Под обобщенными перемещениями будем понимать радиальные перемещения $X(s, \nabla)$ секции s на отметке ∇ , измеряемые системой прямых и обратных отвесов, и углы поворота горизонтальных сечений плотины $\varphi(s, \nabla)$, вычисляемые по данным измерений относительных осадок поперечными гидростатическими нивелирами. Схемы расположения отвесов и гидростатических нивелиров в плотине Саяно-Шушенской ГЭС приведены, например, в [2].

В качестве диагностических показателей, по которым оценивается техническое состояние плотины, приняты пятнадцать значений обобщенных перемещений плотины.

Шесть параметров — радиальные перемещения следующих шести точек плотины:

гребней (отм. 542 м) секций 18, 33, 45: $X(18, 542)$; $X(33, 542)$; $X(45, 542)$;

секций 18, 33, 45 на отм. 494 м: $X(18, 494)$; $X(33, 494)$; $X(45, 494)$.

Девять параметров — углы поворота горизонтальных сечений плотины:

трех сечений ключевой консоли: $\varphi(33, 308)$; $\varphi(33, 344)$; $\varphi(33, 359)$ на отм. 308; 344 и 359 м;

шести горизонтальных сечений секций 18 и 45 на отм. 308; 344; 359 м: $\varphi(18, 308)$; $\varphi(45, 308)$; $\varphi(18, 344)$; $\varphi(45, 344)$; $\varphi(18, 359)$; $\varphi(45, 359)$.

Радиальные перемещения отсчитываются от условно неподвижной горизонтальной плоскости, расположенной на отметке закрепления якорей обратных отвесов (на 35 метров ниже подошвы плотины). За начальный цикл (ноль отсчета перемещений) приняты замеры на 04.05.1989 г. Уровень верхнего бьефа в день нулевого замера находился на отм. 497,3 м (на 2,7 м ниже УМО). Углы поворота горизонтальных сечений плотины φ вычисляются как угловые коэффициенты прямых, построенных методом наименьших квадратов по осадкам марок поперечных гидронивелиров, установленных в рассматриваемом сечении. Начальный (нулевой) цикл отсчета относительных осадок марок поперечных гидронивелиров принят на 05.05.1994 г. (УВБ = 500,4 м).

Примечание. Э. Г. Газиевым [6] предложено рассматривать секцию плотины как тонкий консольный стержень и определять углы наклона горизонтальных сечений плотины по известной формуле сопротивления материалов для тонких стержней. В обозначениях [6] она имеет вид

$$\Phi = dW/dx,$$

где W — радиальное перемещение точки; x — координата точки по вертикали. Если предлагаемый параметр поддается прогнозу, то его величину можно принять в качестве диагностического показателя. Однако Φ не является углом поворота горизонтального сечения плотины, а есть угол наклона касательной к оси консоли. Относительная толщина секции плотины Саяно-Шушенской ГЭС такова, что нельзя пренебрегать ее радиальными перемещениями, связанными с поперечным сдвигом. Радиальные перемещения в этом случае складываются из деформаций изгиба, вызывающих поворот сечения, и деформаций поперечного сдвига, не сопровождающихся поворотом горизонтального сечения. Угол поворота горизонтального сечения плотины Саяно-Шушенской ГЭС может быть вычислен по формуле

$$\varphi = dW/dx + \gamma,$$

где γ — деформация поперечного сдвига, которая не измеряется.

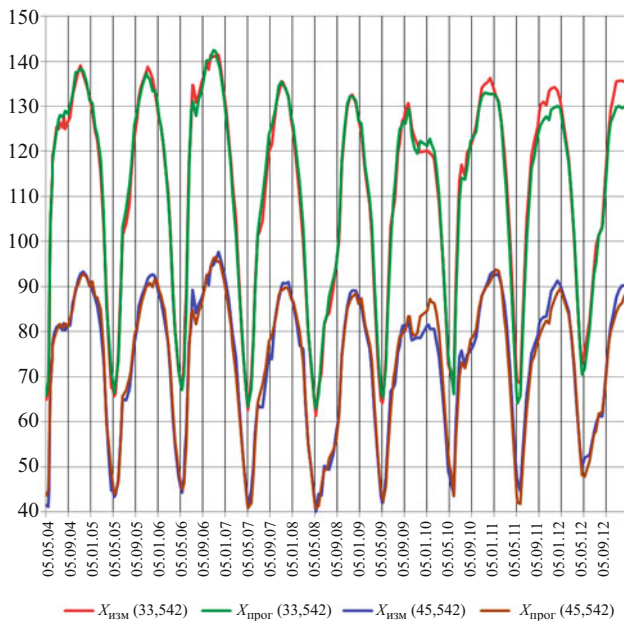


Рис. 1. Измеренные и прогнозируемые радиальные перемещения гребней секций 33 и 45

Различие в физическом смысле параметров Φ и φ ведет к различию значений этих диагностических показателей, приводимых ниже и в [6].

Эмпирические зависимости для вычисления диагностических показателей

При формулировке критериев K1, K2 для вычисления прогнозируемых значений диагностических показателей в предыдущих редакциях Критериев безопасности были приняты эмпирические зависимости вида [2]

$$X = A + By + Cy^2 + D(T_{\text{низ}}) + E(T_{\text{верх}}); \quad (1)$$

$$\varphi = A + By + Cy^2 + D(T_{\text{низ}}). \quad (2)$$

Параметры-аргументы y , $T_{\text{низ}}$ и $T_{\text{верх}}$, входящие в эмпирические зависимости (1), (2), характеризуют основные внешние воздействия на плотину (гидростатическую нагрузку и температуру бетона):

$y = \text{УВБ} - 500$, превышение УВБ над УМО (УВБ — уровень верхнего бьефа, УМО = 500 м — уровень мертвого объема водохранилища);

$T_{\text{низ}}$ — температура бетона в первой базовой точке с координатами: секция 33, отм. 462 м, РОНГ = 30,7 м, где РОНГ — расстояние от напорной грани (2,85 м от низовой грани); в этой точке установлен датчик температур ПТС № 8124; $T_{\text{низ}}$ обобщенно характеризует температуру бетона плотины вблизи низовой грани;

$T_{\text{верх}}$ — температура бетона во второй базовой точке с координатами: секция 33, отм. 461 м, РОНГ = 2,6 м; в этой точке установлен датчик тем-

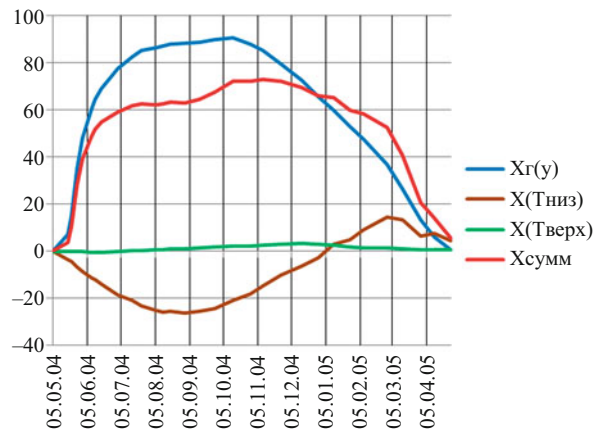


Рис. 2. Гидростатическая и температурные компоненты радиального перемещения гребня ключевой секции плотины

ператур ПТС № 0535; $T_{\text{верх}}$ обобщенно характеризует температуру бетона плотины вблизи верховой грани.

В действующей до 2014 г. редакции Декларации безопасности при известных величинах y , $T_{\text{низ}}$, $T_{\text{верх}}$ прогнозируемые значения перемещений $X_{\text{прог}}$ вычислялись по приводимым ниже эмпирическим зависимостям (3), (4), коэффициенты которых определялись методом наименьших квадратов по данным натурных измерений; σ — средние квадратические погрешности эмпирических зависимостей на элементах базовых (обучающих) последовательностей:

$$X(18,542) = 44,8 + 1,04y + 0,0202y^2 - 2,1T_{\text{низ}} + 1,9T_{\text{верх}} \quad \sigma = 1,6 \text{ мм};$$

$$X(33,542) = 63,7 + 1,26y + 0,027y^2 - 2,4T_{\text{низ}} + 2,2T_{\text{верх}} \quad \sigma = 1,9 \text{ мм};$$

$$X(45,542) = 41,9 + 0,85y + 0,021y^2 - 2,4T_{\text{низ}} + 2,1T_{\text{верх}} \quad \sigma = 1,9 \text{ мм};$$

$$X(18,494) = 35,0 + y + 0,0105y^2 - 1,41T_{\text{низ}} + 0,6T_{\text{верх}} \quad \sigma = 1,2 \text{ мм};$$

$$X(33,494) = 53,6 + 1,21y + 0,0148y^2 - 1,6T_{\text{низ}} + 0,8T_{\text{верх}} \quad \sigma = 1,4 \text{ мм};$$

$$X(45,494) = 36,3 + 0,86y + 0,0105y^2 - 1,5T_{\text{низ}} + 0,8T_{\text{верх}} \quad \sigma = 1,2 \text{ мм}. \quad (3)$$

В качестве базовой последовательности для радиальных перемещений каждой точки взято по 137 замеров за период с 04.05.2004 г. по 11.08.2009 г. (до аварии 17.08.2009 г.).

Эмпирические формулы для вычисления углов наклона горизонтальных сечений плотины:

$$\begin{aligned} \varphi(33,308) &= -18,81 - 0,5925y - \\ &- 0,00886y^2 + 0,42T_{\text{низ}} \quad \sigma = 0,83 \text{ с;} \\ \varphi(33,344) &= -19,63 - 0,8057y - \\ &- 0,00864y^2 + 0,55T_{\text{низ}} \quad \sigma = 0,81 \text{ с;} \\ \varphi(33,359) &= -26,83 - 0,958y - \\ &- 0,01y^2 + 0,8T_{\text{низ}} \quad \sigma = 0,83 \text{ с;} \\ \varphi(18,308) &= -10,78 - 0,447y - \\ &- 0,00484y^2 + 0,27T_{\text{низ}} \quad \sigma = 0,62 \text{ с;} \\ \varphi(18,344) &= -12,05 - 0,607y - \\ &- 0,00492y^2 + 0,45T_{\text{низ}} \quad \sigma = 0,74 \text{ с;} \\ \varphi(18,359) &= -18,07 - 0,761y - \\ &- 0,006234y^2 + 0,57T_{\text{низ}} \quad \sigma = 1,07 \text{ с;} \\ \varphi(45,308) &= -8,3 - 0,32y - \\ &- 0,00345y^2 + 0,155T_{\text{низ}} \quad \sigma = 0,86 \text{ с;} \\ \varphi(45,344) &= -15,43 - 0,607y - \\ &- 0,0052y^2 + 0,48T_{\text{низ}} \quad \sigma = 0,67 \text{ с;} \\ \varphi(45,359) &= -19,426 - 0,705y - \\ &- 0,0062y^2 + 0,6T_{\text{низ}} \quad \sigma = 0,76 \text{ с.} \end{aligned} \quad (4)$$

Базовые последовательности для определения коэффициентов эмпирических зависимостей (4) включали по 122 замера для каждого показателя.

На основе эмпирических зависимостей (3), (4) по методике, описанной в [2], были определены критериальные (предельно допустимые) значения K_1 , K_2 для перечисленных выше диагностических показателей.

В процессе подготовки новой редакции Критериев и Декларации безопасности, приуроченной к завершению восстановления СШГЭС после аварии, потребовалось откорректировать прогнозные зависимости с учетом накопленных за последний период данных натурных наблюдений.

После аварии в течение полутора лет регулирование УВБ и температуры бетона плотины были аномальными и резко отличались от проектных предпосылок. Поэтому при корректировке прогнозных зависимостей с учетом данных измерений, по-

лученных после аварии, замеры аномального периода (с августа 2009 г. по май 2011 г.) в состав базовых последовательностей не были включены. Цикл наполнения-сработки с мая 2011 г. по май 2012 г. незначительно отличался от проектного режима работы плотины, поэтому данные измерений, полученные в указанный период, включены в базовые последовательности при уточнении коэффициентов эмпирических зависимостей. Общее число замеров базовой последовательности для каждого диагностического показателя при этом увеличилось до 167.

Ниже эмпирические зависимости (1), (2) приводятся в модифицированной форме, позволяющей количественно оценить каждую из компонент, слагающих перемещение. Была выбрана фиксированная, начальная для базовых последовательностей, дата при минимальной отметке УВБ ≈ 500 м ($y \approx 0$) с температурами в базовых точках $T_{\text{низ нач}}$ и $T_{\text{верх нач}}$. После приведения формул (1), (2) к виду (1а), (2а) для данной даты температурные слагаемые обращаются в ноль.

$$X = A + By + Cy^2 + D(T_{\text{низ}} - T_{\text{верх нач}}) + E(T_{\text{верх}} - T_{\text{верх нач}}); \quad (1а)$$

$$\varphi = A + By + Cy^2 + D(T_{\text{низ}} - T_{\text{верх нач}}). \quad (2а)$$

В качестве начальной принята дата 04.05.2004 г., соответствующая первым членам базовых последовательностей. Значения аргументов на 04.05.2004 г.: УВБ = 500,4 м ($y = 0,4$ м); $T_{\text{низ нач}} = 3,13^\circ \text{C}$; $T_{\text{верх нач}} = 4^\circ \text{C}$. В этом случае модифицированные эмпирические формулы (с включенными в базовые последовательности данных 2011–2012 гг.) примут вид:

$$X(18,542) = 46,3 + 0,983y + 0,022y^2 - 2,1(T_{\text{низ}} - 3,13) + 1,7(T_{\text{верх}} - 4) \quad \sigma = 1,75 \text{ мм};$$

$$X(33,542) = 65,4 + 1,206y + 0,0287y^2 - 2,4(T_{\text{низ}} - 3,13) + 1,9(T_{\text{верх}} - 4) \quad \sigma = 2,25 \text{ мм};$$

$$X(45,542) = 43,4 + 0,79y + 0,0224y^2 - 2,4(T_{\text{низ}} - 3,13) + 1,9(T_{\text{верх}} - 4) \quad \sigma = 2,0 \text{ мм};$$

$$X(18,494) = 33,6 + 0,98y + 0,0111y^2 - 1,41(T_{\text{низ}} - 3,13) + 0,47(T_{\text{верх}} - 4) \quad \sigma = 1,3 \text{ мм};$$

$$X(33,494) = 52 + 1,19y + 0,0153y^2 - 1,64(T_{\text{низ}} - 3,13) + 0,53(T_{\text{верх}} - 4) \quad \sigma = 1,55 \text{ мм};$$

$$X(45,494) = 35,3 + 0,84y + 0,01075y^2 - \quad (5)$$

$$- 1,47(T_{\text{низ}} - 3,13) + 0,74(T_{\text{верх}} - 4) \quad \sigma = 1,2 \text{ мм.}$$

$$\varphi(33,308) = - 17,7 - 0,602y -$$

$$- 0,00853y^2 + 0,4(T_{\text{низ}} - 3,13) \quad \sigma = 0,96 \text{ с;}$$

$$\varphi(33,344) = - 18,2 - 0,81y -$$

$$- 0,00843y^2 + 0,5(T_{\text{низ}} - 3,13) \quad \sigma = 1,1 \text{ с;}$$

$$\varphi(33,359) = - 24,64 - 0,965y -$$

$$- 0,00969y^2 + 0,8(T_{\text{низ}} - 3,13) \quad \sigma = 1,2 \text{ с;}$$

$$\varphi(18,308) = - 10,1 - 0,448y -$$

$$- 0,00478y^2 + 0,27(T_{\text{низ}} - 3,13) \quad \sigma = 0,76 \text{ с;}$$

$$\varphi(18,344) = - 10,9 - 0,636y -$$

$$- 0,00499y^2 + 0,4(T_{\text{низ}} - 3,13) \quad \sigma = 0,85 \text{ с;}$$

$$\varphi(18,359) = - 16,6 - 0,751y -$$

$$- 0,0064y^2 + 0,56(T_{\text{низ}} - 3,13) \quad \sigma = 1,2 \text{ с;}$$

$$\varphi(45,308) = - 8,53 - 0,29y -$$

$$- 0,0033y^2 + 0,11(T_{\text{низ}} - 3,13) \quad \sigma = 0,58 \text{ с;}$$

Т а б л и ц а 1

Максимальные за цикл наполнения-сработки радиальные перемещения $X(33,542)$

Дата	Мах УВБ	Мах $X_{\text{изм}}$	УВБ	Дата	$T_{\text{низ}}$	$T_{\text{верх}}$	$X_{\text{прог}}$	$X_{\text{прог}} + 2\sigma$
23.10.1999	538,49	136,33	536,66	29.11.1999	6,70	4,94	139,29	143,13
31.10.1999	538,7							
09.11.1999	538,52							
04.09.2000	538,49	136,76	537,18	10.11.2000	8,02	4,97	137,52	141,36
09.10.2000	538,8							
21.10.2000	538,52							
18.08.2001	538,49	138,84	538,84	01.11.2001	9,93	5,72	138,11	141,95
31.08.2001	539							
16.09.2001	539							
04.11.2001	538,55							
23.08.2003	538,55	141,11	536,87	18.11.2003	7,26	5,03	138,51	142,35
21.09.2003	539,03							
15.10.2003	538,49							
22.09.2004	538,52	139,05	537,38	09.11.2004	9,25	5,23	138,23	142,07
13.10.2004	539,03							
23.10.2004	538,51							
10.09.2005	538,5	138,69	537,4	10.11.2005	9,48	4,59	136,53	141,03
20.09.2005	538,96							
23.10.2005	538,5							
02.09.2006	538,48	-	-	-	-	-	-	-
21.09.2006	539,02	141,35	537,78	16.10.2006	10,64	7,47	140,50	145,0
03.10.2006	538,49	141,52	535,7	22.11.2006	7,9	7,8	140,64	145,3

$$\begin{aligned} \varphi(45,344) &= -14,4 - 0,593y - \\ &- 0,00542y^2 + 0,5(T_{\text{низ}} - 3,13) \quad \sigma = 0,9 \text{ с;} \\ \varphi(45,359) &= -18,0 - 0,693y - \\ &- 0,00614y^2 + 0,6(T_{\text{низ}} - 3,13) \quad \sigma = 1,0 \text{ с.} \quad (6) \end{aligned}$$

На рис. 1 даны хронограммы измеренных и прогнозируемых формулами (5) значений радиальных перемещений $X(33,542)$ и $X(45,542)$.

По величинам среднеквадратических погрешностей σ формул (5), (6), а также по хронограммам $X(33,542)$, $X(45,542)$, приведенным на рис. 1, можно заключить, что совпадение измеренных и вычисленных с использованием зависимостей (5) значений радиальных перемещений — удовлетворительное. К аналогичному выводу приводит анализ хронограмм остальных 13 диагностических показателей. Это позволяет использовать формулы (5), (6) для вычисления радиальных перемещений и углов наклона горизонтальных сечений при известных значениях трех параметров (аргументов): y , $T_{\text{низ}}$, $T_{\text{верх}}$. Исключение составляет зима 2009/10 г. Как видно на рис. 1, прогноз и замеры для правобережной секции 45 в первую зиму после аварии “разошлись”. Невязка доходила до 8 мм, что существенно превышает величину среднеквадратической погрешности. Это обусловлено аномальными температурными условиями: из-за аварии всю зиму работал водосброс, и сбрасываемый незамерзающий поток обогревал зимой низовую грань правобережных секций, что уменьшало их прогиб. Однако в дальнейшем работа водосброса зимой не предполагается. Следовательно, принятая форма эмпирических зависимостей, где отсутствует реологическое слагаемое, т.е. принято, что после 05.05.2004 г. роста необратимых перемещений не фиксируется, вполне обоснована.

Т а б л и ц а 2

Критериальные значения радиальных перемещений плотины

Диагностический показатель	K1, мм	K2, мм
$X(18,542)$	111,5	123,0
$X(33,542)$	147,6	162,7
$X(45,542)$	101,9	113,1
$X(18,494)$	82,6	90,4
$X(33,494)$	114	124,0
$X(45,494)$	79,2	86,3

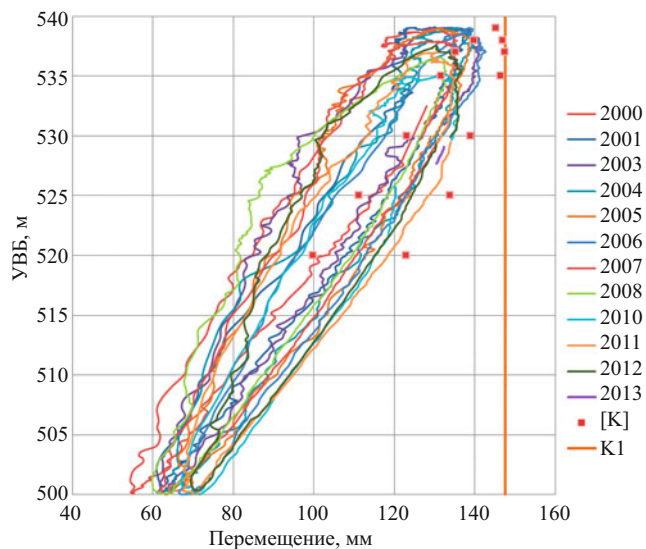


Рис. 3. Радиальные перемещения гребня секции 33

Критериальные значения K1, K2

Критериальные (предельно допустимые) значения K1, K2 для радиальных перемещений определим по тем же правилам, которые были приняты в предыдущих редакциях декларации безопасности:

$$K1 = X_{\text{прог}}(y_1, T_{\text{низ1}}, T_{\text{верх1}}) + 2\sigma; \quad (7)$$

$$K2 = X_{\text{прог}}(y_2, T_{\text{низ2}}, T_{\text{верх2}}) + 3\sigma. \quad (8)$$

В формулах (7), (8) прогнозируемые перемещения $X_{\text{прог}}$ вычислялись по эмпирическим формулам (5); значения $T_{\text{низ1}}$, $T_{\text{верх1}}$, $T_{\text{низ2}}$, $T_{\text{верх2}}$, y_1 , y_2 , при ко-

Т а б л и ц а 3

Критериальные значения углов поворота горизонтальных сечений плотины, рекомендуемые на 2014 – 2018 гг.

Диагностический показатель	K1, с	K2, с
$\varphi(33,308)$	- 55	- 58
$\varphi(33,344)$	- 63	- 66
$\varphi(33,359)$	- 77	- 81
$\varphi(18,308)$	- 35,7	- 37
$\varphi(18,344)$	- 44	- 46
$\varphi(18,359)$	- 56,5	- 59,5
$\varphi(45,308)$	- 26	- 27
$\varphi(45,344)$	- 46	- 48,6
$\varphi(45,359)$	- 54,6	- 57,4

торых достигаются максимальные перемещения, приняты на основе анализа измеренных температур $T_{\text{низ}}$, $T_{\text{верх}}$ за 14 лет наблюдений (1999 – 2012 гг.), который проиллюстрирован данными, содержащимися в табл. 1, где приведена выборка из результатов натуральных измерений радиальных перемещений в 1999 – 2012 гг. для тех лет, когда максимальный УВБ превышал отм. 538,5 м. Маловодные годы и годы, когда максимальный УВБ был ниже отм. 538 м в таблицу не включались. Хронограмма УВБ водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС условно разделяется на три участка: ветвь наполнения, участок удержания наивысшей отметки и ветвь сработки. Участок удержания наивысшей отметки, в дальнейшем называемый (в принятой на ГЭС терминологии) “полкой”, лежит в интервале отм. 538,5 – 539 м. Максимальные же значения всех диагностических показателей наблюдаются на ветви сработки. В первом столбце табл. 1 приведены даты стояния УВБ на “полках” в различные годы, во втором — достигнутые уровни. Далее приведены максимальные измеренные радиальные перемещения $X_{\text{изм}}$ (33, 542) и соответствующие им значения УВБ, $T_{\text{низ}}$, $T_{\text{верх}}$. В последних двух столбцах табл. 1 приведены вычисленные по соответствующей формуле (5) величины $X_{\text{прог}}$ (33, 542), $X_{\text{прог}}$ (33, 542) + 2 σ , где $\sigma = 2,25$ мм.

На основе данных табл. 1 при определении величины K_1 для перемещений гребня $X(18,542)$, $X(33, 542)$, $X(45,542)$ приняты следующие значения аргументов:

$$\text{УВБ} = 536 \text{ м}; T_{\text{низ}} = 7,5^\circ; T_{\text{верх}} = 8^\circ.$$

В соответствии с (7), для $X(33, 542)$ в качестве критериального значения K_1 принята величина $X_{\text{прог}}$ (33,542) + 2 σ = 147,6 мм.

При вычислении по правилу (7) критериальных значений K_1 для радиальных перемещений на отм. 494 м $X(18,494)$, $X(33,494)$, $X(45,494)$ по данным, аналогичным данным табл. 1, приняты следующие значения аргументов:

$$\text{УВБ} = 536,5 \text{ м}; T_{\text{низ}} = 7,5^\circ; T_{\text{верх}} = 8^\circ.$$

Критериальные значения K_2 вычислялись по правилу (8), где величины аргументов принимались экспертно на основании анализа данных натуральных наблюдений за период с 1996 г.:

Т а б л и ц а 4

УВБ, м	500	510	520	530	539
Приращение перемещения, мм	1,2	1,8	2,4	3,0	3,5

$$\text{УВБ} = 540 \text{ м}; T_{\text{низ}} = 7^\circ; T_{\text{верх}} = 7^\circ.$$

В табл. 2 приведены критериальные значения K_1 , K_2 для радиальных перемещений, определенные по описанным выше правилам.

Критериальные значения K_1 , K_2 для углов поворота определялись по аналогичным правилам:

$$K_1 = \varphi_{\text{прог}}(y_1, T_{\text{низ1}}) + 2\sigma; \quad (9)$$

$$K_2 = \varphi_{\text{прог}}(y_2, T_{\text{низ2}}) + 3\sigma. \quad (10)$$

$\varphi_{\text{прог}}$ вычислялись по зависимостям (6), значения y_1 , $T_{\text{низ1}}$, y_2 , $T_{\text{низ2}}$, при которых достигаются максимальные углы поворота, приняты по данным натуральных измерений.

$$\text{Для } K_1: \text{УВБ} = 539,5 \text{ м } (y_1 = 39,5); T_{\text{низ1}} = 7^\circ;$$

$$\text{для } K_2: \text{УВБ} = 540,5 \text{ м } (y_2 = 40,5); T_{\text{низ2}} = 6^\circ.$$

Вычисленные величины K_1 , K_2 приведены в табл. 3.

Компоненты обобщенных перемещений

Прежде чем перейти к определению величин допускаемых перемещений [K], рассмотрим на примере радиального перемещения гребня ключевой секции $X(33,542)$ структуру зависимостей (5), (6) и оценим вклад каждого слагаемого в суммарное перемещение гребня плотины. Для этой цели соответствующую эмпирическую зависимость (5) перепишем в виде четырех слагаемых:

$$X(33,542) = X_0 + X_r(y) + X(T_{\text{низ}}) + X(T_{\text{верх}}), \quad (11)$$

где:

$$\text{свободный член } X_0 = X_{\text{необ}} + \Delta X = 65,4 \text{ мм};$$

$$\text{гидростатическая компонента, зависящая от колебания уровня верхнего бьефа } X_r(y) = 1,206y + 0,0287y^2;$$

$$\text{компонента, зависящая от температуры бетона низовой грани } X(T_{\text{низ}}) = -2,4(T_{\text{низ}} - 3,13);$$

$$\text{компонента, зависящая от температуры бетона верховой грани } X(T_{\text{верх}}) = 1,9(T_{\text{верх}} - 4).$$

Форма записи (11) позволяет просто вычислить вклад каждого слагаемого в суммарный прогиб гребня ключевой секции:

увеличение на 1° температуры в первой базовой точке $T_{\text{низ}}$ уменьшает суммарный прогиб на 2,4 мм;
увеличение на 1° температуры во второй базовой точке $T_{\text{верх}}$ увеличивает суммарный прогиб на 1,9 мм;

увеличение УВБ на 1 м приводит к росту прогиба согласно табл. 4.

Структура формулы (11) такова, что при начальных условиях УВБ = 500 м ($y = 0$), $T_{\text{низ}} = 3,13$ °С;

$T_{\text{верх}} = 4 \text{ }^\circ\text{C}$ все слагаемые, за исключением свободного члена, обращаются в ноль. Свободный член состоит из двух слагаемых: $X_{\text{необ р}}$ и ΔX . $X_{\text{необ р}}$ — необратимое перемещение, накопленное с 04.05.1989 г. до 05.05.2004 г., ΔX — поправка на разницу уровней и температур между нулем отсчета перемещений и первым членом базовых последовательностей.

Чтобы выделить в свободном члене ΔX , следует учесть, что:

ноль отсчета перемещений 04.05.1989 г. (УВБ = 497,3 м; $T_{\text{низ}} = 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\text{верх}} = 4,4 \text{ }^\circ\text{C}$);

начальный член базовой последовательности 05.05.2004 г. (УВБ = 500,4 м; $T_{\text{низ}} = 3,13 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\text{верх}} = 4 \text{ }^\circ\text{C}$). Разница в УВБ между этими датами равна 3,1 м, что согласно табл. 4 приводит к разнице прогибов 3,7 мм; разница в температурах $T_{\text{низ}}$ в $0,6 \text{ }^\circ\text{C}$ дает разницу в прогибах гребня $-2,4 \cdot 0,6 = -1,4 \text{ мм}$, а в $T_{\text{верх}}$ — $1,9 \cdot (-0,4) = -0,8 \text{ мм}$. Таким образом, $\Delta X = 3,7 - 1,4 - 0,8 = 1,5 \text{ мм}$. Величина накопленного к 05.05.2004 г. необратимого смещения $X_{\text{необ р}} = 65,4 - 1,5 = 63,9 \text{ мм}$.

Примечание. В рассмотренном случае значение ΔX мало (приблизительно равно квадратической погрешности измерений). Однако ситуация меняется, если температурные условия начального цикла измерений и начального элемента базовой последовательности существенно различаются. Если построить прогнозную зависимость по данным из-

мерений в аномальные по температурным условиям годы после аварии, то величина ΔX станет существенно больше. Пусть, например, начальный цикл измерений радиальных перемещений гребня ключевой секции $X(33,542)$ прежний (05.05.1997 г.), а базовая последовательность содержит замеры 2010–2012 гг. с начальным элементом базовой последовательности, соответствующим 28.04.2010 г. Этой дате соответствуют УВБ = 500,4 м; $T_{\text{низ}} = -0,6^\circ$; $T_{\text{верх}} = 4,1^\circ$; $X_{\text{изм}}(33,542) = 72,83 \text{ мм}$. Зависимость типа (5), построенная по указанным данным, дает следующие прогнозируемые значения компонент радиального перемещения $X_0 = 76,43 \text{ мм}$; $\Delta X = 10,46 \text{ мм}$; $X_{\text{необ}} = 65,9 \text{ мм}$. Свободный член в таком случае увеличился не за счет необратимых перемещений, а за счет величины ΔX .

Сопоставляя необратимые компоненты $X_{\text{необ}}$, накопленные с начала измерений до 04.05.2004 г. (63,9 мм), с аналогичной величиной, полученной на 28.04.2010 г. (65,9 мм), легко увидеть, что разница величин незначительна. Следовательно, для однозначного вывода о накоплении необратимой составляющей перемещений за год, прошедший после аварии, не имеется достаточных оснований.

Взаимовлияние каждой из компонент на суммарный прогиб в течение одного цикла наполнения-сработки проиллюстрировано на примере цикла 2004–2005 гг. (рис. 2). На рис. 2 кроме $X_{\text{Г}}(y)$, $X(T_{\text{низ}})$, $X(T_{\text{верх}})$ нанесена хронограмма $X_{\text{сумм}} = X_{\text{Г}}(y) + X(T_{\text{низ}}) + X(T_{\text{верх}})$.

В случае постоянства температуры бетона плотины размах радиальных перемещений $X(33,542)$ при изменении УВБ от УМО до НПУ составил бы 90 мм, а максимум перемещений соответствовал бы максимуму УВБ = НПУ = 539 м. Однако весной, летом и осенью температура бетона низовой грани растет и температурная компонента $X(T_{\text{низ}})$ уменьшает прогиб плотины, поздней осенью-зимой каждого года бетон низовой грани остывает — $X(T_{\text{низ}})$ увеличивает прогиб от гидростатики. В результате этого процесса размах перемещений уменьшается до 70–75 мм и максимум смещается на ветвь сработки (конец года). Колебания температуры бетона верховой грани менее значительны, чем изменения температуры бетона низовой грани, так как верховая грань почти по всей высоте контактирует с водой, которая на глубине более 10 м имеет практически постоянную температуру (4–5 °C). Поэтому, как видно из рис. 2, в 2004–2005 гг. слагаемое $X(T_{\text{верх}})$ оказалось пренебрежимо малым. Весна — лето 2006 г. были многоводными, вследствие чего холостой сброс воды через водосброс начался 4 июля и продолжался до конца сентября. При этом поток поверхностной те-

Т а б л и ц а 5

Экстремальные значения $T_{\text{низ}}$, $T_{\text{верх}}$ за 2000–2011 гг.

Режим	УВБ, м	У, м	$T_{\text{низ мин}}$, °C	$T_{\text{верх макс}}$, °C
Наполнение	520	20	5,6	4,1
	525	25	6,0	4,1
	530	30	6,9	4,1
	535	35	9,5	3,8
	537	37	10,7	3,8
	538	38	10,9	4,7
	“Полка”	39	10,3	5,0
Сработка	538	38	9,0	6,0
	537	37	7,5	6,2
	535	35	4,6	5,4
	530	30	1,3	5,4
	525	25	-2,4	5,4
	520	20	-3,6	4,7

Допускаемые радиальные перемещения [К]

УВБ, м	$X(18,542)$, мм	$X(33,542)$, мм	$X(45,542)$, мм	$X(18,494)$, мм	$X(33,494)$, мм	$X(45,494)$, мм
520	73,24	99,76	66,37	56,8	81,05	55,3
525	82,27	111,29	74,40	63,6	89,75	61,3
530	91,34	123,05	82,35	70,3	98,45	67,1
535	97,44	131,60	86,77	75	104,95	70,8
537	100,05	135,26	88,70	76,9	107,55	72,2
538	103,80	139,85	92,40	78,8	110,05	74,3
“Полка”	108,24	145,28	96,92	81,7	113,55	77
538	110,00	146,88	99,43	82,1	113,85	78
537	110,85	147,50	100,94	82,5	114,05	78,7
535	110,45	146,40	101,57	82,7	113,85	79,2
530	105,31	138,96	98,26	78,8	108,35	76,3
525	102,12	133,92	97,03	76,1	104,25	74,6
520	93,58	122,98	89,59	70,1	96,45	69,2

плой воды, устремившись в водосбросные отверстия, прогрел бетон верхней грани. Температура бетона во второй базовой точке 25.09.2006 г. при УВБ = 538,9 м достигла 7 °С и менялась в диапазоне 7 – 7,8 °С до 09.01.2007 г., что согласно (11) дает максимальное значение $X(T_{\text{верх}}) \approx 7,2$ мм. Пренебрегать столь значительным, как в сезон 2006 – 2007 гг., увеличением прогиба вследствие подъема температуры бетона верхней грани не представляется возможным, поскольку оно, согласно табл. 4, эквивалентно подъему УВБ на 2 м.

Допускаемые значения обобщенных перемещений при УВБ ≥ 520 м

Выше было показано, что сезонные колебания температур бетона могут как уменьшать, так и увеличивать перемещения плотины от гидростатического давления верхнего бьефа. С 2000 по 2011 г. при различных температурных воздействиях никаких видимых нарушений сплошности в системе “плотина — основание” не произошло. Это дает основание полагать, что имевшие место в 2000 – 2011 гг. соотношения между гидростатической нагрузкой верхнего бьефа и температурой бетона плотины допустимы. Не исключено, что при этом несущая способность плотины не используется в полной мере и что в конструкции при таких нагрузках имеется запас, превышающий нормативный. Однако такой подход представляется оправ-

данным, учитывая, что безопасность является важнейшим требованием к плотине, ввиду катастрофических последствий, которые могут возникнуть при прорыве напорного фронта СШГЭС.

Как видно из структуры формул (5) и (6), величины радиальных перемещений и углов поворота сечений плотины тем больше, чем ниже значение $T_{\text{низ}}$ (для всех диагностических показателей) и чем выше значение $T_{\text{верх}}$ (только для радиальных перемещений). Допускаемые значения радиальных перемещений и углов поворота определим из того условия, что при известном УВБ ≥ 520 м имеют место значения $T_{\text{низ}}$, $T_{\text{верх}}$, дающие максимальные перемещения и углы за предшествующие 12 лет наблюдений за плотинной. При УВБ ниже отг. 520 м есть все основания полагать, что безопасность плотины будет обеспечена при любых неблагоприятных температурных условиях.

В табл. 5 для УВБ ≥ 520 м даны минимальные значения $T_{\text{низ}}$ и максимальные значения $T_{\text{верх}}$, наблюдавшиеся при достижении данных отметок за период 2000 – 2011 гг. При этих значениях температур слагаемые эмпирических зависимостей (5) и (6), определяемые температурным состоянием плотины, будут максимальными во временном интервале 2000 – 2011 гг.

Значения допускаемых обобщенных перемещений [К] при соответствующих УВБ (y), $T_{\text{низ мин}}$ и $T_{\text{верх макс}}$ определялись по следующим правилам:

Допускаемые углы поворота горизонтальных сечений [К]

УВБ, м	φ(33,308), с	φ(33,344), с	φ(33,359), с	φ(18,308), с	φ(18,344), с	φ(18,359), с	φ(45,308), с	φ(45,344), с	φ(45,359), с
520	-34,1	-38,7	-48,2	-21,8	-26,3	-35,2	-16,5	-29,0	-34,8
525	-38,9	-44,5	-54,9	-25,0	-30,5	-40,2	-18,7	-33,0	-39,4
530	-43,8	-50,4	-61,7	-28,3	-34,7	-45,2	-20,9	-37,0	-44,1
535	-48,6	-55,9	-67,6	-31,4	-38,4	-49,6	-23,2	-40,4	-48,0
537	-50,5	-58,1	-70,0	-32,7	-39,9	-51,3	-24,1	-41,8	-49,5
538	-51,7	-59,5	-71,5	-33,4	-40,9	-52,4	-24,6	-42,7	-50,5
“Полка”	-53,2	-61,2	-73,7	-34,6	-42,1	-54,0	-25,2	-44,0	-52,1
538	-52,5	-60,4	-73,0	-34,0	-41,6	-53,5	-24,8	-43,6	-51,7
537	-51,8	-59,7	-72,5	-33,6	-41,2	-53,1	-24,5	-43,4	-51,4
535	-50,6	-58,3	-71,5	-32,8	-40,4	-52,3	-23,7	-42,9	-50,9
530	-46,1	-53,2	-66,2	-29,9	-36,9	-48,3	-21,6	-39,8	-47,4
525	-42,2	-48,7	-61,6	-27,3	-33,8	-44,9	-19,6	-37,2	-44,5
520	-37,8	-43,3	-55,6	-24,3	-30,0	-40,3	-17,6	-33,6	-40,4

$$[K] = X_{\text{прог}}(y, T_{\text{низ мин}}, T_{\text{верх макс}}) + 2\sigma;$$

$$[K] = \varphi_{\text{прог}}(y, T_{\text{низ мин}}) + 2\sigma. \quad (12)$$

Вычисленные с использованием зависимостей (5), (6) по правилам (12) значения [К] для радиальных перемещений и углов поворота горизонтальных сечений приведены в табл. 6, 7 соответственно; значения $T_{\text{низ мин}}$, $T_{\text{верх макс}}$, y приняты по данным табл. 5.

Для промежуточных отметок допускаемые значения [К] определяются путем линейной интерполяции данных из табл. 6, 7.

На рис. 3. приведена циклограмма измеренных радиальных перемещений гребня секции 33 за 2000 – 2012 гг., красными маркерами – значения допускаемых перемещений [К] и вертикальной линией — значение К1 для данного диагностического показателя.

Выводы

Разработана схема диагностического контроля технического состояния ГТС применительно к плотине СШГЭС, являющаяся развитием и детализацией схемы, рекомендуемой Методикой [7]. Наряду с критериальными значениями К1, К2 введены допускаемые для каждого УВБ значения диагностических показателей [К]. Это позволяет при существующей четырехуровневой системе для оценки

безопасности однозначно разделить эти уровни, не прибегая к экспертной оценке.

Определены критериальные и допускаемые значения обобщенных перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС. После их уточнения на завершающем этапе НИР разработанные критерии рекомендуется включить в новую редакцию Критериев и Декларации безопасности ГТС СШГЭС.

Список литературы

1. Брызгалов В. И. Из опыта создания и освоения Красноярской и Саяно-Шушенской гидроэлектростанций. — Красноярск: Изд. “Суриков”, 1999.
2. Вульфвич Н. А., Гордон Л. А., Стефаненко Н. И. Арочно-гравитационная плотина Саяно-Шушенской ГЭС (Оценка технического состояния по данным натурных наблюдений). — СПб.: ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева”, 2012.
3. Брызгалов В. И., Епифанов А. П. и др. Опыт инъецирования фильтрующих трещин в напорной грани плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Гидротехническое строительство. 1998. № 2. С. 2 – 8.
4. Стафиевский В. А., Булатов В. А., Попов А. В., Епифанов А. П. Технология ремонта основания плотины Саяно-Шушенской ГЭС вязкими полимерами / Гидротехническое строительство. 2003. № 11. С. 13 – 17.
5. Ф1.22. Федеральный закон “О безопасности гидротехнических сооружений // Собрание законодательства Российской Федерации. 1997. № 6. С. 127 – 133.
6. Газиев Э. Г. Наклоны горизонтальных сечений Саяно-Шушенской арочно-гравитационной плотины / Гидротехническое строительство. 2012. № 3. С. 25 – 28.
7. Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений: РД 153-34.2-21-342-00. М., 2001. С. 22.

Оптимальное регулирование уровня верхнего бьефа для Саяно-Шушенской ГЭС, обеспечивающее нормальное техническое состояние плотины

Беллендир Е. Н., Храпков А. А., доктора техн. наук, Скворцова А. Е., Евстифеев А. Д., инженеры (ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева”)

Статья посвящена описанию разрабатываемого в ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” алгоритма для оптимального регулирования уровня верхнего бьефа Саяно-Шушенской ГЭС с учетом сохранения нормального технического состояния плотины. Практическая ценность полученных результатов заключается в возможности оптимизировать процесс наполнения и сработки водохранилища СШГЭС.

Ключевые слова: арочно-гравитационная плотина, температурный режим, силовое воздействие, оптимальный режим работы.

Арочно-гравитационная плотина Саяно-Шушенской ГЭС весьма чувствительна к температурному режиму внешней среды — наружного воздуха и воды в водохранилище. Неучет влияния этого фактора на выбор отметки заполнения водохранилища может прежде всего создать угрозу для сохранности отремонтированной в 1995 – 1996 гг. зоны бетона у напорной грани между отм. 344 и 359 м. Монолитность бетона может быть нарушена при появлении в этой зоне растягивающих напряжений вертикальной ориентации. Величина же указанных напряжений определяется балансом между напряжениями от силового воздействия воды и напряжениями от температурных воздействий.

В связи с этим эксплуатирующая организация выступила с предложением разработать алгоритм определения оптимального режима наполнения и сработки водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС в зависимости от температурного состояния гидротехнического сооружения. Исполнителем (ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева”) было принято решение использовать при разработке алгоритма две взаимно дополняющие прогнозные модели: конечно-элементную детерминистическую модель [1] и статистическую регрессионную модель [2]. Задача разрабатываемой концепции заключается в гармонизации между собой таких определяющих состояние плотины факторов, как силовое воздействие воды и текущий температурный режим в сооружении. Учет температурного воздействия должен осуществляться в процессе наполнения водохранилища до максимальной для данного года отметки УВБ, а также при сработке водохранилища — до того момента, когда значение отметки УВБ окажется ниже 520 м.

Следует учесть, что критериальные значения K_1 диагностических показателей за весь период с момента их введения в 2001 г. не достигались ни разу. Иными словами, регулирование отметки УВБ эксплуатирующей организацией осуществлялось таким образом, чтобы не только не подвергнуть со-

оружие прямой опасности нарушения монолитности путем образования магистральных трещин, но и не допустить возникновения вблизи напорной грани местного трещинообразования, порой возникавшего при быстром наполнении водохранилища, когда ранним летом УВБ достаточно высок, а бетон плотины еще не прогрелся. Этот реальный опыт регулирования отметки УВБ в предыдущие годы лег в основу указанной концепции. Отметим, что наиболее простым и достаточно точным, пригодным для непосредственного использования способом совместного учета гидростатического давления воды на напорную грань и температурного состояния плотины является определение прогнозируемых диагностических показателей X с применением эмпирических регрессионных зависимостей [2].

Исходя из вышеизложенного, сформулируем основные положения оптимального регулирования УВБ, реализованные в настоящей работе:

введение в рассмотрение прямой связи между рекомендованным значением отметки УВБ (далее обозначенным через $H_{рек}$) и температурным состоянием бетона;

прогнозирование рекомендуемых значений $H_{рек}$ для временного интервала 5 суток.

Работу алгоритма по статистической обработке массивов данных и выбору оптимального регулирования отметки УВБ рассмотрим на примере только одного диагностического показателя X , представляющего собой радиальное смещение на отм. 542 м секции 33, измеренное струнным отвесом. Согласно приведенной в [2] регрессионной формуле имеем

$$X_{темп} = -2,4(T_{низ} - 3,13) + 1,9(T_{верх} - 4), \quad (1)$$

где $X_{темп}$ — величина температурной части прогиба, мм; $T_{низ}$, $T_{верх}$ — температуры датчиков, расположенных у нижней и верхней граней плотины, °С, $-2,4$ и $1,9$ — коэффициенты, мм/град.

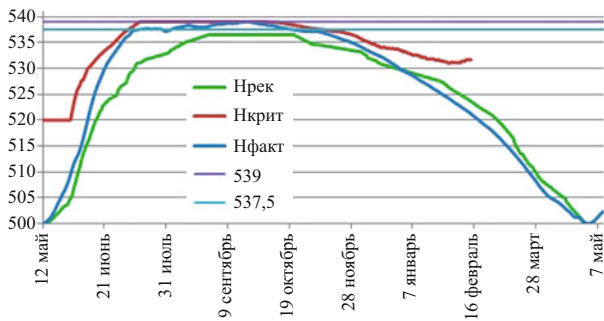


Рис. 1. Сопоставление рекомендуемых в процессе наполнения-сработки отм. УВБ $H_{рек}$ с фактически достигнутыми $H_{факт}$ данными и предельно допустимыми $H_{крит}$ уровнями за 2006 г.

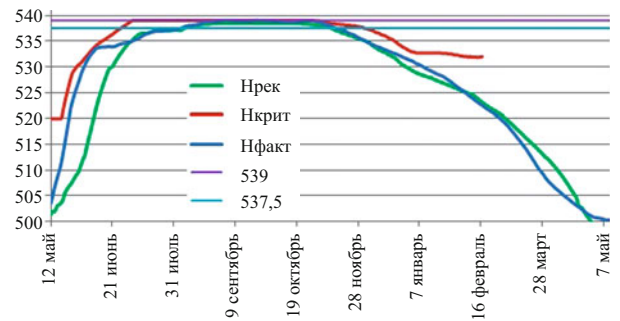


Рис. 2. Сопоставление рекомендуемых в процессе наполнения-сработки отм. УВБ $H_{рек}$ с фактически достигнутыми $H_{факт}$ данными и предельно допустимыми $H_{крит}$ уровнями за 2001 г.

Использовались посуточные данные, относящиеся к наблюдаемым за 16 лет отметкам УВБ и величинам $X_{темп}$. Значения отметок УВБ за 16 лет были взяты из базы Саяно-Шушенской ГЭС с 1992 по 2011 г., исключая 1998, 2002, 2008, 2009 гг., которые не являются характерными для расчетного режима работы плотины. 1998, 2002 и 2008 гг. — маловодные; 2009 г. — год аварии. Температуры датчиков $T_{низ}$ и $T_{верх}$ были также взяты из базы данных Саяно-Шушенской ГЭС. В рассмотрение были включены 1996 по 2011 г. (16 лет).

Предположим вначале, что за годы с условными номерами $m = 1 \dots M$ (M — общее число лет) на некоторую дату имеются известные величины H достигнутых (без нарушения сплошности плотины) отметок УВБ и (полученные из базы данных СМ СШГЭС) значения $X_{темп, m}$ той составляющей диагностического показателя, которая связана с температурой бетона. Образует последовательности, состоящие из монотонно изменяющихся, расположенных в порядке возрастания величин $X_{темп, m}$ и в порядке убывания величин H_m .

Максимальное из рассматриваемых значений H_m число H_1 реализовывалось на практике, по крайней мере, один раз, и на тот момент величина $X_{темп}$ принимала некоторое значение, равное $X_{темп, k}$ (текущий индекс k — целое, $k \leq M$). Следовательно:

$$X_{гидр,1} + X_{темп, k} \leq [X](H), \quad (2)$$

где $[X]$ — предельно допустимое значение для диагностического показателя X , зависящее от величины напора H [2]; $X_{гидр}$ — гидростатическая часть прогиба.

В силу неравенства

$$X_{темп,1} \leq X_{темп, k}. \quad (3)$$

получаем

$$X_{гидр,1} + X_{темп,1} \leq [X]. \quad (4)$$

Таким образом, значения $H_1, X_{темп,1}$ образуют пару величин, которые определяют некоторый режим работы плотины, обеспечивающий ее нормальное техническое состояние.

Последовательно используя вышеприведенные соотношения, получаем методом индукции пары

$$H_1, X_{темп,1}; \dots; H_s, X_{темп, s}; \dots; H_M, X_{темп, M}$$

где s ($1 \leq s \leq M$) — число ситуаций, в которых значение H отметки УВБ составляет не менее чем H_s , а температурная часть диагностического показателя составляет не более чем $X_{темп, s}$. Последний результат создает возможность для каждого из посуточных временных интервалов не увязывать допустимые величины отметки УВБ и соответствующие величины температурной составляющей $X_{темп}$ диагностического показателя с конкретным значением года, а объединять их по значениям частоты повторения v .

Указанная частота повторения определяется по формуле

$$v = \frac{s}{M}. \quad (5)$$

Наличие структурированных описанным образом данных позволяет с помощью выполнения нескольких операций определить рекомендуемое значение напора на любую дату текущего года, если известны результаты измерения (прогноза) температур $T_{низ}, T_{верх}$:

на рассматриваемую дату вычисляются величина температурной составляющей диагностического показателя ($X_{темп}$) и интервал значений частоты, в который она попадает;

с помощью интерполяции между границами интервала вычисляются частота повторяемости v и соответствующая ей отметка УВБ (H).

На основании фактических данных о регулировании отметки УВБ за прошедшие годы в описан-

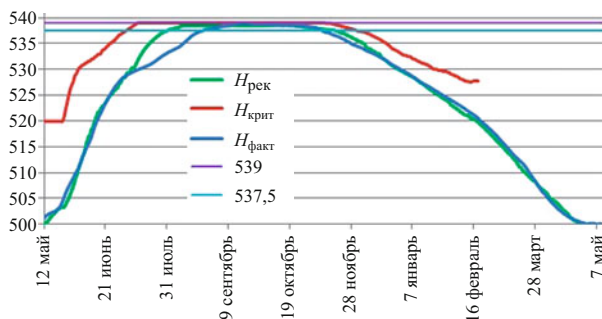


Рис. 3. Сопоставление рекомендуемых в процессе наполнения-сработки отм. УВБ $H_{рек}$ с фактически достигнутыми $H_{факт}$ данными и предельно допустимыми $H_{крит}$ уровнями за 2005 г.

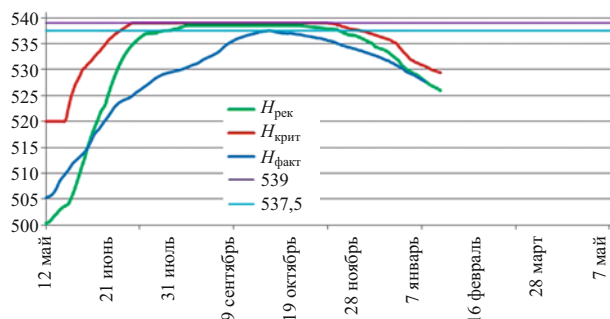


Рис. 4. Сопоставление рекомендуемых в процессе наполнения-сработки отм. УВБ $H_{рек}$ с фактически достигнутыми $H_{факт}$ данными и предельно допустимыми $H_{крит}$ уровнями за 2012 г.

ный выше алгоритм внесены следующие дополнения:

учет рекомендуемых значений для скорости изменения отметки УВБ \dot{H} (м/сут);

условие неубывания отметки УВБ в процессе наполнения водохранилища;

выбор максимально допустимого в течение рассматриваемого года значения отметки УВБ (“полки”) в зависимости от текущей обстановки;

условие невозрастания отметки УВБ в процессе сработки водохранилища.

Все вышеописанные операции по формированию массивов данных и поиска рекомендуемых значений УВБ на каждый рассматриваемый день выполняются с учетом 6 диагностических показателей (радиальных смещений) при помощи специально разработанной сервисной программы. Рекомендованные значения можно охарактеризовать как оптимальные для сложившейся температурной обстановки.

Анализ результатов, изложенных выше, свидетельствует о том, что можно получить допустимое значение отметки УВБ на произвольную дату, если известны величины $T_{низ}$, $T_{верх}$ для температуры бетона в точках наблюдения, расположенных вблизи нижней и верхней граней плотины соответственно. Таким образом, задача собственно прогноза для допустимого значения отметки УВБ редуцируется к задаче прогноза значений $T_{низ}$, $T_{верх}$ на ближайший период.

Алгоритм прогноза [3] для температуры $T_{низ}$ (на 5 суток вперед) основывается на сложении двух температурных полей [4]. Первое из указанных полей определяется существовавшими на протяжении предшествующего года температурами наружного воздуха. Второе поле связано с прогнозируемыми Гидрометеорологическим центром на ближайшие 5 суток температурами.

Что же касается значений температуры $T_{верх}$, то здесь было показано [3], что температура на протяжении 5 суток меняется слабо и что для получения прогнозных значений в данном случае может эф-

фективно использоваться метод экстраполяции с помощью полиномов третьей степени.

Расчетные модели по определению прогнозных (на ближайшие 5 суток) значений $T_{низ}$ и $T_{верх}$ тестировались путем сопоставления натуральных и расчетных данных на временном интервале семь лет (с 2005 по 2012 г.) для датчиков $T_{низ}$ и $T_{верх}$. Оказалось, что величина среднеквадратичной погрешности для $T_{низ}$ составляет $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$, а для $T_{верх}$ — $0,08\text{ }^{\circ}\text{C}$. Что немаловажно, прогнозные значения $T_{низ}$ и $T_{верх}$, полученные с использованием теории теплопроводности твердых тел, показали хорошее совпадение результатов расчета с натурными данными и могут быть использованы в дальнейших расчетах по определению деформированного состояния арочно-гравитационной плотины СШГЭС.

Верификация (с использованием ретроспективных данных) предложенной выше методики оптимального регулирования УВБ и полученных при этом результатов заключается в том, чтобы проверить, были бы выполнены (или нет) сформулированные в [2] критерии безопасности для режимов наполнения-сработки водохранилища в предыдущие годы.

Использовалось критериальное соотношение

$$X_{гидр} + X_{темпл} \leq [X](H). \quad (6)$$

Предельно допустимые значения $[X]$, зависящие от величины напора, накладывают необходимые (обязательные для выполнения) ограничения на величину диагностического показателя X . С целью проверки необходимо использовать все 15 приведенных в [2] диагностических параметров (6 перемещений и 9 углов поворота) для полученных величин $H_{рек}$. В случае превышения предельно допустимого значения $[X]$ хотя бы по одному диагностическому показателю величина $H_{рек}$ уменьшается на фиксированную величину (0,1 м), и проверка проводится снова.

Проверка на ретроспективных данных соотношения (6) для полученных по вышеизложенной ме-

тодике величин X позволяет признать достаточными для сохранения нормального состояния плотины условия в виде ограничения значений отметки УВБ величинами $H_{рек}$, полученными по описанному выше алгоритму.

Выше был подробно описан процесс построения рекомендуемых значений УВБ. Если, однако, условия позволяют, то плотина может работать на отметках, превышающих $H_{рек}$. Запишем неравенство (6) в виде

$$X_{гидр}(H) < [X](H) - X_{темпл}. \quad (7)$$

Значение $X_{темпл}$ определяется из температурного состояния плотины на момент рассмотрения и является величиной фиксированной. Таким образом, варьироваться могут только величина H и зависящие от нее значения $X_{гидр}(H)$, $[X](H)$. Все значения УВБ, которые удовлетворяют неравенству (7), допустимы. Момент нарушения неравенства соответствует предельно допустимой величине напора H^*

$$X_{гидр}(H^*) = [X](H^*) - X_{темпл} \rightarrow H^*. \quad (8)$$

Также вводится предельно допустимое значение напора H (“полка”, в данном случае равная 539 м), по достижении которого величина H^* остается постоянной до момента превышения критерияльного значения радиального перемещения плотины, назначенного для начала ветви сработки.

Для иллюстрации полученных результатов и их ретроспективного анализа даны примеры хронограмм предельно допустимых и рекомендуемых уровней верхнего бьефа в сравнении с фактическими данными для некоторых лет. На рис. 1 – 4 красные линии соответствуют предельно допустимым, зеленые — рекомендуемым, синие — реально достигавшимся в рассматриваемые годы отметкам УВБ. Красную линию превышать нельзя, исходя из принятых критериев безопасности. Зеленая же линия рекомендует не опускаться ниже данных отметок, если имеется достаточный объем приточности. Поэтому оптимальная хронограмма отметки УВБ должна проходить в коридоре между зеленой и красной линиями.

Совместный анализ хронограмм отметки УВБ за 12 лет показывает, что это правило практически соблюдалось в предшествующие годы. Однако, как можно видеть на рис. 1, в 2006 г. на начало июля вышеописанное правило было практически нарушено и синяя кривая вплотную приблизилась к красной. Также для этого года максимальное значение рекомендованной отметки УВБ равнялось 536,5 м, притом что фактически была достигнута отм. 539 м. В 2001 г. с 5 по 13 июня было достигну-

то критическое сближение синей и красной кривой (рис. 2).

На примере двух лет (2001 и 2006 гг.) можно прийти к выводу, что регулирование работы СШГЭС временами проводилось неоптимальным образом. В первую очередь это связано с отсутствием приемлемого по точности аппарата для прогнозирования возможностей плотины в зависимости от различных факторов. Применение же настоящей концепции помогло бы заблаговременно предвидеть подобное развитие событий и предпринять соответствующие действия.

На рис. 3 видно, что в 2005 г., начиная с 1 июля, кривая рекомендуемых отметок УВБ лежит выше фактически достигнутых отметок. В данном случае это объясняется низкой приточностью. При условии достаточной приточности выход на “полку” был бы возможен 7 августа, а не 4 сентября, т.е. на месяц раньше. В остальное время регулирование велось практически идентично рекомендованному.

Как уже упоминалось, желательно, если позволяет приточность, вести регулирование работы СШГЭС таким образом, чтобы синяя кривая находилась над зеленой. На рис. 4 приведены хронограммы для 2012 – 2013 гг. Видно, что до 7 июня синяя кривая находилась над рекомендованной, но впоследствии, в связи с уменьшением приточности, пересекла её и до 31 декабря 2012 г. держалась ниже. Далее, до рассмотренного момента (9 января 2013 г.), регулирование работы СШГЭС велось практически в соответствии с кривой рекомендуемых отметок УВБ. Данный факт является наиболее показательным для работы алгоритма и показывает насколько величина УВБ зависит от приточности, температуры и других факторов.

Из анализа хронограмм для 12 рассмотренных лет можно сделать вывод, что разброс возможных границ регулирования в зависимости от складывающихся температурных условий достаточно велик. В особенности это относится к хронограммам, регламентирующим нижнюю границу для отметок УВБ. Данное обстоятельство позволяет говорить о возможностях оптимизации работы СШГЭС в процессе наполнения и сработки водохранилища.

Выводы

Представлен алгоритм для определения режимов наполнения-сработки водохранилища СШГЭС, обеспечивающих сохранение нормального состояния ГТС. Выполненные проработки относятся к 15 важнейшим диагностическим показателям, включающим 6 радиальных смещений (на отметках наблюдения 542 и 494 м в секциях 18, 33, 45), а также 9 углов поворота для горизонтальных сечений, рас-

положенных на отметках наблюдения 308, 344, 359 м в тех же секциях.

Исходными при построении конкретных оценок для описываемого алгоритма послужили эмпирические (регрессионные) зависимости, выражающие величину X того или иного диагностического показателя через величину УВБ и величины $T_{\text{низ}}$, $T_{\text{верх}}$ (значения температуры, измеренной расположенными у нижней и верхней граней соответственно датчиками). Однако в целом ряде случаев использовались расчетные данные, полученные в результате численных исследований на математической модели, которая включает плотину и вмещающие породы скального основания.

Разработанный алгоритм и сервисная программа позволяют оперативно определять рекомендуемые отметки УВБ, основываясь на условиях, обеспечивающих сохранность отремонтированных зон бетона и работоспособное техническое состояние ГТС.

Практическая ценность полученных результатов заключается в возможности оптимизировать

процесс наполнения и сработки водохранилища СШГЭС, обеспечив нормальное техническое состояние ГТС, а в ряде случаев — и выработку дополнительного количества электроэнергии.

Список литературы

1. *Khrapkov A. A., Kostylev V. S., Skvortsova A. E.* Assessment of Concrete Dam State by Comparison of the In-Situ Data With the Results of Numerical Research Using Mathematical Models // International symposium on dams for a changing world. Kyoto, Japan, 2012.
2. *Гордон Л. А., Скворцова А. Е.* Предельно допустимые значения диагностических показателей, обеспечивающие нормальное техническое состояние плотины СШГЭС // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2012.
3. *Храпков А. А., Евстифеев А. Д., Костылев В. С.* Определение прогнозных значений температур для точек наблюдения, расположенных в теле бетонной арочно-гравитационной плотины // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2012.
4. *Плят Ш. Н.* Расчеты температурных полей бетонных гидросооружений. — М.: Энергия, 1974.

Применение математической модели “сооружение — основание” к анализу изменений в кинематических показателях бетонной арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС за 2004 — 2012 гг.

Костылев В. С., научный сотрудник (ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева”)

В настоящее время разработаны достаточно совершенные математические модели для систем, включающих тело бетонной плотины и вмещающих массивы скального основания. Степень детализации конструктивных элементов сооружения и отдельных блоков основания, а также возможность адекватного отражения механических свойств бетона и скальных пород позволяют добиться хорошего совпадения между результатами численных исследований и данными натурных наблюдений. При этом оказывается возможным в ряде случаев ответить на принципиальные вопросы, относящиеся к состоянию сооружения, а именно: насколько адаптировалась бетонная плотина к окружающим скальным блокам, завершились ли необратимые процессы в комплексе бетон — скала, каковы величины остаточных смещений, насколько монолитно сооружение и т.д. Во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева подобные математические модели разработаны для гравитационной плотины Бурейской ГЭС и арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС. В статье приводятся результаты численных исследований и натурные данные для бетонной арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС, относящиеся к плановым смещениям нескольких, оборудованных отвесами струнного типа, секций плотины и углам наклона горизонтальных сечений, полученным с помощью поперечных гидростатических нивелиров. Показано, что в период после завершения ремонтных работ скорость накопления остаточных плановых смещений крайне мала и не представляет опасности для сооружения.

Ключевые слова: Саяно-Шушенская ГЭС (СШГЭС), арочно-гравитационная плотина, радиальные перемещения, углы поворота, диагностические параметры, необратимые составляющие, скользящие средние.

Плотина Саяно-Шушенской ГЭС арочно-гравитационная высотой 242 м, шириной по гребню 25 м, шириной по основанию 110 м, длиной гребня 1070 м. Гребень плотины находится на отм. 542 м (кроме этого, на гребне присутствуют конструкции парапета высотой 5 м). Отметка уровня мертвого объема составляет 500 м, нормального подпорного уровня — 539 м. После окончания строительства плотины и достижения отметки НПУ в 1990 г. в теле плотины и на границе с основанием со стороны верховой грани развились горизонтальные трещины, приведшие к резкому увеличению фильтрации в плотине и основании. Трещина в теле плотины была заинъецирована полимерным составом в ходе ремонтных работ 1996 – 1997 гг. Аналогичные ремонтные работы были проведены в основании плотины в период с 1998 по 2003 г. и окончательно завершены в 2006 г. Ремонтные мероприятия были успешными, однако для недопущения раскрытия заинъецированных трещин в будущем отметка нормального подпорного уровня была снижена с 540 м до настоящего значения 539 м. При этом за период после окончания строительства плотины произошло значительное накопление остаточных смещений. Вследствие этого анализ деформаций плотины в настоящее время представляет большое практическое значение и регулярно привлекает внимание различных исследователей [1 – 6]. Среди работ различных авторов, посвящённых исследованию остаточных смещений в бетонных плотинах, следует выделить результаты И. И. Загрядского, изложенные в [7, 8, 9]. Автор работ применял метод квадра-

точного программирования для решения систем линейных уравнений с ограничениями в виде равенств и неравенств. Рассматривались варианты с заданием неубывающей и невозрастающей необратимой составляющей контролируемого параметра, причём искомая компонента аппроксимировалась линейной комбинацией, составленной из ступенчатых либо кусочно-линейных локальных базисных функций времени. В настоящей статье для арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС предложен иной способ определения остаточных смещений, базирующийся на исследовании временного тренда в расхождении (невязке) между результатами численных исследований на математической модели и полученными в ходе натурных наблюдений. Полученные на математической модели плотины в редакции 2011 года результаты были частично представлены в [5]. Приводимые ниже данные основаны на модернизированной математической модели в редакции 2012 г.

Описание расчётной схемы

В ходе работ по анализу напряженно-деформированного состояния Саяно-Шушенской ГЭС с использованием программных комплексов “CosmosM” и “Ansys” была построена и впоследствии дополнена подробная конечно-элементная модель плотины совместно с основанием, подробно описанная в [10]. Общий вид модели, построенной с использованием программного комплекса “Ansys”, приведен на рис. 1. Кратко остановимся на её основных особенностях. Математическая модель ос-

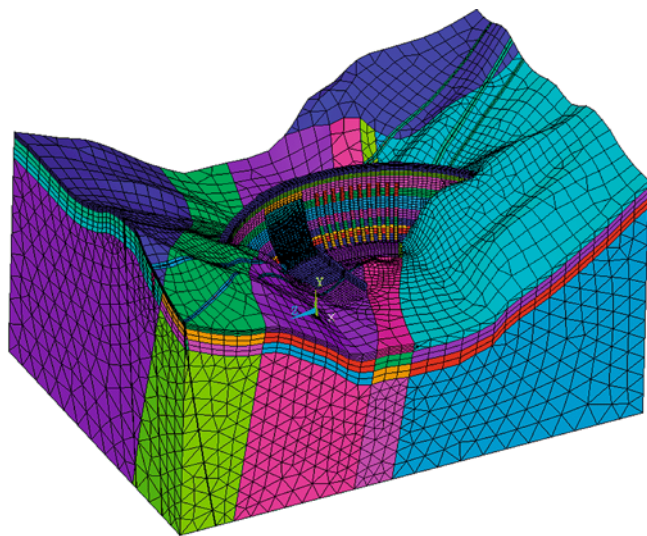


Рис. 1. Модель системы “плотина — основание”, общий вид

нования плотины, основанная на геолого-механической модели, разработанной в ЦСГНЭО, разбита на 209 232 объемных элемента первого порядка точности. Плотина разбита на 33 302 объемных элемента второго порядка точности. Значение конструкционного модуля упругости для материала сооружения составляет 33,5 ГПа, коэффициент Пуассона равен 0,2, коэффициент линейного температурного расширения $0,95 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ для незамороженного бетона и $1,28 \cdot 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ для замороженного (в соответствии с [11]). Расчётные модули упругости основания принимались равными модулям упругости инженерно-геологических элементов (ИГЭ) по данным ЦСГНЭО. Следует отметить, что для всех ИГЭ основания имеются также модули деформации, которые заметно ниже соответствующих модулей упругости. Однако в процессе калибровки расчётной модели по перемещениям на нижних отметках выяснилось, что повышение жёсткости основания позволяет добиться лучшего совпадения расчёта с натурными данными. Т. е. получилось, что работа скалы основания ближе к линейно-упругой; локальные неоднородности и трещиноватость, по-видимому, не оказывают существенного влияния на работу системы “сооружение — основание”. Модель плотины содержит девять снабжённых контактными элементами горизонтальных швов-надрезов в верхней части низовой грани плотины, что позволяет моделировать раскрытие горизонтальных швов между слоями бетонирования, имеющее место в зимний период.

При построении расчетной модели плотины особое внимание было уделено корректному заданию температурной нагрузки, действующей на плотину [10]. Поверхность плотины была разбита на 14 температурных зон [1], для каждой из которых

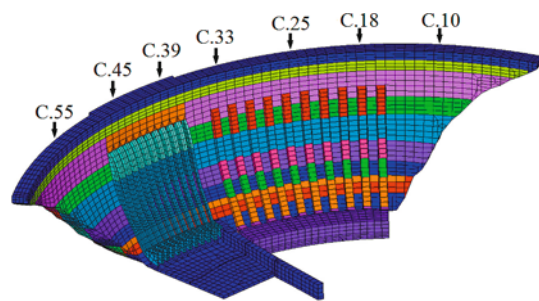


Рис. 2. Модель плотины и контролируемые секции

был выбран температурный датчик, расположенный в теле плотины на известном расстоянии от поверхности. Показания каждого датчика были разложены в ряд Фурье с удержанием гармоник, имеющих период не менее 10 суток. После чего температура в точках бетона, соответствующих заданной зоне, вычислялась исходя из расстояния от точки до дневной поверхности и решения одномерной задачи о распределении температуры в полупространстве при гармонических колебаниях температуры на поверхности [12]. Подобный подход используется уже на протяжении многих десятков лет, является крайне эффективным и до сих пор не утратил своей актуальности [13, 14, 15]. Учитывая, что характерный размер конечного элемента вблизи поверхности плотины составляет около 6 м, критически важным было корректно приложить к плотине нагрузку, соответствующую быстро изменяющемуся по глубине расчётному температурному полю. С этой целью задание температурной нагрузки производится путем приложения ко всем узлам конечных элементов практически точно вычисленных узловых сил, соответствующих полученному распределению температуры. Интегрирование на элементах, примыкающих к поверхности плотины, производится в специально разработанных сервисных программах с использованием квадратурных формул, полученных прямым произведением одномерных двенадцатиузловых квадратур Гаусса (1728 узлов квадратуры на элементе).

Важным дополнением модели по сравнению с её состоянием, описанным в [10], стал учёт разуплотнённой зоны основания со стороны верховой грани в центральной части плотины. Существование указанной зоны прослеживается, например, по показаниям длиннобазных деформометров. Отмеченное разуплотнение смоделировано в виде разреза на контакте бетон — скала протяжённостью около 34 м в направлении вдоль потока; по всей площади разреза установлены линейно-упругие пружины, жёсткость которых увеличивается по мере удаления от верховой грани. У границы разреза исходная жёсткость пружин составляет $0,5 \cdot 10^9$ Па/м в вертикальном направлении и $0,2 \cdot 10^9$ Па/м — в

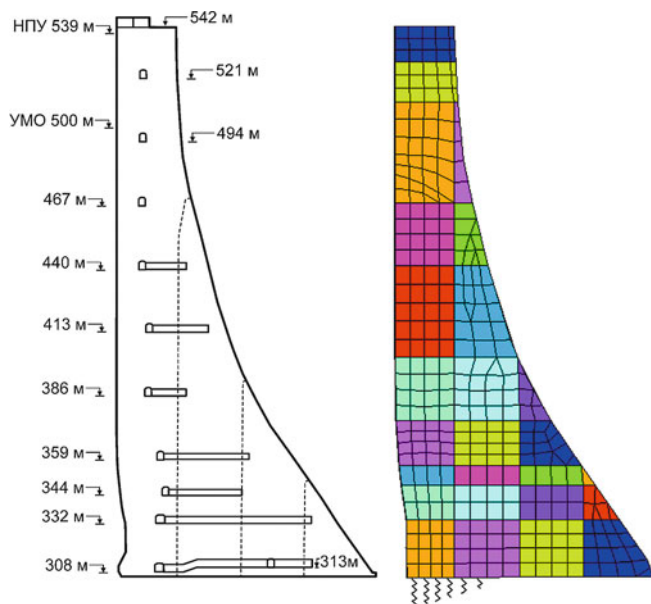


Рис. 3. Вертикальный разрез плотины в направлении вдоль потока в русловой части. Схема и конечно-элементная модель

горизонтальном. Учёт разуплотнения позволил существенным образом сблизить расчётные и натурные данные по углам поворота поперечных гидростатических нивелиров на низких отметках, а также по деформациям в направлении вдоль потока вблизи подошвы плотины, получаемым по данным телетензометрической аппаратуры.

Стоит обратить внимание, что модель после введения разреза остаётся линейно упругой. Разрез, снабжённый пружинами, условно моделирует некий разуплотнённый слой скального основания, обладающий пониженными упругими характери-

стиками. Отметим, что в модели Ю. Н. Александрова [1] та же особенность моделируется пониженным модулем упругости у группы конечных элементов под первым столбом плотины.

Результаты численных экспериментов в сравнении с натурными данными

Плотина Саяно-Шушенской ГЭС оборудована большим количеством диагностической аппаратуры, необходимой для обеспечения безопасной эксплуатации гидроузла. Так, в плотине установлено несколько тысяч телетензометров [16], длиннобазные деформометры, щелемеры, пьезометры и другая аппаратура. В данной работе остановимся на поиске необратимой составляющей в кинематических показателях. А именно были проанализированы: относительные радиальные перемещения семи секций плотины, полученные по показаниям прямых и обратных отвесов струнного типа, а также углы наклона, полученные по показаниям поперечных гидростатических нивелиров. Радиальные и тангенциальные перемещения в секциях 18, 33, 45 вычислялись на десяти отметках относительно положения якорей обратных отвесов, заглубленных в основание. В секциях 10, 25, 39, 55, оборудованных только прямыми отвесами, перемещения были вычислены относительно наиболее низкорасположенной точки наблюдения (отм. 413 м для секций 10 и 55 и отм. 359 м для секций 25 и 39). На рис. 2 представлен общий вид на модель плотины с отмеченными основными контролируруемыми секциями, в которых установлено наибольшее количество диагностической аппаратуры. На рис. 3 изображён по-

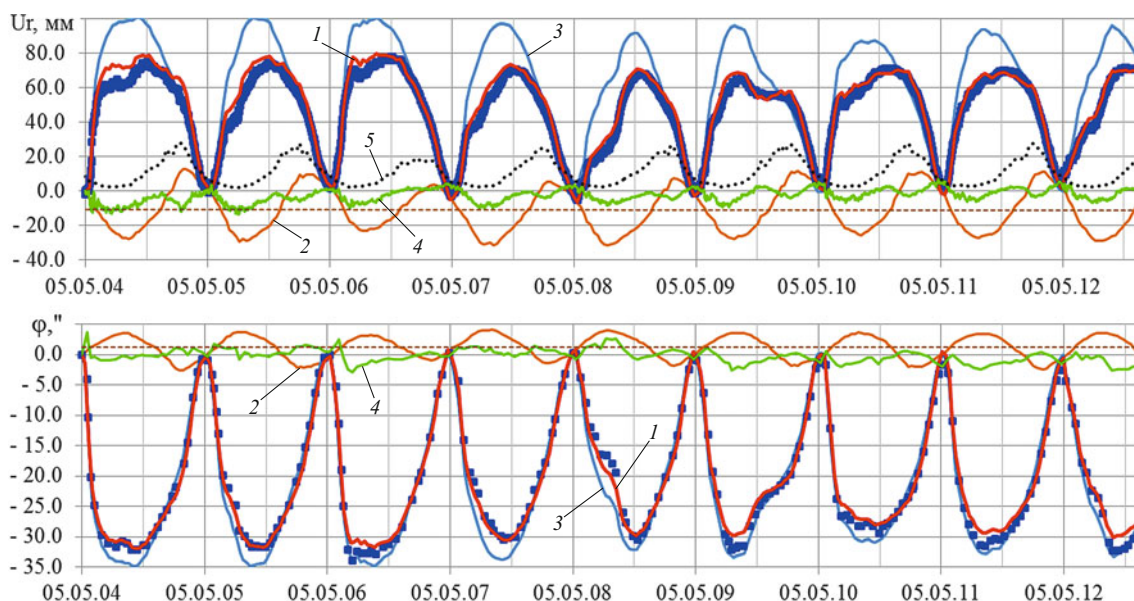


Рис. 4. Центральная секция плотины. Хронограммы радиального перемещения гребня, мм, и угла наклона подошвы (в секундах угловой дуги): ■ — натурные данные; 1 — расчёт на полную нагрузку; 2 — вклад температурной составляющей нагрузки с выделенным линейным трендом (пунктирная линия); 3 — вклад гидростатической составляющей нагрузки; 4 — невязка между натурой и расчётом; 5 — суммарное расчётное раскрытие горизонтальных швов по вертикали в верхней части низовой грани плотины, мм

Радиальные перемещения и углы поворота горизонтальных сечений. Диапазоны изменения параметров, среднеквадратичные отклонения расчётных значений от натуральных данных (СКО), годовые скорости приращения остаточных значений

Номер секции	Отметка, м	Диапазон изменений параметра за период 2006 – 2012 гг.	СКО за период 2006 – 2012 гг.	Скорость изменения необратимой составляющей за период май 2004 г. — май 2012 г.	
				без осреднения	с интервалом осреднения 1 год
	м	мм, сек. угл. дуги	мм/год, сек. угл. дуги/год		
1	2	3	4	5	6
Радиальные перемещения					
10	542	25	1,98	0,13	0,07
10	440	4	0,35	0,09	0,10
18	542	65	3,65	0,61	0,48
18	413	21	1,21	0,30	0,27
18	344	7	0,56	0,09	0,08
25	542	71	3,75	0,62	0,46
25	359	4	0,28	0,01	0,02
33	542	80	3,77	0,80	0,70
33	413	29	1,50	0,44	0,45
33	344	10	0,82	0,21	0,23
39	542	64	4,53	0,18	0,02
39	359	4	0,45	-0,02	-0,02
45	542	59	4,23	0,55	0,43
45	413	19	0,97	0,29	0,31
45	344	5	0,59	0,13	0,12
55	542	27	1,85	0,33	0,28
55	440	5	0,60	0,14	0,15
Углы наклона горизонтальных сечений					
17	313	20	0,95	-0,19	-0,19
18	313	24	1,53	-0,20	-0,23
24	313	33	1,22	-0,19	-0,20
33	313	33	1,13	-0,16	-0,19
38	313	25	1,81	-0,22	-0,27
39	311	25	1,72	-0,14	-0,17
39	308	31	2,87	0,13	0,13
44	313	18	1,16	-0,17	-0,20
45	313	16	1,08	-0,08	-0,08
13	359	18	2,70	-0,23	-0,26
19	359	36	1,31	-0,34	-0,33

Номер секции	Отметка, м	Диапазон изменений параметра за период 2006 – 2012 гг.	СКО за период 2006 – 2012 гг.	Скорость изменения необратимой составляющей за период май 2004 г. — май 2012 г.	
	м			без осреднения	с интервалом осреднения 1 год
				мм, сек. угл. дуги	
1	2	3	4	5	6
33	359	47	1,72	– 0,42	– 0,41
45	359	33	1,95	– 0,33	– 0,38
51	359	18	1,02	– 0,16	– 0,17
19	413	54	2,77	– 0,53	– 0,46
24	413	63	4,01	– 0,81	– 0,65
31	413	66	3,16	– 0,69	– 0,59
34	413	69	6,14	0,12	0,18
40	413	57	2,81	– 0,56	– 0,59
44	413	49	2,14	– 0,35	– 0,39

перечный разрез в центральной части плотины и соответствующая ему конечно-элементная схема. Галереи нанесены условно, их количество и расположение варьируются в различных секциях. Наклон гребня плотины в сторону нижнего бьефа под действием гидростатической нагрузки водохранилища соответствует положительным приращениям в радиальных перемещениях и отрицательным — в углах поворота.

Расчеты, описанные в данном разделе, проводились на временном интервале с 5 мая 2004 г. по 20 декабря 2012 г. с шагом 10 суток. Все результаты приводятся в приращениях относительно начальных значений на 5 мая 2004 г. На этот день известны измеренные значения большинства диагностических параметров, и указанная дата представляется оптимальной для выбора начального момента эксплуатации сооружения в его нынешней форме. К тому же именно в начале мая водохранилище срабатывает до минимальной отметки уровня верхнего бьефа (500 м), после чего начинаются весеннее половодье и наполнение. Т. е. именно начало мая, по сути, является началом очередного “года” для плотины. На рис. 4 в качестве характерного примера приведены результаты сравнения расчетных и натуральных данных по радиальным перемещениям гребня плотины и углам наклона подошвы в центральной секции.

Имеющие место расхождения между расчетными и натуральными показателями могут быть вызваны как неточностями в задании геометрии и свойств материалов расчетной модели, так и не до конца адекватным натуре заданием нагрузок, в особенно-

сти таких, как температурное воздействие. Тем не менее, результаты расчёта отражают поведение некой условной плотины, лишённой каких бы то ни было необратимых изменений. При условии работы реальной плотины в упругой стадии (за исключением сезонного раскрытия швов), даже при наличии погрешности в расчёте, невязка между натурными и расчётными результатами останется ограниченной с течением времени. Таким образом, задача фиксации необратимых изменений в показаниях измерительных приборов, установленных на реальной плотине, сводится к задаче отыскания необратимых изменений в невязках, полученных как разности натуральных и расчётных показателей.

Данный подход обладает тем преимуществом, что невязки значительно уступают по величине исходным параметрам. При минимизации невязок уже были использованы все доступные возможности для построения линейно-упругой расчетной схемы, максимально приближенной к реальной системе “плотина-основание” по геометрии, характеристикам материалов и величине действующих нагрузок. Та часть работы плотины, природа которой в настоящий момент не изучена, отражена в величинах минимизированных невязок. При этом для анализа закономерностей в поведении последних может быть использован весь аппарат, традиционно применяемый при поиске необратимых изменений в контролируемых показателях, включая и регрессионный анализ.

Наиболее простыми из методов поиска закономерности в изменении периодически изменяющейся величины являются те из них, которые связаны с

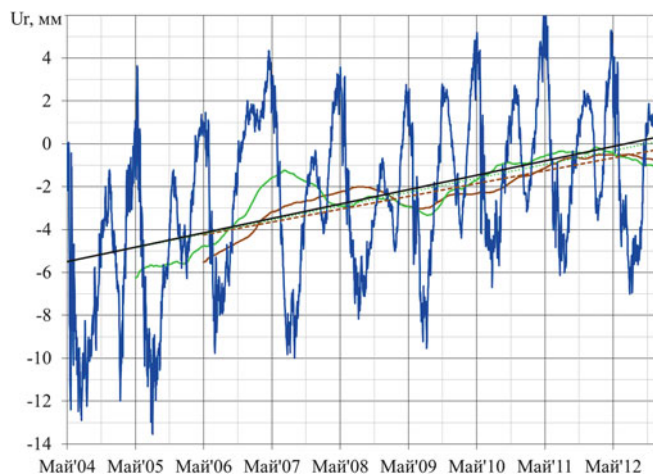


Рис. 5. Хронограмма невязки между натурными и расчётными данными по приращениям радиальных перемещений гребня центральной секции. Годичное (зелёная линия) и двухгодичное (коричневая линия) скользящее среднее от невязки, мм. Линейные тренды в указанных хронограммах (сплошная линия для необработанных данных, пунктирные линии соответствующих цветов для скользящих средних)

выделением линейного тренда посредством метода наименьших квадратов, а также построением и анализом скользящего среднего от рассматриваемой величины. На рис. 5 отдельно приведён график погрешности, полученной как разность натуральных и расчётных перемещений, а также скользящее среднее от погрешности с периодом осреднения 2 года и линейные тренды от указанных величин. Сплошной линией изображён тренд в самой погрешности, пунктирной — в её скользящем среднем. Из рисунка видно, что хотя амплитуда колебаний погрешности (невязки) относительно велика, на интервале с 2004 по 2012 г. достаточно чётко прослеживается тенденция к возрастанию натуральных перемещений относительно расчётных. Скорость роста необратимой составляющей в перемещениях равна приблизительно 0,7 мм/год, что составляет около 1 % от диапазона колебаний параметра. На рис. 6 приведены аналогичные данные для угла поворота поперечного нивелира в основании центральной секции плотины. Приблизительная скорость накопления необратимой составляющей равна 0,18 угловых секунд за год, или 0,5 % от величины, характеризующей диапазон колебаний параметра.

Стоит отметить, что из-за осциллирующего характера хронограммы погрешности угол наклона линейного тренда, построенного непосредственно по исходным данным, может достаточно сильно меняться при небольших сдвигках интервала, на котором происходит вычисление тренда. В этой связи для контроля надёжности результатов при выделении необратимой составляющей было проведено осреднение погрешности на различных временных интервалах. Для смещений тренд, определённый без осреднения и с осреднением в полгода,

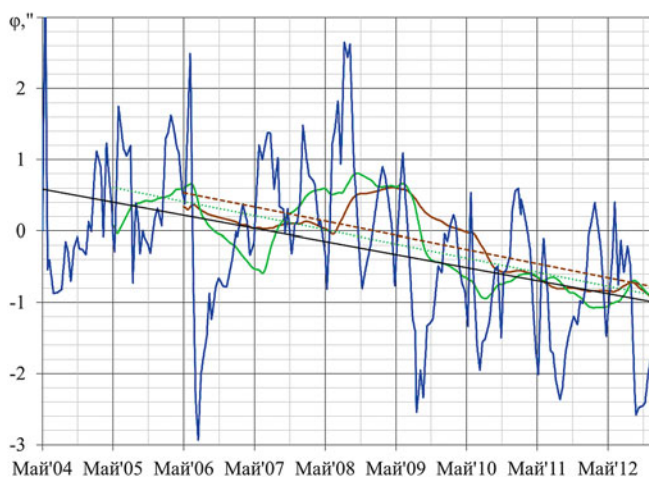


Рис. 6. Хронограмма невязки между натурными и расчётными данными по приращениям углов наклона подошвы центральной секции. Годичное (зелёная линия) и двухгодичное (коричневая линия) скользящее среднее от невязки (секунды угловой дуги). Линейные тренды в указанных хронограммах (сплошная линия для необработанных данных, пунктирные линии соответствующих цветов для скользящих средних)

характеризуется скоростью изменения 0,80 и 0,73 мм/год соответственно. Определённые подобным же образом скорости тренда для интервалов осреднения один и два года составили 0,70 и 0,61 мм/год. Таким образом, при вариации величины интервала осреднения полученные величины скорости тренда для радиальных смещений лежат в пределах от 0,6 до 0,8 мм/год. Для углов поворота сечений соответствующие значения для разных интервалов осреднения равны –0,16, –0,18, –0,19, –0,19 °/год соответственно. Из рассмотрения рис. 5, 6, иллюстрирующих вышеизложенное, видно, что расхождение между скоростями изменения исследуемых величин относительно невелико. Т. е., полученные результаты оказываются устойчивыми к принятой величине параметра — временного интервала осреднения. Следовательно, они характеризуют именно рассматриваемые физические величины, и в этом смысле проведённый анализ можно рассматривать как подтверждение (верификацию) методологии, принятой в настоящей работе для определения тенденций в необратимых изменениях кинематических параметров. При этом ставить задачу о поиске необратимой составляющей можно только на относительно большом промежутке времени, так как достигнутая на данный момент степень соответствия расчётных данных натурным не позволяет однозначно идентифицировать кратковременные флуктуации погрешности как некие аномалии в работе плотины. Скорее всего, осциллирующий характер погрешности связан либо с недостаточно полным учётом температурных воздействий на плотину и фильтрационного воздействия на скальное основание, либо с некими не выявлен-

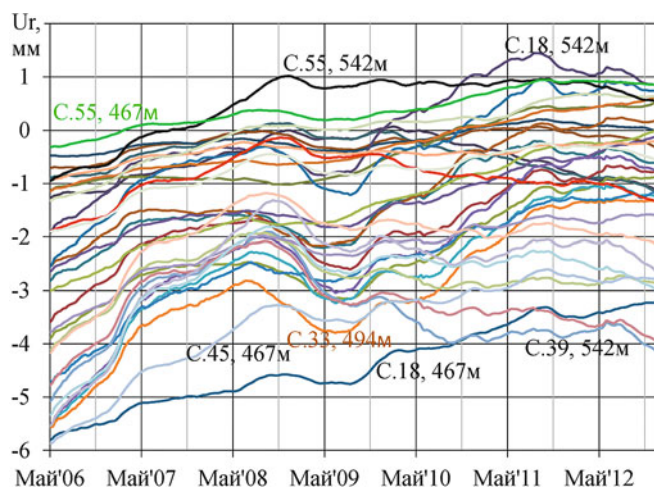


Рис. 7. Двухгодичные скользящие средние от невязок в радиальных перемещениях отвесов в семи секциях на различных отметках, мм

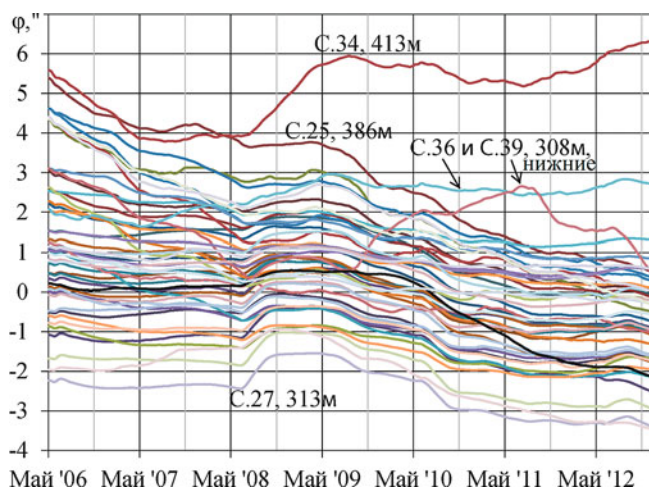


Рис. 8. Двухгодичные скользящие средние от невязок в углах наклона поперечных гидростатических нивелиров

ными особенностями в характере работы сооружения.

Как уже было отмечено, число натуральных параметров, требующих анализа, достаточно велико; всего обработано 104 параметра. В настоящей работе сделана попытка наглядно отобразить некоторые общие закономерности в поведении плановых перемещений и углов наклона плотины в поперечном направлении. На рис. 7 представлены скользящие средние от невязок в радиальных перемещениях семи секций плотины на некоторых выбранных отметках (для сокращения числа хронограмм на рисунке оставлены данные, относящиеся к отм. от 542 до 467 м и к отм. 413 м, всего 33 параметра). Можно выделить две характерные группы приборов: в одной из них достаточно уверенно прослеживается медленное возрастание величины скользящего среднего вплоть до последнего времени, в другой же (в основном в правобережных секциях 39, 45, 55) скользящие средние на второй половине хронограммы не имеют тенденции к возрастанию. Более однородная (согласованная) картина наблюдается на рис. 8 для скользящих средних от невязок в углах поворота поперечных гидростатических нивелиров. Здесь только три прибора из 48 рассмотренных не имеют тенденции к увеличению угла наклона и тем самым выбиваются из общей закономерности (секция 34, отм. 413 м, секции 36 и 39 вблизи подошвы плотины со стороны напорной грани). Одновременно выделяются отдельные гидростатические нивелиры (например, секция 14, отм. 332 м) с повышенной скоростью увеличения наклона, их поведение требует дальнейшего анализа. В большинстве случаев скорости изменения углов наклона составляют около 1 % в год от диапазона их годовых колебаний.

При обсуждении вопроса о значимости необратимых изменений первостепенное значение приоб-

ретает именно скорость, с которой происходят указанные изменения. В любой вновь возведённой плотине после наполнения водохранилища происходят процессы адаптации сооружения к новым условиям, в большинстве плотин постепенно затухающие с течением времени [17, 18]. В то же время процесс увеличения скорости роста необратимой составляющей в контролируемых параметрах однозначно свидетельствовал бы об аномалиях в работе сооружения. Полученные в ходе выполнения исследований результаты для 37 диагностических параметров сведены в таблицу. В столбцах 1, 2 рассматриваемой таблицы даны номера секций и отметки, на которых расположены приборы наблюдения (струнные отвесы и гидростатические нивелиры), а в столбцах 3, 4 — диапазоны изменения параметров и среднеквадратические отклонения (СКО) расчётных данных от натуральных за 2006–2012 гг. В столбцах 5, 6 таблицы помещены определённые вышеизложенным способом годовые скорости для приращений остаточных значений исследуемых величин. Скорости вычислены на интервале с мая 2004 г. по май 2012 г. как непосредственно для невязок, так и для соответствующих годовых скользящих средних. Диапазоны изменения параметров и СКО были вычислены на более коротком временном периоде в связи с предполагаемым наличием необратимой составляющей, которая не позволяет добиться высокой степени соответствия полученных на линейной модели расчётных данных натурным на всём рассматриваемом периоде.

На рис. 9, 10 для тех же приборов, что и на рис. 7 и 8 соответственно, приведены осреднённые скользящие скорости изменения невязок в кинематических параметрах, единиц в год. Точка хронограммы в каждый момент времени соответствует скорости изменения соответствующей величины, полученной по данным за предшествующие четыре

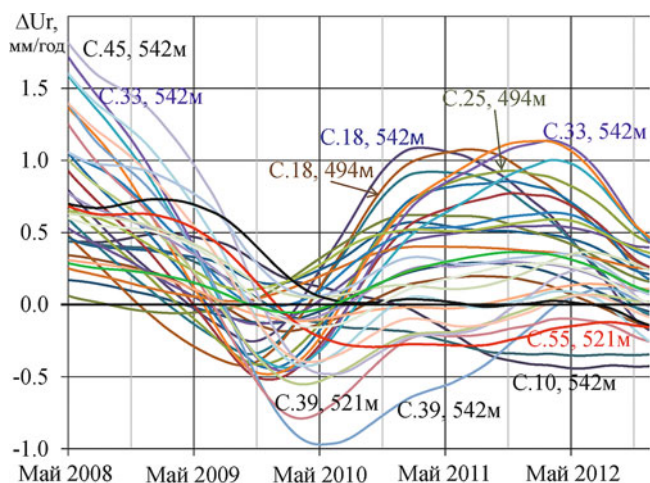


Рис. 9. Осреднённые на четырёхгодичных интервалах скользящие скорости изменения невязок в радиальных перемещениях отвесов в семи секциях в различных отметках, мм/год

года. Жирной чёрной линией проведена горизонтальная ось, соответствующая нулевой скорости изменения параметров. Скорости невязок в радиальных перемещениях, лежащие выше нулевой линии, соответствуют прогрессирующему наклону плотины в сторону нижнего бьефа. Для углов поворота, наоборот, отрицательные скорости в нижней части соответствуют возрастанию степени наклона плотины. Из рисунков видно, что если в первые годы после окончания ремонтных работ нарастание необратимой составляющей в перемещениях шло согласованно и с относительно большой скоростью, достигающей 1,8 мм/год, то к последнему времени произошло разделение приборов на две упомянутые группы, с положительными и отрицательными скоростями в невязках. Максимальная осреднённая скорость увеличения радиальных перемещений за последние четыре года (по данным за период с 20.12.2008 по 20.12.2012) не превышает 0,5 мм/год. Тем не менее, по большей части скорости для всех приборов находятся в положительной области, т.е. суммарное приращение перемещений, соответствующее интегралам от скоростей, происходит в сторону нижнего бьефа. Как отмечалось выше, для скоростей изменения невязок углов поворота поперечных гидростатических нивелиров, приведённых на рис. 10, наблюдается в целом более согласованная картина. По большей части скорости почти всех приборов соответствуют увеличению необратимой составляющей в наклоне плотины. При этом отчётливо выделяются три уже упомянутых гидростатических нивелира, имеющие в основном положительную скорость приращения необратимой компоненты. С нашей точки зрения, отклонения в работе указанных приборов вызваны локальными аномалиями, которые не оказывают существенного влияния на поведение плотины в целом. Скорость изменения в углах поворота по

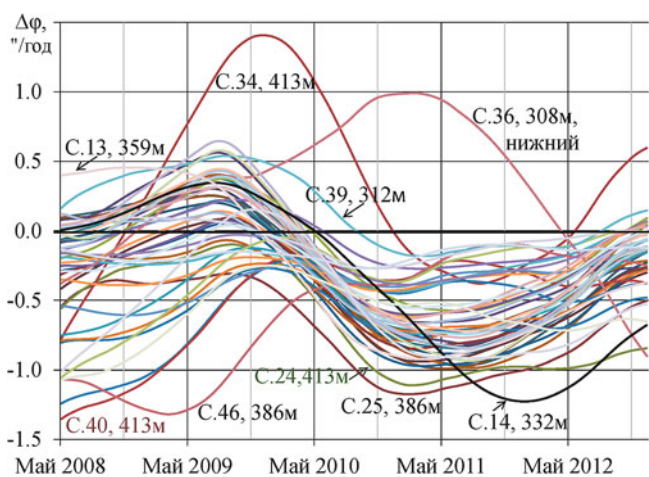


Рис. 10. Осреднённые на четырёхгодичных интервалах скользящие скорости изменения невязок в углах наклона поперечных гидростатических нивелиров, °/год

данным за последние четыре года не превышает 0,9 с угловой дуги в год и в целом имеет тенденцию к уменьшению. При этом важно иметь в виду, что среднеквадратическая погрешность при измерении смещений составляет 0,7 мм, а при измерении углов поворота — 0,7” [6]. Несмотря на то что (как отмечалось ранее) конечно-элементная модель за последний год была уточнена и появились новые натурные данные, качественные выводы относительно характера необратимых процессов совпадают с представленными в [5].

Остановимся ещё на степени достоверности полученных результатов. Как отмечают некоторые специалисты, одной из возможных причин кажущегося наличия необратимых перемещений и углов поворота может оказаться наличие необратимой составляющей в показаниях температурных датчиков, т.е. “сползание нуля” датчиков. Для проверки этой гипотезы были построены линейные тренды в составляющих расчётных параметров, определяемых температурной нагрузкой (оранжевая линия на рис. 4, тренд изображён пунктирной линией). Сколько-нибудь значимого наклона в построенных линиях тренда не выявлено. Это свидетельствует либо о том, что внешние температурные изменения удачно компенсируют “сползание” датчиков, либо о стабильных в целом показаниях аппаратуры. В качестве дополнительной проверки нами была проанализирована “гирлянда” датчиков в секции 33 на отм. 462 м на расстоянии от 14 см до 3,7 м от поверхности (всего восемь датчиков). Показания заглублённого на 14 см опорного датчика за последние годы были пересчитаны в глубь плотины по одномерной схеме, где сравнивались с показаниями других датчиков. За период с 2004 по 2012 г. действительно имеет место тренд в скользящем среднем от погрешности пересчёта, соответствующий неоправданному увеличению температуры

в опорном датчике в пределах $0,35^{\circ}\text{C}$ за 6 лет. В соответствии с эмпирической формулой из [6] такое изменение температуры соответствует расчётному отклонению гребня плотины на величину порядка 0,8 мм, что в несколько раз меньше накопленной необратимой составляющей невязки. Подробный анализ происходящих процессов в температурных датчиках может стать темой для отдельного исследования, однако, с нашей точки зрения, влияние данного фактора недостаточно для того, чтобы оказать влияние на качественные выводы, касающиеся предмета настоящей работы.

Другая возможная причина неточностей в детектировании необратимой составляющей в кинематических показателях может заключаться в недостаточно полном учёте изменения температурного поля стационарной части плотины после аварии в августе 2009 г. В настоящее время расчётная температура всех чётных секций стационарной части плотины, в которых расположены турбинные водоводы, принимается одинаковой в соответствии с показаниями опорного датчика в секции 18 (второй гидроагрегат) на 458-й отметке, на расстоянии 1,3 м от поверхности низовой грани. После выхода из строя всех гидроагрегатов и постепенного ввода в эксплуатацию некоторых из них температурный режим различных секций может отличаться, что невозможно учесть в расчётной модели. Однако возможность влияния данного фактора не представляется существенной, поскольку степень совпадения расчётных и натурных данных после аварии остаётся высокой. Более того, углы поворота на низких отметках, в меньшей степени подверженные влиянию температурного фактора, показывают однозначную согласованную картину. Тем не менее, дать окончательный ответ на вопрос о скорости необратимых изменений станет возможно только через несколько лет после ввода в строй всех гидроагрегатов и возвращения плотины к характерным для доаварийного периода режиму эксплуатации и температурному полю.

На данном этапе для плотины Саяно-Шушенской ГЭС в целом важным является мониторинг её состояния и периодический контроль за необратимой составляющей в контролируемых параметрах. Погрешность вычислений сопоставима с величиной необратимой составляющей за два — три года или даже превышает последнюю. Поэтому анализ накопления остаточных деформаций представляет определённые трудности и возможен только при рассмотрении достаточно большого временного интервала. В связи с тем что существенные ремонтные работы в основании плотины были завершены только в 2003 – 2006 гг., накопленная к настоящему времени информация позволяет лишь приблизи-

тельно оценить скорость необратимых деформаций.

Выводы

1. Правильная диагностика происходящих в сооружении необратимых изменений важна для принятия тех или иных решений в процессе его эксплуатации. Вопрос о выделении необратимых составляющих в контролируемых параметрах гидротехнических сооружений служил предметом многочисленных исследований, среди которых имеются и относящиеся к арочно-гравитационной плотине Саяно-Шушенской ГЭС работы, выполненные во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева за период с 2000 г. по настоящее время И. И. Заградским и В. Н. Дурчевой.

2. Определение характера и скорости накопления необратимых изменений, в частности по кинематическим показателям, актуально в настоящее время для плотины Саяно-Шушенской ГЭС, поскольку понимание этих процессов важно с целью обеспечения безопасного для плотины управления режимом уровня водохранилища. Этот вопрос в настоящее время дискутируется в связи с приближающимся завершением ремонтных работ после аварии 2009 г. В настоящей статье использован наглядный и эффективный способ исследования скорости остаточных деформаций с использованием ранее разработанной и соответствующим образом дополненной математической модели плотины. Именно на периоде эксплуатации гидроузла с 2004 по 2012 г. были получены хронограммы невязки между натурными и расчётными значениями выбранных кинематических параметров (общее число последних достигало 104). Во всех случаях указанные хронограммы были обработаны для выделения необратимой составляющей.

3. Для плотины Саяно-Шушенской ГЭС показано наличие в рассматриваемый период медленных необратимых изменений в большинстве параметров, относящихся к радиальным перемещениям и к углам поворота поперечных гидростатических niveлиров. При этом углы наклона демонстрируют более согласованное поведение с точки зрения роста необратимой составляющей. Картина необратимых радиальных перемещений после 2006 г. для различных секций оказывается разнонаправленной, однако по-прежнему преобладает накопление остаточных смещений в сторону нижнего бьефа. Что касается количественных показателей, для гребня ключевой секции плотины характерная скорость накопления необратимых перемещений за период с мая 2004 г. по май 2012 г. имеет самое большое значение по абсолютной величине среди всех отвесов и составляет 0,7 мм/год. В той же секции на отм.

413 м соответствующая скорость равна 0,4 мм/год, а на отм. 344 м — 0,2 мм/год. Для подошвы ключевой секции увеличение угла наклона происходит со скоростью 0,19"/год. Наибольшая же скорость наклона в поперечном направлении по подошве плотины наблюдается для нивелира в секции 38 и составляет 0,27 угловых секунды за год в сторону нижнего бьефа.

4. Скорость отмеченных изменений чрезвычайно мала и в ближайшие годы не представляет опасности для сооружения. Ответить на вопрос о затухании необратимых процессов в настоящее время невозможно в связи с недостаточным количеством времени, прошедшего после окончания ремонтных работ в основании плотины. Выявленные тенденции требуют внимания и периодического (раз в несколько лет) контроля необратимой составляющей в кинематических параметрах.

Список литературы

1. Толошинов А. В., Александров Ю. Н., Епифанов А. П. Построение конечно-элементной расчетной модели для оценки напряженно-деформированного состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Изв. вузов. Строительство. 2006. № 7 (51). С. 38 – 47.
2. Александров Ю. Н. Расчётные исследования поведения плотины Саяно-Шушенской ГЭС в годовом цикле изменения нагрузок // Гидротехническое строительство. 2006. № 6. С. 9 – 13.
3. Александров Ю. Н. Использование расчётной модели плотины Саяно-Шушенской ГЭС для оценки и прогнозирования её состояния // Гидротехническое строительство. 2008. № 11. С. 64 – 69.
4. Газиев Э. Г. Анализ современного напряженно-деформированного состояния арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2010. № 9. С. 48 – 57.
5. Khrapkov A. A., Kostylev V. S., Skvortsova A. E. Assessment of concrete dam state by comparison of the in-situ data with the results of numerical research using mathematical models // International Symposium on Dams for a Changing World. Киото, Япония, 2012.
6. Вульфович Н. А., Гордон Л. А., Стефаненко Н. И. Арочно-гравитационная плотина Саяно-Шушенской ГЭС. Оценка технического состояния по данным натуральных наблюдений. СПб, 2012.
7. Загрядский И. И. Выявление необратимых изменений в работе конструкции, накапливающихся с переменной скоростью и скачкообразно, по данным наблюдений // Материалы 4-й международной конференции “Научно-технические проблемы прогнозирования надёжности и долговечности конструкций и методы их решения”. СПб., 2001.
8. Загрядский И. И. Применение метода квадратичного программирования для решения задач контроля состояния бетонных плотин // Научно-технические ведомости СПбГТУ. 2001. 1(23). С. 85 – 90.
9. Загрядский И. И. Эмпирические модели. Мониторинг и анализ необратимых процессов в системе плотина-основание // Материалы седьмой научно-технической конференции “Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии”. СПб., 25 – 27 октября 2012 г.
10. Храпков А. А., Скворцова А. Е., Костылев В. С., Щерба Д. В. О построении математической модели арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2011. Т. 264. С. 56 – 69.
11. Дурчева В. Н., Загрядский И. И. Анализ собственных деформаций бетона на эксплуатируемых плотинах по данным натуральных наблюдений // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2000. С. 237. С. 54 – 62.
12. Карслоу Г., Эгер Д. Теплопроводность твердых тел. — М.: Наука, 1964.
13. Malla S. and Wieland M. Analysis of an arch-gravity dam with a horizontal crack // Computers and Structures. 1999. No 72. P. 267 – 278.
14. Léger P., Leclerc M. Hydrostatic, temperature, time-displacement model for concrete dams // J. Eng. Mec-ASCE. 2007. 133(3). P. 267 – 77.
15. Ardito R., Maier G., Massalongo G. Diagnostic analysis of concrete dams based on seasonal hydrostatic loading // Engineering Structures. 2008. No 30. P. 3176 – 3185.
16. Пермякова Л. С., Зюзина Н. В., Сахаров Г. Г., Дружинин А. Ю. О результатах диагностического обследования закладной струнной аппаратуры, установленной на Саяно-Шушенской плотине // Гидротехническое строительство. 2008. № 11. С. 79 – 82.
17. Perner F. and Obernhuber P. Analysis of arch dam deformations, Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China. 2010. Vol. 4. Issue 1. P. 102 – 108.
18. Bossoney C. and Balissat M. Uncertainty about origin of permanent deformations on existing concrete dams // 73-rd Annual Meeting of ICOLD. Tehran, Iran, 2005. Paper No. 149 – S4.

Модельные исследования и перекрытие русла р. Колыма в створе Усть-Среднеканского гидроузла

Ферингер А. Б., главный инженер проекта Колымской ГЭС (ОАО “Ленгидропроект”),
Дерюгин Г. К., инженер (ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева”)

На основе натуральных и лабораторных материалов определены коэффициенты устойчивости камня и кубов, уже лежащих на откосе банкета из этих же элементов, и при их наброске в текущую воду. Рассмотрены условия, при которых перекрытие невозможно без перекрытия кубов или камня за пределы профиля банкета перекрытия, и условия, при которых оно может быть осуществлено банкетом компактного профиля.

Ключевые слова: перекрытие русла, перепад на банкете, кубы, крупность камня, коэффициент устойчивости; откос бетона, гладкое русло, модель, река Колыма; Усть-Среднеканская ГЭС.

Основной сложностью при проектировании работ по перекрытию русла является неопределённость информации об устойчивости камня, кубов или тетраэдров на откосе банкета (шпоры), причём как при наброске их в текущую воду, так и когда эти элементы уже лежат на основании из камня или таких же элементов. В справочной литературе (например [1]) данные об устойчивости этих отдельных элементов ограничены. Для камня имеются коэффициенты устойчивости, когда он лежит на гладком горизонтальном дне ($K_y = 0,9$) или на дне из таких же отдельных элементов ($K_y = 1,2$). Для кубов и тетраэдров — когда один такой элемент лежит на гладком дне ($K_y = 0,52$ и $K_y = 0,44$ соответственно).

В связи с отмеченным основной целью настоящей работы являлась оценка устойчивости камня и кубов на откосе банкета в лабораторных условиях и по данным измерений, выполненных при осуществлении перекрытия русла в створе Усть-Среднеканского гидроузла.

Лабораторные исследования. На модели масштаба 1:120 рассматривались случаи перекрытия русла при расходах 620, 1090 и 1200 м³/с, а также этапы его стеснения при расходе 2250 м³/с.

Пропускная способность водоотводящего тракта определялась для ряда вариантов выполнения подводящего канала и водобойной стенки, и при отметке завершения перекрытия в натуральных условиях 232,42 м расход через сооружения по лабораторным данным составил 600 м³/с. Таким образом, в момент завершения перекрытия при расходе в реке 700 м³/с фильтрационный расход через банкет мог достигать 100 м³/с. В проекте он принимался равным 55 м³/с, что достаточно близко к указанной выше оценке. Тем более что она относилась, по-видимому, к моменту фильтрации через наброску кубов на заключительном этапе, ещё до формирования проектного профиля банкета. Возможно, что различие расходов (около 50 м³/с) объясняется по-

грешностями их измерений в лабораторных и натуральных условиях.

Предельные условия устойчивости камня на банкете определялись при использовании на модели как песка с размером частиц до 1 мм, так и однородного гравия крупностью 5 – 6; 3 – 4 и 1 – 3 мм, плотностью 2,7 г/см³. Для натурального объекта соответствующая крупность составила 12, 72, 48 и 36 см, так как определяющими устойчивостью являлись более крупные частицы грунта модели.

Коэффициенты устойчивости находили по известным соотношениям:

$$V = \sqrt{2gz} \quad \text{и} \quad V = K_y \sqrt{\frac{\gamma_1 - \gamma_B}{\gamma_B} \sqrt{2gd}},$$

и при плотности камня $\gamma_k = 2,7 \text{ т/м}^3$ и бетона $\gamma_B = 2,2 \text{ т/м}^3$ для бетонных кубов $K_y = \sqrt{\frac{Z}{1,2d}}$, для камня $K_y = \frac{\sqrt{Z}}{1,7d}$, где d — приведённый диаметр соответствующей отдельности.

Выполненные опыты показали, что в диапазоне расходов 620 – 2250 м³/с при использовании камня крупностью 36 см могут быть допустимы перепады на банкете 0,7 – 0,9 м и коэффициенты устойчивости составляют 1,1 – 1,2, что весьма близко к известным значениям этих коэффициентов для случая устойчивости камня на дне из таких же отдельных элементов [1].

Если при перекрытии используется камень (негабариты) диаметром 0,72 м, то, допуская незначительный объём выноса этих отдельных элементов за пределы банкета (для условий рассматриваемого объекта — около 90 м³), может быть достигнут перепад на банкете 2,15 м ($K_y = 1,33$), а увеличение объёма выноса до 700 м³ позволяет осуществить полное пе-

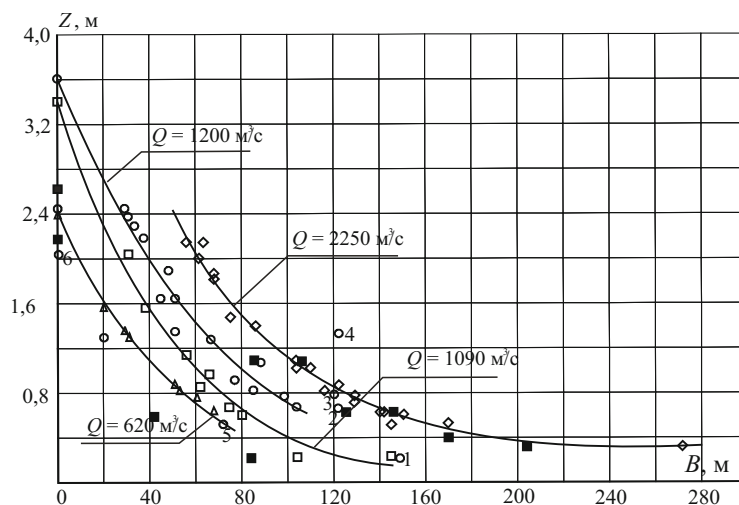


Рис. 1. Зависимость перепада уровней воды на банкете от ширины прорана по дну при различных расходах реки. Опытные данные: \diamond $Q = 2250 \text{ м}^3/\text{с}$; \circ $Q = 1200 \text{ м}^3/\text{с}$; \square $Q = 1090 \text{ м}^3/\text{с}$; \triangle $Q = 620 \text{ м}^3/\text{с}$.

Расчетные данные:

■ для $Q = 2250 \text{ м}^3/\text{с}$; $Q = 620 \text{ м}^3/\text{с}$; 1 – 6 — натурные данные из табл. 2

рекрытие при расходе в реке $1200 \text{ м}^3/\text{с}$, когда перепад составит $2,45 \text{ м}$ ($K_y = 1,4$) и откосы банкета и шпоры по дну сомкнутся.

Применение камня диаметром $0,48 \text{ м}$ позволяет получить перепады на банкете до $1,15 \text{ м}$ ($K_y = 1,2$), а допуская вынос за пределы банкета до 1200 м^3 — до $1,8 \text{ м}$ ($K_y = 1,5$).

Предельные перепады, при которых сохраняется устойчивость наброски кубов массой 4 т (кубы лежат на основании из таких же элементов), достигали $2,04 \text{ м}$ ($K_y = 1,0$), и лишь 10 кубов смещались за пределы банкета при $Z = 2,23 \text{ м}$ ($K_y = 1,1$).

Предельный перепад, при котором кубы массой 13 т , сбрасываемые на откос из таких же кубов, сохраняли устойчивость (не смещались за пределы профиля банкета при падении в воду или перекатывании по кубам), — $1,1 \text{ м}$ ($K_y = 0,60$); практически

при таких же перепадах происходила и потеря устойчивости сбрасываемых кубов. Зависимости перепада от ширины прорана и расхода в реке даны на рис. 1.* Приведём краткую информацию о выполненных на модели опытах по перекрытию для расходов $1090 - 620 \text{ м}^3/\text{с}$.

Перекрытие русла при расходе $1090 \text{ м}^3/\text{с}$. Применение горной массы диаметром $0,3 \text{ м}$ позволило уменьшить проран до 80 м и кубов массой 13 т — до 56 м , после чего кубы перемещались на расстояние $100 - 150 \text{ м}$ от банкета (рис. 2). Смещение за пределы банкета $200 - 250$ кубов было достаточно

* Принимая по рис. 1 перепад $Z = 2,4 \text{ м}$ — для случая определяющего наиболее тяжёлые условия, когда откосы банкета и шпоры сомкнутся у дна, а ширина прорана будет близка к 20 м , имеем для кубов $2,4 = 0,62 \cdot 1,2d$; для камня $2,4 = 1,22 \cdot 1,7d$.

Т а б л и ц а 1

Характеристика устойчивости отдельных частей на оголовке банкета перекрытия

Перекрытие	Z, м	K_y	Примечание
Предельное выдвигание банкета из горной массы	0,6	1,2	
Наброска кубов на откос из камня по всей поверхности оголовка (начиная с верховой его части), в момент падения кубы не смещаются за пределы банкета	0,60	0,47	Непредельное значение
Наброска кубов на кубы при сохранении устойчивости в момент падения куба в воду	0,67	0,50	Непредельное значение
Наброска кубов на кубы при смещении кубов за пределы банкета	1,1	0,64	Предельное значение
Кубы, лежащие на кубах, сохраняют устойчивость	1,3	0,68	Непредельное значение
	2,04	1,0	Предельное



Рис. 2. Замыкание прорана кубами массой 13 т при расходе реки 1090 м³/с. Виден вынос отсыпаемого поверх кубов камня крупностью 12 – 36 см

для обеспечения дальнейшего выдвигания банкета и завершения перекрытия русла.

Применение кубов массой 25 т так же не позволило перекрыть проран без их выноса за пределы банкета, причём почти в таком же объёме, как и кубов массой 13 т.

Основываясь на модельных данных, без выноса отдельных частей за пределы банкета проран может быть перекрыт при использовании кубов массой по 200 т ($d = 5,6$ м) или негабаритов массой 1,3 т ($d = 1$ м)*

Перекрытие русла при расходе 620 м³/с. При перепаде на банкете 1,1 м скорости в проране достигли 4,5 м/с и за пределы банкета, на небольшое расстояние, было вынесено 10 кубов массой по 13 т, после чего проран был перекрыт; максимальный перепад составил 2,4 м.

К сожалению, до сих пор затруднительно разработать достаточно надёжные расчётные зависимости по определению объёма отдельных частей, откладываемых за пределами банкета в случае их недостаточной крупности. Данная задача решается лишь применением моделирования.

Перекрытие русла в створе Усть-Среднеканской ГЭС. К работам по перекрытию русла, стеснённого перемычками котлована до ширины около 265 м, приступили 28 августа 2011 г. при расходе воды 1800 м³/с. К 4 сентября банкет, отсыпавшийся горной массой с гранулометрическим составом по рис. 3, выдвинулся от левого берега на 135 м и перепады на нём достигли 0,6 м. Скорости в проране шириной 135 м составили 3,5 м/с, что соответствует неразрывающей скорости камня крупностью 25 см. Как видно из рис. 3, применявшийся грунт имел до 60 % относительно мелких отдельных частей, а крупней 25 см было примерно 30 %. Указанное положение оголовка банкета было закреплено кубами массой 13 т (с приведённым диаметром 2,24 м). Кубы при падении в воду и перемещении по откосу

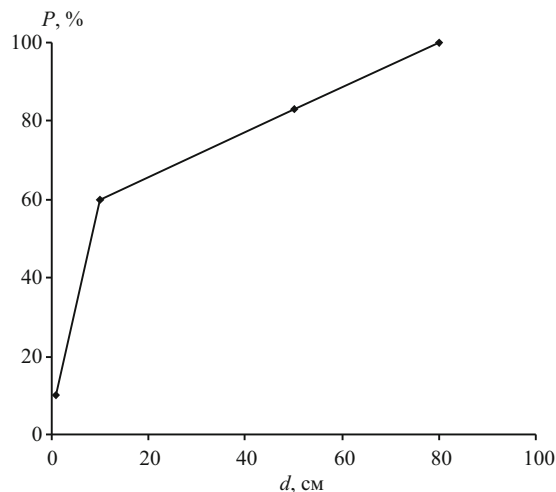


Рис. 3. Гранулометрический состав горной массы, отсыпаемой в банкет перекрытия

из камня не смещались за пределы банкета. Возможно, это происходило потому, что первые из них размещались на верхней стороне банкета — в зоне относительно меньших скоростей. При этом коэффициент устойчивости кубов, падающих на камень, но находящихся ниже по течению относительно уже лежащих, составил $K_y = 0,47$. Видимо, это значение не является максимальным, и можно было бы осуществить данную операцию при несколько большем значении перепада на банкете. Работа по креплению оголовка кубами были закончены при перепаде на банкете 0,67 м. При этом кубы, падая в текущую воду на уже лежащие кубы, не смещались за пределы банкета; соответственно коэффициент их устойчивости составил 0,50 (видимо, данное значение также не являлось предельным). Дальнейшие работы по отсыпке банкета перекрытия были прерваны в связи с увеличением расходов воды.

Т а б л и ц а 2

Ширина прорана по уровню воды в верхнем бьефе перепады уровней на банкете перекрытия на этапах перекрытия русла

Q , м ³ /с	$B_{ур}$, м	Z , м
1160	156	0,23
2190	131	0,67
2450	131	0,79
4000	135	1,30
840	80	0,48
800	6	2,05
700	0	2,44
820	29	1,13

Несмотря на рост к 16 сентября расходов до $4000 \text{ м}^3/\text{с}$ и перепада до 1,3 м, кубы на оголовке банкета сохранили устойчивость; коэффициент устойчивости составил 0,68. При средней скорости в проране 5 м/с данный этап перекрытия был весьма напряжённым, так как уровни воды приблизились к гребню банкета.

Со снижением расходов в русле к 20 сентября до $1080 \text{ м}^3/\text{с}$ и перепада до 0,56 м перекрытие продолжилось отсыпкой скального грунта, а с увеличением перепада — наброской кубов. При перепаде 1,1 м сбрасываемые в поток кубы перекачивались по уже лежащим и переносились за пределы банкета. Коэффициент устойчивости при этом составил 0,64. Дальнейшее передвижение банкета оказалось возможным лишь после образования упора из оставившихся ниже банкета кубов и затем — после формирования быстотока из этих элементов.

Таким образом, при наличии кубов массой 13 т критическим является перепад на банкете 1,1 м (0,45 от максимального). При массе кубов 25 т ($d = 2,83 \text{ м}$) этот перепад составил бы $Z = 0,642 \cdot 1,2 \cdot 2,83 = 1,4$ (0,57 от максимального), и сократить проран до выноса таких кубов удалось бы примерно на 10 м (рис. 1) по сравнению с применением кубов массой 13 т.

Русло было перекрыто 25 сентября при расходе $707 \text{ м}^3/\text{с}$ и конечном перепаде на банкете 2,44 м.

Проведение лабораторных исследований и измерений во время перекрытия в натуральных условиях позволило получить важную в практическом отношении информацию об устойчивости камня и кубов — наиболее распространённых отдельностей, используемых при перекрытии русел рек (табл. 1).

Не для всех случаев удалось получить соответствующее значение K_y , для некоторых оно получено несколько заниженным (непредельным), но приведённые в табл. 1 данные позволяют более обоснованно проектировать перекрытие русла с применением кубов.

Информация о перепадах на банкете при различных расходах и ширине прорана дана в табл. 2 и для сопоставления с лабораторными данными — на рис. 1.

Сопоставление натуральных и модельных данных показало, что перепады на банкете при различной

ширине прорана (рис. 1) и устойчивость как камня, так и кубов оказались достаточно близкими.

Несколько более высокие перепады 0,7 – 0,9 м достигнуты в лабораторных условиях в связи с применением более крупного однородного камня ($d = 0,36 \text{ м}$), чем тот, который использовался в натуральных условиях (рис. 3). Коэффициенты устойчивости камня на оголовке банкета оказались близкими к известным для камня на дне из таких отдельностей. Практически одинаковыми оказались и перепады на банкете, предельные по устойчивости кубов, в том числе и сбрасываемых в текущую воду.

Выводы

1. На модели масштаба 1:120 достаточно надёжно воспроизводятся основные этапы стеснения и перекрытия русла реки.

2. На основе лабораторных и натуральных данных существенно расширены возможности расчётного определения устойчивости кубов различного размера в реальных условиях перекрытия русла. Более обоснованно могут быть определены:

максимальные перепады на банкете, при которых кубы на оголовке шпоры или банкета сохраняют устойчивость;

критические перепады, при которых наброска кубов в текущую воду приведёт к их смещению за пределы банкета;

предельно возможное выдвижение банкета, при котором устойчивость камня или кубов на оголовке обеспечивается;

необходимая крупность кубов для перекрытия компактным банкетом, их количество и т.п.

3. В случаях, когда крупность отдельностей недостаточна для перекрытия прорана банкетом компактного профиля, объём отдельностей за пределами этого профиля может быть определён с помощью моделирования.

Литература

1. Гидравлические расчёты водосбросных гидротехнических сооружений: Справочное пособие. — М.: Энергоатомиздат, 1988. 623 с.

Пропуск холостых расходов через турбинный блок средне- или высоконапорной ГЭС (часть 1)

Волшаник В. В., Зуйков А. Л., доктора техн. наук,
Орехов Г. В., кандидат техн. наук, Чурин П. С., аспирант (МГСУ)

Вопросы пропуска холостых расходов через проточный тракт гидротурбины, как правило, недостроенный, ранее изучались применительно к низконапорным ГЭС. В работе рассматриваются варианты пропуска холостых расходов через турбинный блок средне- или высоконапорной гидроэлектростанции при застопоренном или снятом рабочем колесе. Показано, что рассмотренные варианты пропуска холостых расходов при средних или высоких напорах являются неприемлемыми.

Ключевые слова: холостой расход, средне- и высоконапорные ГЭС, спиральная камера, направляющий аппарат, рабочее колесо, отсасывающая труба, турбинный блок, вихревой жгут, динамика, кавитация.

Пропуск холостых расходов через проточный тракт гидротурбины, как правило, недостроенный, подробно изучен на гидравлических моделях и в натуральных условиях во время строительства ряда низконапорных ГЭС. Результаты этих исследований опубликованы в специальной литературе, подробный обзор приведен в главе 38 Справочного пособия [1]. Как следует из литературы, проблем с пропуском холостого потока через недостроенные турбинные блоки при напорах до 25 м не возникает.

Модельные исследования пропуска строительных расходов через турбинный блок при напорах от 50 до 100 м были выполнены в 1964 – 1965 гг. применительно к Братской и Асуанской ГЭС в Научно-исследовательском секторе института “Гидропроект” им. С. Я. Жука (ныне ОАО “НИИЭС”). Исследования показали, что пропуск холостых расходов через турбинный блок при таких напорах возможен при обеспечении напорного режима движения в подводящем водоводе. Для этого требуется погасить избыточную энергию потока в пределах проточного тракта на гидравлическом сопротивлении, создаваемом специальным временным напорным гасителем любой известной или специально разработанной конструкции, впоследствии демонтируемым при вводе ГЭС в постоянную эксплуатацию, а также закрыть турбинную шахту штатной крышкой гидротурбины с выполненным в ней регулируемым воздухопроводом для срыва вакуума.

Практический опыт пропуска холостых расходов через турбинные блоки при напорах 50 м и более отсутствует. Отсутствие такого опыта не является следствием несостоятельности идеи временного пропуска холостого расхода через блок гидротурбины при среднем или высоком напоре, но является результатом опасения проектировщиков высоких динамических нагрузок на облицовки и конструкции на участке от спиральной камеры до отсасывающей трубы, а также опасения интенсивной кавитации гасителя.

Авторам статьи известны результаты исследований 1964 – 1965 гг., однако, не являясь исполнителями этих исследований и не имея возможности ис-

пользовать результаты, мы сочли целесообразным посвятить статью проблеме пропуска холостых расходов через турбинные блоки средне- и высоконапорных ГЭС на основе собственного опыта изучения напорных и закрученных течений. Нам представляется, что эта тема сегодня не утратила актуальности, так как она непосредственно связана с безопасностью гидросооружений: при определенных условиях возникает возможность иметь резерв для пропуска высоких расходов в случае аварийных ситуаций.

В зависимости от строительной готовности турбинных блоков средне- и высоконапорных ГЭС может быть проанализировано несколько вариантов пропуска холостых расходов через них. В данной статье мы рассмотрим два варианта и докажем их неприемлемость для сброса холостых расходов в условиях средних и высоких напоров.

Первым неприемлемым вариантом сброса холостых расходов при средних и высоких напорах представляется полностью готовый к эксплуатации гидротурбинный блок с рабочим колесом (РК), вращающимся вхолостую либо застопоренным. Однако в режиме холостого хода гидроагрегат уходит в разгон, при этом рабочее колесо необходимо стопорить, поэтому практически рассматривается один вариант — с застопоренным РК.

При остановленном рабочем колесе пропускная способность любой РО-турбины, применяемой при средних и высоких напорах, практически равна её пропускной способности при номинальном режиме работы. Например, пропускная способность гидроагрегата Саяно-Шушенской ГЭС с турбиной РО-230/833-В-677 при номинальном режиме работы составляет $360 \text{ м}^3/\text{с}$, а при остановленном рабочем колесе немного ниже — $350 \text{ м}^3/\text{с}$. Причем известно, что при застопоренном РК его лопастная система формирует сходящий в отсасывающую трубу поток с высокой закруткой, при которой формируется так называемый вихревой жгут, являющийся источником высокой жгутовой динамики. Следует добавить, что при номинальном режиме работы гидроагрегата Саяно-Шушенской ГЭС в от-

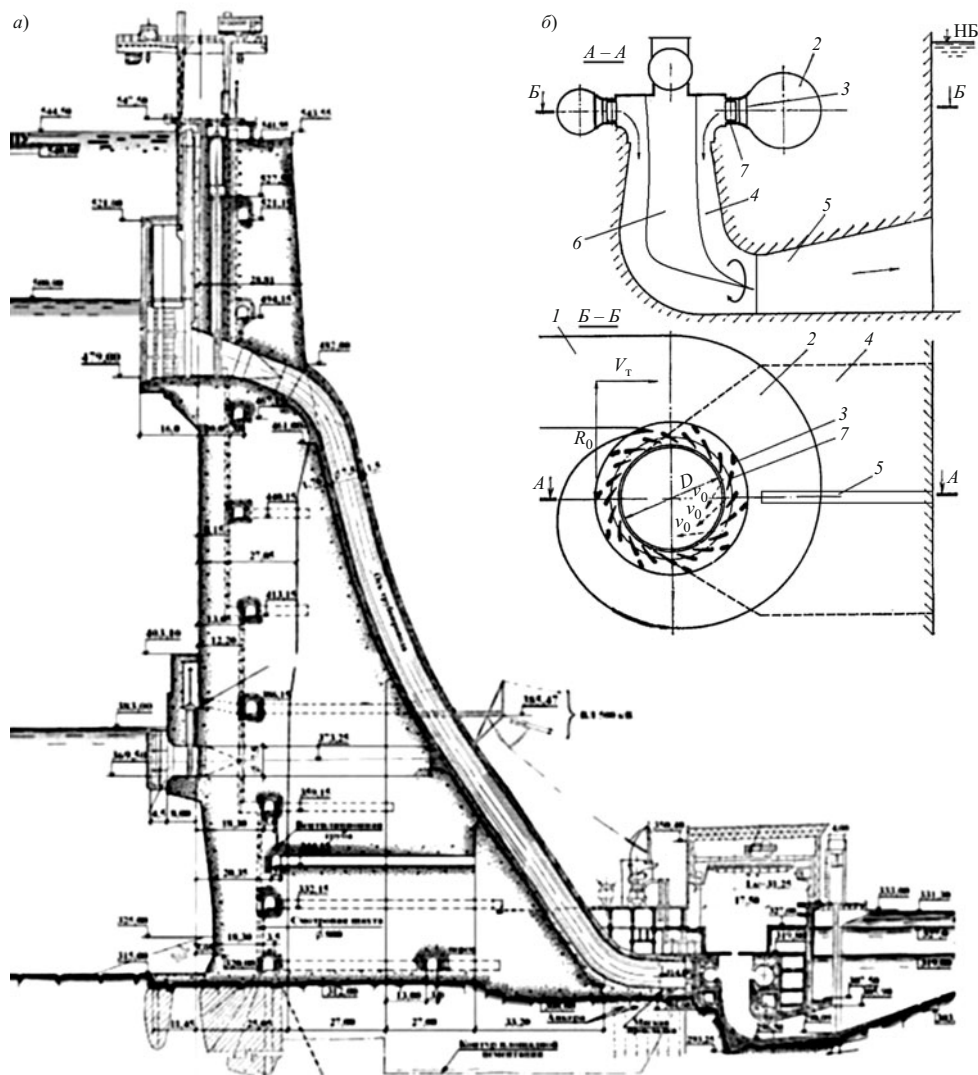


Рис. 1. Схема к расчету течения при снятом рабочем колесе: *а* — общий вид турбинного проточного тракта; *б* — расчетная схема участка в пределах спиральной камеры — отсасывающая труба; 1 — подводный водовод; 2 — спиральная камера; 3 — статорные колонны; 4 — отсасывающая труба; 5 — разделительный бычок; 6 — вихревой жгут; 7 — лопатки направляющего аппарата

сасывающей трубе рассеивается невысокая остаточная мощность порядка 65 МВт, а при застопоренной турбине в пределах отсасывающей трубы будет рассеиваться остаточная мощность до 705 МВт. Нетрудно установить, что в последнем случае плотность рассеивания энергии в отсасывающей трубе будет выше, чем на начальном участке водобойного колодца Саяно-Шушенской ГЭС. В этих условиях следует ожидать весьма высокий уровень гидродинамических воздействий на турбину и обтекаемые поверхности. Нашими исследованиями установлено [2, 4], что в зоне потери высокоскоростным закрученным потоком жгутовой устойчивости стандарт пульсаций давления на стенках достигает значения $\sigma = 0,108$. Принимая амплитуду пульсаций равной тройному стандарту, при напоре $H = 200$ м получим

$$\Delta H = \pm 3\sigma H = \pm 3 \cdot 0,108 \cdot 200 = \pm 65,0 \text{ м.}$$

Тогда при заглублении конуса отсасывающей трубы под уровень нижнего бьефа на 16 м давление у облицовок будет падать до давления парообразования в течение трети времени работы турбинного блока как холостого водосброса, т.е. облицовки будут находиться под воздействием интенсивной кавитации.

Учитывая перечисленное, а именно значительное повышение динамических и кавитационных нагрузок на лопасти турбины, направляющий аппарат, статорные колонны, облицовки спиральной камеры и отсасывающей трубы, следует считать схему пропуска холостых расходов через турбинный блок с застопоренной турбиной средне- или высоконапорной ГЭС неприемлемой.

Неприемлемой мы считаем и схему с удаленным рабочим колесом при смонтированном направляющем аппарате, регулирующем пропускаемый расход. Отличие этой схемы от предыдущей в динамико-кавитационном отношении будет лишь в по-

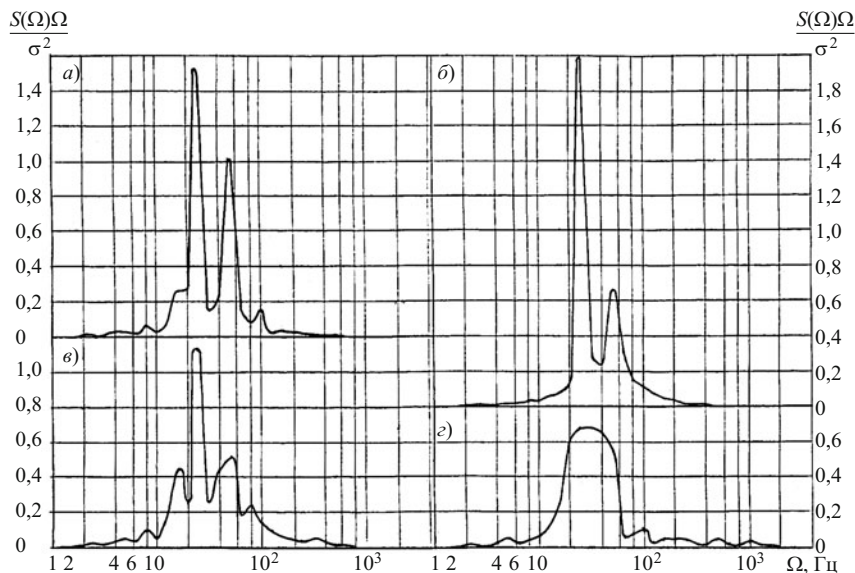


Рис. 2. Нормированные энергетические спектры пульсаций давления на стенках цилиндрической трубы при $A = 2,34$, $Q = 27,8$ л/с, $H = 7,5$ м, $P_0/\rho g H = -0,20$: а — створ на расстоянии $l = 0,067R$ от начала участка потери устойчивости жгута, стандарт пульсаций в створе составляет $\sigma = 0,046$; б — створ $0,67R$, $\sigma = 0,108$; в — створ $2,0R$, $\sigma = 0,045$; г — створ $5,0R$, $\sigma = 0,016$

вышении пропускной способности турбинного блока, а с ним остаточной мощности, которую необходимо погасить в пределах отсасывающей трубы, возрастание динамических и кавитационных нагрузок на элементы проточного тракта. Покажем это на примере Саяно-Шушенской ГЭС.

Отметим, что при описании тех или иных решений мы будем ориентироваться на Саяно-Шушенскую ГЭС, поскольку ситуация, побуждающая к необходимости или, по меньшей мере, целесообразности возвращения к проблеме пропуска холостых расходов через турбинный блок средне- или высоконапорной ГЭС при неработающем гидроагрегате, возникла вследствие катастрофы. Однако результаты работы не следует относить именно к СШГЭС, они имеют обобщающий характер и в равной степени относятся к любой средне- или высоконапорной станции.

В условиях отсутствия рабочего колеса турбинный проточный тракт работает как вихревой водосброс с завихрителем в виде направляющего аппарата гидротурбины. Гидравлический расчет такой системы выполняется в соответствии с методикой, подробно рассмотренной в [1, 2]. Общая расчетная схема турбинного водовода при снятом РК и расчетная схема течения в пределах от спиральной камеры до отсасывающей трубы приведены на рис. 1.

Расчет начинается с определения гидравлического сопротивления на участке от водоприемника до спиральной камеры. В условиях отсутствия точных данных это сопротивление вычислено приближенно по формуле

$$\Sigma\zeta = \zeta_m + \lambda \frac{L}{D},$$

где $\Sigma\zeta$ — суммарный коэффициент гидравлического сопротивления подводящего напорного тракта; ζ_m — коэффициент местных гидравлических сопротивлений в водоприемнике и поворотах трубопровода, принимается равным $\zeta_m = 0,5$; L — длина подводящего тракта, $L = 200$ м; D — диаметр водовода, $D = 6,5$ м; λ — коэффициент гидравлического сопротивления по длине по Шифринсону

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{k_3}{D} \right)^{0,25},$$

где k_3 — эквивалентная равнотерная абсолютная шероховатость, принимается равной $k_3 = 0,5$ мм — сталь умеренно заржавленная [3].

В результате получаем

$$\Sigma\zeta = \zeta_m + \lambda \frac{L}{D} = 0,5 + 0,11 \left(\frac{0,5}{6500} \right)^{0,25} \frac{200}{6,5} = 0,817.$$

При этом гидравлические потери в подводящем участке будут равны

$$h_w = \frac{\Sigma\zeta}{2g} \left(\frac{4Q}{\pi D^2} \right)^2, \quad (1)$$

где Q — пропускаемый расход; g — гравитационное ускорение, $g = 9,81$ м/с².

Пропускная способность любого локального завихрителя, которым в данном случае является направляющий аппарат гидротурбины, вычисляется в соответствии с обычной для водопропускных систем формулой

$$Q = m\pi R^2 \sqrt{2gH_0}. \quad (2)$$

где m — коэффициент расхода; H_0 — действующий напор; R — радиус входного сечения конуса отсасывающей трубы, $R = 3,125$ м.

Согласно [1, 2] при высоких напорах направляющий аппарат будет формировать в низовом участке (в конусе отсасывающей трубы) высокоскоростной закрученный поток. В этих условиях вследствие действия центробежных сил течение сопровождается образованием в приосевой зоне потока полого (газонасыщенного) вихревого жгута радиусом r_0 с давлением внутри P_0 , равным давлению насыщенных водяных паров или атмосферному (при замыкании жгута на атмосферу). Само движение жидкости при этом происходит в кольцевом сечении площадью

$$S = \pi(R^2 - r_0^2) = \omega_0 \pi R^2,$$

между ограничивающими поток твердыми стенками и поверхностью вихревого жгута, являющейся свободной поверхностью жидкости. Здесь ω_0 обозначена относительная площадь живого сечения кольцевого закрученного потока (площадь потока, отнесенная к площади трубы)

$$\omega_0 = 1 - \left(\frac{r_0}{R}\right)^2.$$

Действующий на локальном завихрителе напор в формуле (2) представляет собой разность между гидродинамическим напором непосредственно на входе в локальный завихритель и давлением на свободной поверхности жидкости, т.е. на поверхности вихревого жгута. Тогда

$$H_0 = H - h_w - \frac{p_0}{\rho g}, \quad (3)$$

где H — напор по разности отметок ВБ и направляющего аппарата, $H = 200$ м; ρ — плотность воды.

Коэффициент расхода локального завихрителя в формуле (2) согласно [1, 2] определяется аналитическим выражением

$$m = \frac{1}{\sqrt{\frac{1 + \zeta_K}{\omega_0^2} + \frac{A^2}{1 - \omega_0}}}, \quad (4)$$

где ζ_K — коэффициент сопротивления кромки, сопрягающей спиральную камеру и конус отсасывающей трубы, $\zeta_K = 0,11$ [2]; A — геометрическая характеристика закручивающего устройства (число Абрамовича [2]), равная для направляющего аппарата гидротурбины

$$A = \frac{\pi R R_{\text{л}}}{nab} \cos \beta, \quad (5)$$

где $R_{\text{л}}$ — радиус установки осей поворотных лопаток направляющего аппарата (НА), $R_{\text{л}} = 3,95$ м; β — максимальный угол открытия НА, $\beta = 39^\circ$; n , a и b — количество, открытие и высота лопаток НА, $n = 20$, $a = 570$ мм, $b = 1170$ мм.

Отсюда

$$A = \frac{\pi R R_{\text{л}}}{nab} \cos \beta = \frac{3,14 \cdot 3,125 \cdot 3,95}{20 \cdot 0,57 \cdot 1,17} \cos 39^\circ = 2,259.$$

Относительная площадь кольцевого сечения закрученного потока ω_0 связана с геометрической характеристикой завихрителя по (5) равенством [1, 2]

$$A = \frac{1 - \omega_0}{\omega_0} \sqrt{\frac{2(1 + \zeta_K)}{\omega_0}}. \quad (6)$$

При $A \geq 0,59$ равенство (6) имеет строгое решение

$$\omega_0 = \left(\sqrt[3]{\frac{A}{2\sqrt{2(1 + \zeta_K)}} + \sqrt{\frac{A^2}{8(1 + \zeta_K)} - \frac{1}{27}}} + \sqrt[3]{\frac{A}{2\sqrt{2(1 + \zeta_K)}} - \sqrt{\frac{A^2}{8(1 + \zeta_K)} - \frac{1}{27}}} \right)^{-2}.$$

Производя вычисления, получим $\omega_0 = 0,486$, и, подставляя значения A и ω_0 в (4), находим $m = 0,261$. Определив коэффициент расхода, из равенств (1), (2) и (3) находим пропускную способность всего турбинного проточного тракта в условиях отсутствия рабочего колеса

$$Q = m\pi R^2 \sqrt{\frac{2g\left(H - \frac{p_0}{\rho g}\right)}{1 + m^2 \Sigma \zeta \left(\frac{2R}{D}\right)^4}}. \quad (7)$$

Подставляя значения исходных и найденных ранее расчетных данных в равенство (7) при напоре $H = 200$ м и давлении в жгуте $P_0/\rho g = -10$ м, находим

$$Q = m\pi R^2 \sqrt{\frac{2g\left(H - \frac{p_0}{\rho g}\right)}{1 + m^2 \Sigma \zeta \left(\frac{2R}{D}\right)^4}} = 0,261 \cdot 3,14 \cdot 3,125^2 \times \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot (200 + 10)}{1 + 0,261^2 \cdot 0,817 \cdot \left(\frac{2 \cdot 3,125}{6,5}\right)^4}} = 502,2 \text{ м}^3/\text{с},$$

при этом гидравлические потери на участке до спиральной камеры согласно (1) составят

$$h_w = \frac{\Sigma \zeta}{2g} \left(\frac{4Q}{\pi D^2} \right)^2 = \frac{0,817}{2 \cdot 9,81} \left(\frac{4 \cdot 502,2}{3,14 \cdot 6,5^2} \right)^2 = 9,53 \text{ м.}$$

Таким образом, пропускная способность турбинного блока без рабочего колеса в 1,4 раза превышает расход гидроагрегата в номинальном режиме работы. Создавая эффективную закрутку, направляющий аппарат сам запирает себя подпором от действия центробежных сил. Этот подпор на выходных кромках направляющего аппарата составит

$$\begin{aligned} \frac{p}{\rho g} &= \frac{p_0}{\rho g} + (mA)^2 \frac{\omega_0}{1 - \omega_0} H_0 = \\ &= -10 + (0,261 \cdot 2,259)^2 \frac{0,486}{1 - 0,486} \times \\ &\quad \times (200 - 9,53 + 10) = 55,9 \text{ м,} \end{aligned}$$

при этом окружные скорости у стенок конуса будут равны

$$\begin{aligned} u &= mA \sqrt{2gH_0} = 0,261 \cdot 2,259 \times \\ &\quad \times \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot (200 - 9,53 + 10)} = 37,0 \text{ м/с} \end{aligned}$$

осевые скорости составят

$$v = \frac{m}{\omega_0} \sqrt{2gH_0} = 33,7 \text{ м/с,}$$

а удельная энергия потока будет иметь значение

$$\begin{aligned} E &= \frac{p_0}{\rho g} + m^2 \left(\frac{1}{\omega_0^2} + \frac{A^2}{1 - \omega_0} \right) H_0 = \\ &= -10 + 0,261^2 \left(\frac{1}{0,486^2} + \frac{2,259^2}{1 - 0,486} \right) \times \\ &\quad \times (200 - 9,53 + 10) = 183,4 \text{ м.} \end{aligned}$$

Таким образом, в конус отсасывающей трубы будет поступать закрученный поток со скоростями

$$U = \sqrt{u^2 + v^2} = \sqrt{37,0^2 + 33,7^2} = 50,0 \text{ м/с,}$$

мощностью

$$N = \rho g Q E = 1000 \cdot 9,81 \cdot 502,2 \cdot 183,4 = 903,5 \text{ МВт}$$

и имеющий вихревой жгут диаметром

$$d_0 = 2r_0 = 2R \sqrt{1 - \omega_0} = 2 \cdot 3,125 \sqrt{1 - 0,486} = 4,48 \text{ м.}$$

В условиях столь значительного рассеивания энергии потока в пределах начального участка отсасывающей трубы (до разделительного бычка) при наличии теряющей устойчивости развитого кавитационного жгута неизбежно возникновение высокой жгутовой динамики. Изучению явления жгутовой динамики посвящено значительное количество специальных работ. Жгутовая динамика характеризуется невысокой частотой и связана с процессией жгута закрученного потока, когда в динамический процесс втягиваются не отдельные небольшие массы турбулентных вихрей, а вся масса потока, при этом течение теряет устойчивость в целом. Жгутовая динамика больших водных масс представляет исключительную опасность.

Для появления жгутовой динамики необходимо, чтобы в приосевой зоне (жгуте) закрученного потока давление было существенно ниже, чем в близко расположенных створах ниже по течению. Тогда значительные массы воды из створов ниже по течению под действием отрицательного градиента давления затягиваются в полый жгут встречного закрученного потока, вступают с ним во взаимодействие, закручиваются и выбрасываются обратно. Процесс периодических “заплесков” в результате меняет структуру закрученного течения: прямолинейная ось жгута закрученного потока искривляется и начинает вращаться вокруг геометрической оси водовода с некоторой угловой частотой Ω , т.е. течение теряет осевую симметрию и устойчивость. Именно такие условия имеют место в конусе отсасывающей трубы в рассматриваемом случае. Значительный вакуум в приосевой зоне закрученного потока, выходящего в отсасывающую трубу, встречается с существенным подпором, определяемым уровнем нижнего бьефа. В результате возникает тот самый отрицательный градиент давления, приводящий в действие механизм “заплесков” с последующей жгутовой динамикой.

Возникает вопрос: какую динамику следует ожидать в конусе отсасывающей трубы и под крышкой гидротурбины? Для ответа на него мы воспользуемся нашими исследованиями процесса потери жгутовой устойчивости закрученного потока [4]. В результате этих исследований было установлено, что жгутовая динамика, связанная с потерей устойчивости закрученного течения в целом, имеет частоту вращения самого потока или той части потока, которая непосредственно примыкает к жгуту. В качестве примера приведем графики спектральной плотности пульсаций давления на стенках цилиндрической трубы в режиме потери жгутовой устойчивости закрученного потока (рис. 2). На рисунке указана гидравлическая характеристика закрученного потока $A = 2,34$ согласно [2]

$$A = \frac{\Gamma R}{2Q} = \frac{2\pi R u \cdot R}{2Q} = \frac{u\pi R^2}{Q}, \quad (8)$$

где Γ — циркуляция в окружающем вихревой жгут закрученном потоке, $\Gamma = 2\pi R u$; расход потока $Q = 27,8$ л/с; действующий напор $H = 7,5$ м; относительное давление в вихревом жгуте $P_0/\rho g H = -0,20$ (вакуум 1,5 м), радиус водовода $R = 53,5$ мм; σ — стандарты пульсаций давления в створах измерения.

Из рис. 2 следует, что при заданном режиме имеет место явно выраженная потеря устойчивости закрученного потока со жгутовой частотой в диапазоне 21 – 23 Гц. Если теперь принять высказанное выше положение, согласно которому жгутовая частота равна частоте вращения самого потока, т.е.

$$\Omega = \frac{u}{2\pi R}, \quad (9)$$

то, учитывая (8), легко видеть, что полученное в опыте значение жгутовой частоты точно совпадает с расчетной частотой вращения закрученного потока

$$\Omega = \frac{QA}{2\pi^2 R^3} = \frac{0,0278 \cdot 2,34}{2 \cdot 3,14^2 \cdot 0,0535^3} = 21,5 \text{ Гц.}$$

Отсюда можно спрогнозировать жгутовую частоту в рассматриваемом нами случае. Согласно (8) жгутовая частота при рассматриваемой схеме холостого сброса через турбинный блок в условиях отсутствия рабочего колеса составит от

$$\Omega = \frac{QA}{2\pi^2 R^3} = \frac{502,2 \cdot 2,259}{2 \cdot 3,14^2 \cdot 3,125^3} = 1,9 \text{ Гц}$$

до, по (9),

$$\Omega = \frac{u_0}{2\pi r_0} = \frac{u_0}{\pi d_0} = \frac{51,6}{3,14 \cdot 4,48} = 3,67 \text{ Гц,}$$

где u_0 — окружная скорость в потоке на границе жгута:

$$u_0 = \frac{uR}{r_0} = \frac{2uR}{d_0} = \frac{2 \cdot 37,0 \cdot 3,125}{4,48} = 51,6 \text{ м/с.}$$

Амплитуда пульсаций давления на обтекаемых поверхностях при этом, согласно экспериментально зафиксированному на рис. 2 стандарту жгутовых пульсаций $\sigma = 0,108$, достигнет уровня

$$\Delta H = \pm 3\sigma \left(H - h_w - \frac{P_0}{\rho g} \right) = 65,0 \text{ м.}$$

Определяя кавитационные условия по критерию Тома при данной схеме избежать кавитации на стенках конуса отсасывающей трубы не представляется возможным, потому что число кавитации

$$K_{\text{кав}} = \frac{p-p_0}{U^2} = \frac{2g}{U^2} \cdot \frac{p-p_0}{\rho g} = 0,517$$

ниже критического значения, равного при равномерной шероховатости $K_{\text{кр}} = 1,0$.

Таким образом, пропуск холостого расхода через турбинный проточный тракт в условиях отсутствия рабочего колеса сопровождается высокой жгутовой динамикой в отсасывающей трубе, под крышкой гидроагрегата и передающейся в спиральную камеру, а также кавитацией в конусе отсасывающей трубы, что следует считать недопустимым.

Вывод

Варианты пропуска холостого расхода через турбинный блок средне- или высоконапорной ГЭС с заторможенным рабочим колесом и при отсутствии рабочего колеса без дополнительных инженерных мероприятий являются неприемлемыми.

Список литературы

1. *Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений. Справочное пособие.* — М.: Энергоатомиздат, 1988. 624 с.
2. *Волианик В. В., Зуйков А. Л., Мордасов А. П.* Закрученные потоки в гидротехнических сооружениях. — М.: Энергоатомиздат, 1990. 280 с.
3. *Справочник по гидравлическим расчетам* / Под ред. П. Г. Киселева. — Изд. 4-е, перераб. и доп. — М.: Энергия, 1972. 312 с.
4. *Зуйков А. Л.* Водосбросная система с взаимодействующими концентрическими закрученными потоками. Дис. ... канд. техн. наук. — М.: МИСИ, 1984. 379 с.

Большие плотины и гидроэнергетика Японии

Пехтин В. А., Беллендир Е. Н., Радченко В. Г.

Дан краткий обзор строительства и реконструкции плотин в Японии, а также проблем, связанных с этим.

Ключевые слова: гидроэнергетика Японии, большие плотины, строительство, реконструкция, новые типы плотин.

В Японии в г. Киото со 2 по 8 июня 2012 г. состоялись 80-е ежегодное Собрание и 24-й Конгресс Международной комиссии по большим плотинам (ICOLD). Присутствовали более 1350 делегатов из 69 стран мира. Всего в настоящее время в Комиссии состоят 95 государств [1].

Программа мероприятий включала: заседания 21 технического комитета; симпозиум “Плотины в изменяющемся мире”; Генеральную ассамблею и Конгресс. На технической выставке были представлены достижения ведущих мировых фирм, осуществляющих проектирование, строительство и эксплуатацию гидротехнических сооружений во многих странах. Были организованы однодневные и многодневные технические туры с осмотром японских гидроузлов различного назначения с бетонными и грунтовыми плотинами разнообразной конструкции, а также туры в Китай для ознакомления с гидроузлами Три ущелья, Шуибуйя, Гехеян и в Южную Корею с посещением гидроузлов Гангджеонг и Накдонг.

Открывая Собрание президент ICOLD проф. Д. Джиа (Китай) отметил значительные достижения Комиссии за прошедшие 3 года. В частности, за отчетный период количество стран-участниц организации увеличилось на 10 и еще 4 страны готовятся к вступлению. После опубликования Декларации “Развитие водохранилищ и гидроэнергетики в Африке” подготовлена и международная конференция,

которая должна пройти в апреле 2013 г. в Эфиопии в г. Аддис-Абеба. Наряду с другими вопросами там будут обсуждать проблемы освоения 4-х основных рек континента — Нила, Конго, Замбези и Нигера. В 2010 г. на Всемирной выставке в Китае в г. Шанхайе с помощью ICOLD была организована специальная выставка во Всемирном павильоне воды. Дополнительно к активным контактам с ООН, ЮНЕСКО и Мировым банком установлены отношения взаимопомощи и поддержки с рядом родственных организаций, в том числе с Международной комиссией по ирригации и дренажу (ICID), Международной ассоциацией водных ресурсов (IWRA), Международной гидроэнергетической ассоциацией (ИНА) и др. Активное участие принимало руководство ICOLD и в мероприятиях Мирового водного форума (WWF), последняя конференция которого состоялась в марте 2012 г. во Франции в г. Марсель [2, 3, 4].

В связи со все более обостряющейся ситуацией с недостатком воды и электроэнергии в ряде стран мира, особенно в слаборазвитых и развивающихся, 5 июня 2012 г. во время проведения 24-го Конгресса ICOLD принята Всемирная декларация “Водообеспечение для устойчивого развития” [5], в которой содержится призыв ко всем странам активнее развивать мировую водно-энергетическую инфраструктуру по всем направлениям, включающим регулирование паводков, борьбу с засухами, иррига-

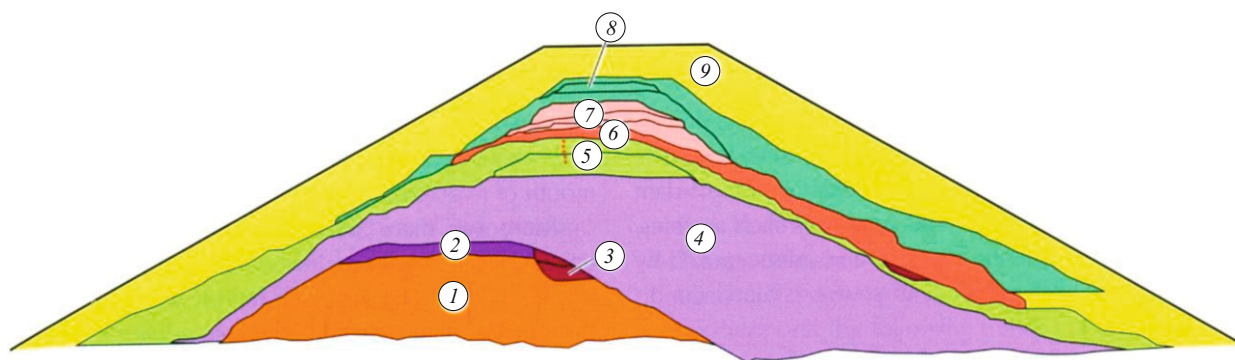


Рис. 1. Плотина Саяма. Контуры первоначального сооружения, а также при последующих ремонтах:

1 — строительство в 616 г.; 2 — ремонт в 762 г.; 3 — оползень при землетрясении 734 г.; 4 — ремонт 762 г.; 5 — ремонтные работы в 1185 – 1573 гг.; 6 — ремонт 1608 г.; 7 — ремонтные работы 1620 – 1859 гг.; 8 – 1862 – 1964 гг.; 9 – 1980 – 2000 гг.

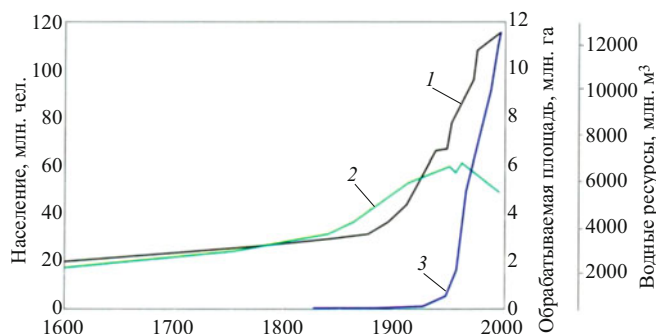


Рис. 2. Рост населения (1), обрабатываемых площадей (2), использования водных ресурсов (3) в Японии с 1600 г.

цию, производство электроэнергии, бытовое и промышленное водоснабжение, навигацию и т.д.

На заседаниях технических комитетов обсуждались основные проблемы, стоящие перед гидроэнергетикой на современном этапе и подготавливаемые к публикации нормативно-методические документы (бюллетени), разрабатываемые в комитетах. К настоящему времени выпущено более 145 нормативов по всем основным направлениям гидротехнической практики. Подготовлен к печати бюллетень “Внутренняя эрозия плотин, дамб и их оснований”, выпущена новая версия бюллетеня “Плотины и окружающая среда”, опубликован справочник по проблемам ликвидации плотин, выпущены доклады “Плотины и подача воды”, “Проектирование и эксплуатация хвостохранилищ после завершения их наращивания” и ряд других документов.

Симпозиум “Плотины в изменяющемся мире” включал следующие темы: “Влияние изменяющегося климата и польза от плотин”; “Плотины, как ответ возрастающим требованиям увеличивающегося населения планеты”; “Знания и технологии для гидротехнического строительства”; “Передовые технологии строительства плотин”; “Новые подходы для предотвращения аварийных ситуаций и управление ими”; “Землетрясения”; “Геотехнические аспекты оснований плотин”. В Трудах симпозиума по указанным выше темам опубликован 251 доклад. От России было представлено 10 докладов. На симпозиуме слово для презентации было предоставлено В. А. Прокофьеву, заведующему отделом ВНИИГа, выступившему на тему “Применение унифицированной 3-D численной модели для рас-

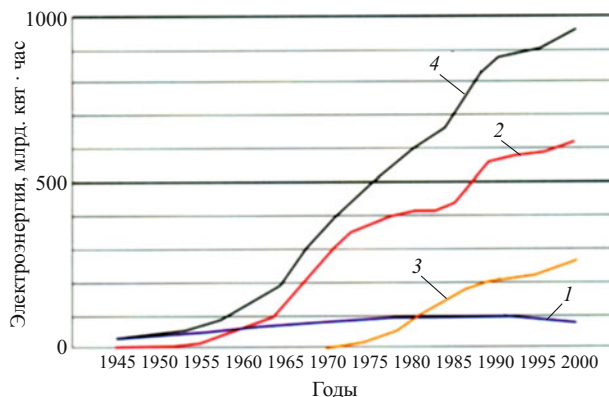


Рис. 3. Производство электрической энергии на ГЭС (1), ТЭС (2) и АЭС (3) после 1945 года. (4) — общий объем производства электрической энергии

чета ледовых и термических режимов в бьефах ГЭС” [6].

На Международном конгрессе было обсуждено 4 вопроса: “Экологически безопасные технологии строительства плотин и водохранилищ” (№ 92); “Паводковые расходы” (№ 93); “Безопасность” (№ 94); “Старение и реконструкция плотин” (№ 95). Общее количество опубликованных докладов составило 173, в том числе от России — 7. На заседаниях Конгресса выступили 79 человек. Е. Н. Беллендир, генеральный директор ВНИИГа, представил два доклада: “Водосброс № 2 Богучанской ГЭС. Необходимость строительства и особенности конструкции” и “Оценка риска аварий и ее роль в управлении безопасностью плотин на стадии проекта”. Г. З. Костыря, заведующая отделом ВНИИГа, выступила на тему “Российские бетонные плотины в районах с суровым и особо суровым климатом” [7].

На Генеральной ассамблее СИГБ (Исполкоме) на следующие 3 года избран новый президент. Им стал Адама Номбре (Буркина Фасо). Также были избраны два новых вице-президента: по региону Европы — проф. Антон Шлейз (Швейцария) и по региону Африки — проф. Геррит Басон (Южная Африка). Новый президент определил приоритеты СИГБ на новый срок, в частности активнее искать решения для адаптации к изменениям климата, катастрофическим паводкам и периодам губительных засух; продолжать укреплять и увеличивать влияние СИГБ в мире; теснее сотрудничать с дружест-

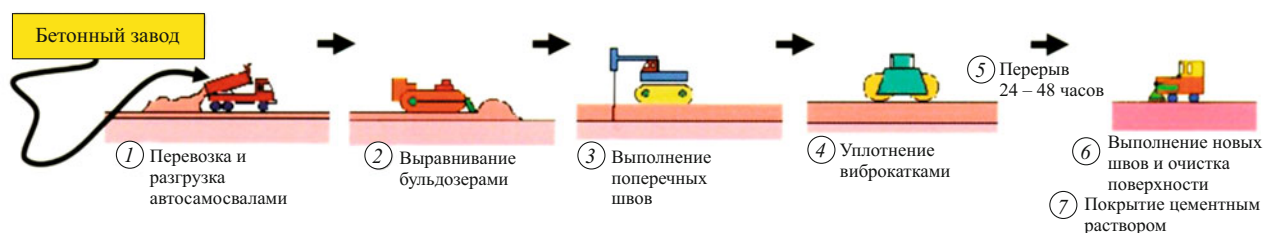


Рис. 4. Технологическая схема возведения плотин из укатанного бетона

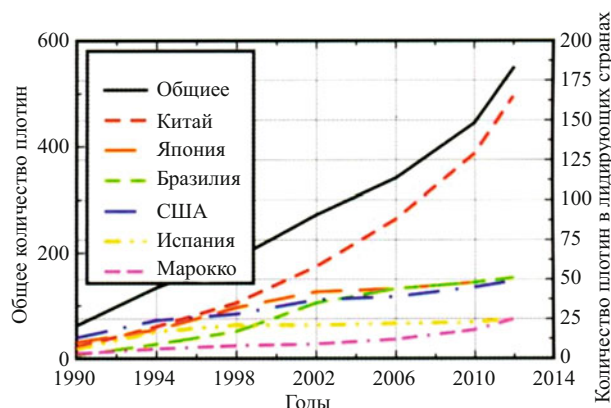


Рис. 5. Рост числа плотин из укатанного бетона по странам

венными профильными международными организациями; активнее работать с национальными комитетами всех стран, входящих в СИГБ, решая насущные проблемы водопользования и энергетики в этих странах и др. А. Номбре также остановился на деталях проведения в апреле 2013 г. конференции в Аддис-Абеба [8].

Председатель Национального комитета США по большим плотинам М. Роджерс доложил о готовности к проведению 81-го ежегодного Собрания ICOLD в США в 2013 г. На Ассамблее было подтверждено, что 82-е Собрание пройдет в 2014 г. в Индонезии на о. Бали, а в 2015 г. в Норвегии состоится 83-ье Ежегодное Собрание и 25-й Международный конгресс. Заявку на проведение ежегодных мероприятий ICOLD на 2016 г. подала Южная Африка, а на 2017 г. — Чехия.

Япония, проводившая в 2012 г. ежегодное собрание, вступила в члены ICOLD в 1931 г., спустя 3 года после образования этой международной организации, но в 1944 г. выбыла из ее состава как участница второй мировой войны, боровшаяся против стран антигитлеровской коалиции. Снова в состав организации Япония вступила в марте 1953 г. С того времени в стране проведено два ежегодных собрания Комиссии — 27-е в октябре 1960 г. и 52-е в мае 1984 г.

Япония — государство, располагающееся на островах Тихого океана, вблизи побережья Восточной Азии. В составе территории около 4 тыс. островов, протянувшихся с севера на юг на расстоянии 3,5 тыс. км. Основные из них — Хоккайдо, Хонсю, Сикоку и Кюсю. Японию омывают: на востоке — Тихий океан, на западе — Восточно-Китайское и Японское моря; на севере — Охотское море.

Площадь территории Японии — 377 997 км², количество населения (на 2010 г.) — 127,8 млн. человек. Плотность населения — одна из самых высоких в мире — 338 чел/км².

Природные условия страны определяются положением в умеренном субтропическом и тропиче-



Рис. 6. Наиболее высокая в Японии плотина из укатанного бетона Миягасае, 156 м

ском климате. 3/4 территории занимают возвышенности и горы. Всего в Японии 16 вершин, превышающих 3000 м. В средней части о. Хонсю проходит зона разломов Фосса-Магна (длиной около 250 км), над которой возвышается ряд вулканов, в том числе самый высокий — Фудзияма (3776 м). Территория страны в целом характеризуется высокой сейсмичностью. Всего в стране примерно 150 вулканов, 40 из них действующие. Разрушительные землетрясения в Японии происходили в 1855, 1891, 1897, 1923 гг. и вплоть до настоящего времени, когда в 2011 г. землетрясение Тохоку и последующее цунами разрушили АЭС Фукусима на восточном побережье Японии, вызвали большое количество человеческих жертв, разрушений и повреждений. Часто наблюдаются тайфуны и другие природные катаклизмы [9, 10].

Среднее количество осадков, выпадающих в Японии, 1690 мм/год. Общий средний ежегодный объем осадков составляет 640 км³, при этом ресурс подземных грунтовых вод — 410 км³. Потребление воды в стране в 2009 г. составило 83,1 км³, из них 19 % — бытовое потребление; 66 % — сельское хозяйство и 15 % — промышленность. Средний расход воды на 1 человека в сутки составляет 298 л.

Страна имеет густую сеть коротких полноводных преимущественно горных рек. Крупнейшие из них на о. Хонсю — Синано, Тоне, Китаками; на о. Хоккайдо — Исикари. Озера многочисленны и разнообразны по происхождению. Крупнейшее оз. Бива (площадь 716 км²) расположено в тектонической впадине. Встречаются озера вулканические (Инавасиро, Товада, Кутяро) и лагунные (Касумичаура, Самора и др.).

Технический гидропотенциал Японии равен 140 461 ГВт · ч/год, что отвечает мощности 46 214 МВт. В 2011 г. установленная мощность на ГЭС составляла 27 571 МВт. С учетом строящихся ГЭС мощностью 699 МВт можно считать, что поч-

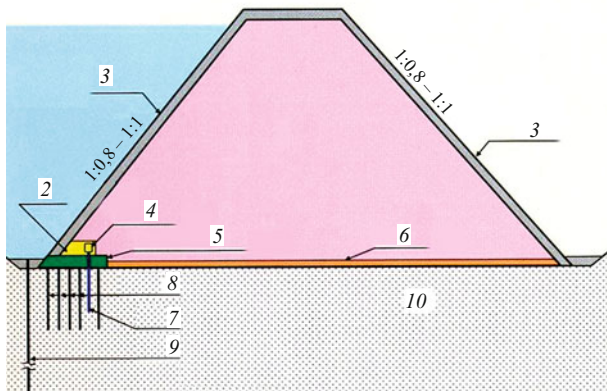


Рис. 7. Типовое поперечное сечение плотины CSG:

1 — тело плотины из смеси CSG; 2 — бетонный блок; 3 — защитный слой бетона; 4 — галерея; 5 — бетон повышенной водонепроницаемости; 6 — смесь CSG с повышенным содержанием цемента; 7 — дренаж; 8 — площадная цементация; 9 — цементационная закладка; 10 — грунт основания

ти 60 % гидропотенциала Японии уже использовано. В стране в эксплуатации находится значительное число ГАЭС общей мощностью 25 994 МВт. В настоящее время строят такие ГАЭС, как Кацунагава (1600 МВт), Каннагава (2820 МВт), Омаругава (1200 МВт) и Киококу (900 МВт).

Кроме ГЭС и ГАЭС в Японии имеется 480 малых ГЭС и 10 строят. Мощность действующих малых ГЭС — 3509 МВт с выработкой 18796 ГВт · ч/год.

Общая установленная мощность всех энергетических установок в стране в 2010 г. составляла 281 099 МВт, из которых 84,4 % принадлежало государственным компаниям и 15,6 % — частным владельцам. В национальных компаниях тепловая энергетика составляла 66,7 %, атомная — 25,1 %, гидроэнергетика — 7,4 %, геотермальная — 0,3 % и прочие — 0,3 %. В частном секторе: тепловая энергетика — 82,9 %; атомная — 11,1 %; гидроэнергия — 3 %; геотермальная — 0,1 % и прочее — 2,6 % [11, 12].

Управление всем водно-энергетическим комплексом страны весьма сложное, в настоящее время его осуществляют 4 министерства, Государственное агентство и 10 основных электроэнергетических компаний.

Администрация водных ресурсов, отвечающая за регулирование паводков, подчиняется Министерству землепользования, инфраструктуры, транспорта и туризма (MLIT), в компетенцию которого входит проектирование и строительство как ирригационных, так и многофункциональных гидроузлов, а также субсидирование проектов местных правительств. Министерство сельского, лесного и рыбного хозяйства (MAFF) строит ирригационные гидроузлы и субсидирует проекты сельхозназначения, принадлежащие правительствам



Рис. 8. Общий вид строительства плотины Тобетсу

отдельных префектур. Министерство здравоохранения, труда и социального обеспечения (MHLW) субсидирует гидротехнические проекты, осуществляемые правительствами отдельных префектур. Министерство экономики, торговли и промышленности (METI) руководит проектами по обеспечению водой промышленности и курирует деятельность электроэнергетических компаний. Японское Водное агентство (JWA) специализируется на развитии водных ресурсов в особых зонах метрополии и руководит строительством плотин по отдельному государственному плану. 10 основных электроэнергетических региональных компаний непосредственно эксплуатируют, а также строят ГЭС [12].

История строительства плотин в Японии началась с возведения грунтовых дамб как для защиты от паводков, так и для создания рисовых чеков, когда в начале нашей эры рис как основной источник питания начали производить в значительных количествах. По данным [10, 13] с 4-го по 8-й век в Японии было построено порядка 80 небольших грунтовых плотин. С того времени в рабочем состоянии сохранились только две — Саяма и Манно. Первая, высотой 8 м и длиной по гребню 900 м, построена в 616 г. в 20 км от г. Осака. В настоящее время ее высота после многочисленных реконструкций составляет 18,6 м (рис. 1). Вторая, высотой 10 м и длиной по гребню 80 м, возведена в 704 г. в 120 км от того же города. Позднее плотину перестраивали, и ее высота составляет 32 м. Кроме указанных строили плотины и меньшей высоты, которые не сохранились.

Все плотины того времени были грунтовыми, однородными, насыпными, с достаточно крутыми откосами от 1:1,0 до 1:1,5. Они имели широкий гребень, примерно равный их высоте. На некоторых плотинах устраивали специальные участки для перелива воды, на части плотин выполняли деревянные или каменные водовыпуски, расположенные у

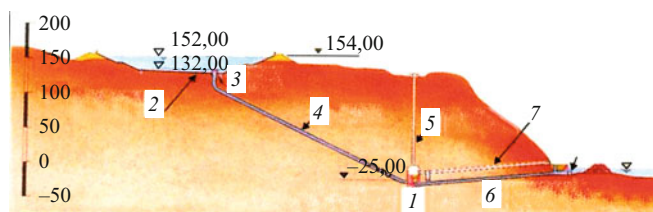


Рис. 9. Схема расположения сооружений ГАЭС Янбиру на о. Окинава:

1 — машинный зал; 2 — верхний бассейн; 3 — водозабор; 4 — турбинный водовод; 5 — шахта; 6 — отводящий туннель; 7 — строительный туннель

основания. Строительство вели с помощью местных крестьян, часто под руководством буддийских монахов, и, как правило, в короткие периоды осени — от сентября до ноября, между сезонами сбора риса. Высота плотин со временем постепенно увеличивалась и достигла 20 м к 18-му столетию. С начала 17-го века плотины строили не только для сельскохозяйственных целей, но и для подачи воды в города. Сведения о европейских методах возведения плотин стали известны в Японии только после ее посещения английским командором Метью С. Перри в 1853 г. [12, 13].

Япония стала более открытой страной с начала периода модернизации, когда в 1867 г. власть перешла к Императору после “революции Мейдзи”. Новое правительство в 1869 г. сменило название г. Эдо на Токио и перевело в него столицу страны из Киото. В 1889 г. была принята Конституция Японии, в которой были учтены положения, заимствованные из конституций европейских стран. В 1896 г. вышел Закон об использовании рек, а в 1905 г. был пересмотрен и уточнен Закон о пользовании сельскохозяйственными землями. В это время в Японию были приглашены тысячи специалистов из разных стран для обучения населения тем техническим дисциплинам и направлениям, с которыми японцы были еще не знакомы. Гражданское строительство, включавшее и строительство плотин, было одним из таких направлений.

Первую электрическую энергию на ГЭС в Японии получили в 1888 г. на установке мощностью 5 МВт. В 1900 г. была построена первая бетонная плотина Гохонматса высотой 33,3 м для снабжения водой г. Кобе. В последующем активно строили и другие плотины — бетонные и грунтовые, среди которых были гравитационная плотина Хонгочи (1903 г., $H = 18,6$ м), контрфорсная плотина Сасанагаре (1924 г., $H = 25,3$ м) и др. На рис. 2 показано, как росло население страны, увеличивались площади обрабатываемой земли и использовались водные ресурсы страны начиная с 1600 г. [13].

В период до 1945 г. было построено значительное число гидроузлов, как ирригационных, так и энергетических, с плотинами в основном средней



Рис. 10. Общий вид ГАЭС Янбиру на о. Окинава

высоты, например: ГЭС Шимотаки (31 МВт) с гравитационной плотиной, 33,9 м; Ятцузава (35 МВт) с каменно-земляной плотиной, 37,3 м; ГЭС Ои (42,9 МВт) с гравитационной плотиной, 53,4 м и др. Плотины, и грунтовые и бетонные, строили по общепринятым правилам проектирования и технологиям того времени. Отметим, что вплоть до 1960 г. объем электроэнергии, получаемый на ГЭС, превышал электроэнергию, получаемую на тепловых станциях (рис. 3) [13].

После поражения во второй Мировой войне в 1945 г. экономика Японии находилась в тяжелом положении, в частности, из-за недостатка электроэнергии и продуктов питания для населения. Для преодоления трудностей в 1950 г. был принят Закон о развитии национального землепользования. На его базе был разработан обширный план регионального развития гидроресурсов страны “Китанами”, в основу которого было положено ускоренное строительство многофункциональных гидроузлов. Этот план начали реализовывать под патронажем американских специалистов, опиравшихся в работе на программу, разработанную для Японии в США в Управлении долиной Тенесси (TVA). Кроме того, из США была осуществлена поставка в Японию большого количества современного для того времени высокопроизводительного строительного оборудования, что способствовало ускоренному возведению плотин. Первыми, построенными по этой программе гидроузлами были: Ишибучи с каменнонабросной плотиной с железобетонным экраном (1953 г., $H = 53$ м); Тасе с гравитационной плотиной (1954 г., $H = 81,5$ м); Юда также с гравитационной плотиной (1964 г., $H = 90,5$ м) и большое количество других объектов [13, 14].

Особенно интенсивное строительство гидроузлов, как ирригационных, так и многофункциональ-

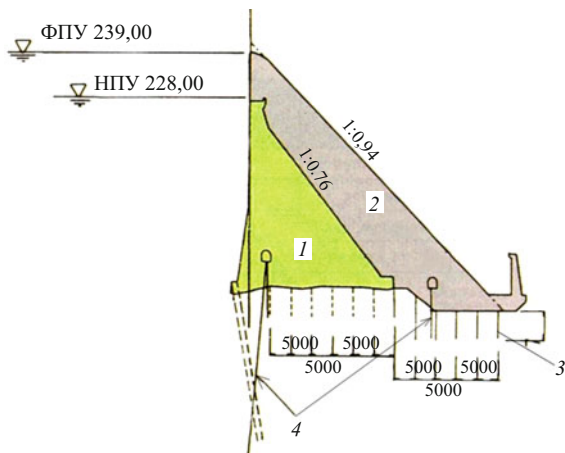


Рис. 11. Реконструкция плотины Каязе:

1 — старая плотина; 2 — новая плотина; 3 — новая площадная цементация; 4 — новая глубинная цементационная завеса

ных, имело место с 1960 по 1975 г., в период быстрого экономического развития страны, когда прирост ВВП в год достигал 10 % и более. В это время многофункциональные гидроузлы с бетонными и грунтовыми плотинами высотой 30 – 160 м строили массово. После 1975 г. строительство продолжалось, но уже не так интенсивно, как в предыдущие 15 лет. По данным [14] с 1946 по 1999 г. всего построено 650 гидроузлов с плотинами высотой до 30 м и 884 гидроузла с плотинами от 30 до 186 м.

В первое десятилетие 21-го века возвели еще 207 гидроузлов. В целом к началу 2011 г. в эксплуатации в Японии находилось 2677 больших плотин, из которых плотин из грунтовых материалов 1593 (1310 — земляные и каменно-земляные, 283 — каменнонабросные; из них 25 высотой от 100 до 176 м) и 1084 — бетонные, из них 30 от 115 м до 186 м.

В связи с быстрым послевоенным ростом экономики и возрастающей потребностью в электроэнергии примерно с 1960 г. в стране начался уско-

ренный рост тепловой энергетики, а с 1970 г. и атомной (рис. 3). Их развитие потребовало ускоренного строительства ГАЭС. В короткие сроки был построен ряд мощных ГАЭС: Окуешино (1980 г., 1206 МВт); Окавачи (1995 г., 1280 МВт); Окумино (1995 г., 1500 МВт) Окутатараги (1998 г., 1934 МВт) и др.

В ходе активного строительства плотин после 1960 г. в Японии не только воспользовались зарубежной помощью, но начали и собственные интенсивные исследования как для поиска решений ускоренного и экономически эффективного строительства новых плотин и объектов реновации, так и для инновационного развития всей водно-энергетической отрасли. В перечень направлений исследований вошли: совершенствование конструкций и технологий возведения бетонных и грунтовых плотин совместно с созданием комплексов новых строительных машин и механизмов; разработка конструкций и технологий строительных работ для разных типов плотин при их реконструкции и наращивании по высоте; разработка специальных конструкций, в том числе и туннельного типа для пропуска наносов через гидроузлы, водохранилища которых подвергаются заилению, при этом не только для вновь строящихся плотин, но и уже построенных; разработка мер по повышению сейсмостойкости всех видов водоподпорных сооружений, а также мер, направленных против деструктивного влияния старения на бетонные и грунтовые плотины. В программу исследований вошла также разработка усовершенствованных конструкций рыбоходов, специальных мероприятий по обеспечению требований к качеству воды в водохранилищах и многое другое.

Для реализации конкретных направлений программы исследований в 1974 г. в Министерстве строительства Японии был создан Комитет по экономичному строительству бетонных плотин с зада-

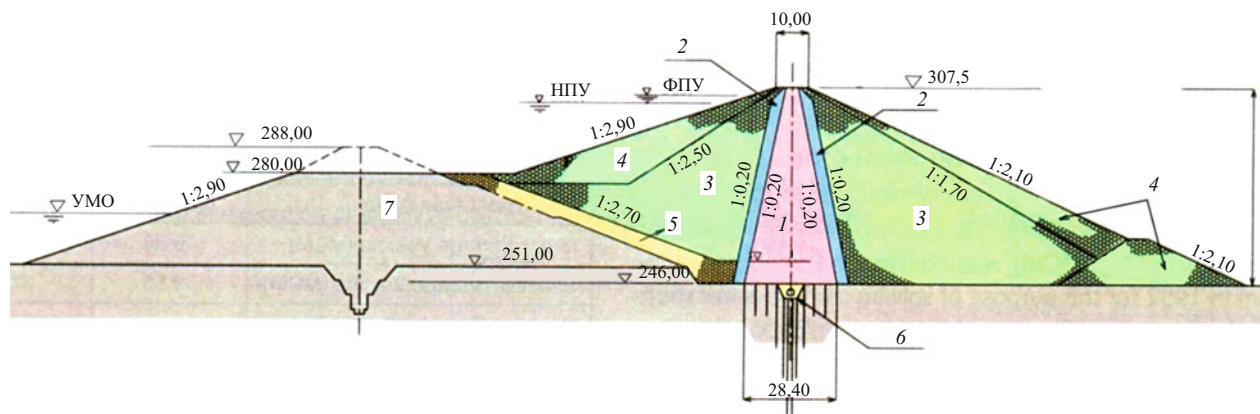


Рис. 12. Реконструкция плотины Саннокаки:

1 — глинистое ядро; 2 — фильтр; 3 — каменная наброска, зона III; 4 — каменная наброска, зона IV; 5 — переходная зона; 6 — зуб с галерей; 7 — старая плотина

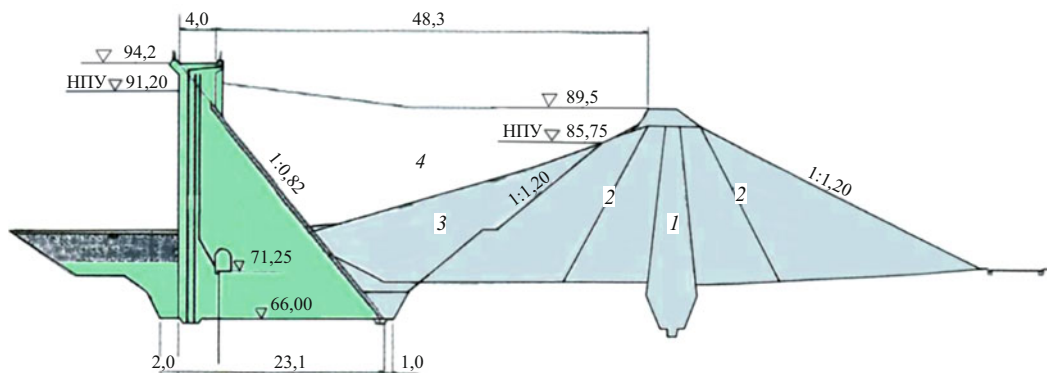


Рис. 13. Реконструкция плотины Хонгочи:

1 — глинистое ядро старой плотины; 2 — упорные призмы; 3 — защита откоса; 4 — обратная засыпка; 5 — новая бетонная плотина; 6 — дренажная скважина

чей проведения исследований и разработки метода, который позволил бы ускорить строительство, снизить стоимость и повысить надежность сооружений [15]. В результате деятельности этого комитета к 1978 г. был разработан способ возведения бетонных плотин зонированного типа, в которых внутреннюю зону предлагалось укладывать тонкими слоями из жесткой бетонной смеси с уплотнением виброкатками, но не в ограниченных по размеру блоках, а по всей площади плотины. Внешние грани плотины со стороны верхнего и нижнего бьефов и на контакте с основанием должны были быть выполнены из высококачественного бетона. Отметим, что ко времени разработки в Японии указанного выше способа уже были известны как идея, так и примеры строительства бетонных плотин укладкой жесткой бетонной смеси тонкими слоями на значительной по площади поверхности с уплотнением укаткой вместо применения вибраторов. Такой опыт был получен в СССР (1957 г., плотина Бухтарминской ГЭС, $H = 90$ м) и в Италии (1961 г., плотина Альпе Джера, $H = 174$ м) [16, 17]. Но в Японии не ограничились использованием лишь отдельных составляющих новой идеи, а подробно разработали не только конструкцию плотины, но полностью и технологию ее возведения. Для этого после 1974 г. провели масштабные исследования, включавшие весь комплекс вопросов, от подбора составов жесткой малоцементной смеси, изучения свойств полученного бетона, выбора толщины слоев, разработки всей технологической цепочки производства работ и методов контроля качества бетона до разработки конструкций специальных установок и машин, необходимых для строительства этого типа плотин, куда вошли бетонные заводы заданной производительности, транспортные средства и способы перемещения бетонной смеси, виброкатки, виброустановки для нарезки швов в бетоне и многое другое.

Строительство первой в Японии бетонной плотины, возводимой по новой технологии (Шимаджи-

гава, $H = 89$ м), было начато в 1978 г., а в 1979 г. начали возведение второй такой же плотины (Охкава, $H = 75$ м). После окончания строительства обеих плотин в 1980 г. новый метод был утвержден в Министерстве строительства Японии и рекомендован как наиболее эффективный и основанный на применении, в том числе, высокопроизводительной техники. На базе полученного опыта в Японии разработано руководство АСТ-116 по строительству плотин из укатанного бетона [18].

В настоящее время после ряда внесенных уточнений основными составляющими японского метода являются: транспортировка малоцементной с низкой влажностью бетонной смеси от бетонного завода к месту разгрузки; последовательная укладка и разравнивание 3–4 слоев смеси слоями по 15–25 см; нарезка поперечных швов в слое общей толщиной до 1,0 м; уплотнение полученного слоя до заданной плотности виброкатками; выдерживание уложенного бетона в течение 24–28 ч для обеспечения схватывания; дополнительная нарезка швов и очистка поверхности бетона; покрытие бетона цементным раствором перед укладкой следующего слоя. Последовательность названных выше этапов представлена на рис. 4.

После 1980 г. строительство плотин из укатанного бетона стало быстро развиваться во многих странах (рис. 5). Только в Китае к 2010 г. построено 165 плотин, в том числе и самая высокая в мире — Лонгтан (217 м). В Японии из 50 плотин наиболее высокой является Миягасае (156 м, рис. 6) [19].

В области строительства грунтовых плотин в Японии на протяжении длительного времени основные усилия направлены на повышение производительности труда путем применения более производительной отечественной строительной техники для погрузки, перевозки, укладки и уплотнения грунтов. К настоящему времени емкость ковшей погрузчиков увеличилась до $10,3 \text{ м}^3$, емкость кузовов автосамосвалов — до 45 м^3 , а их грузоподъем-



Рис. 14. Разработка и вывоз наносов из водохранилища гидроузла Макио

ность — до 90 т. Разработаны и опробованы автосамосвалы с емкостью кузова 68 м^3 и грузоподъемностью 138 т. Производительность при укладке глинистых грунтов и грунтов фильтров достигла 100 тыс. $\text{м}^3/\text{мес}$, а каменной наброски — 400 тыс. $\text{м}^3/\text{мес}$ [20].

Значительно улучшило организацию работ на строительных площадках гидротехнических сооружений Японии практически повсеместное применение приборов системы GPS (приборов спутниковой навигации, дающих возможность определять местоположение и скорость перемещения объектов), позволившее за счет оборудования парка строительных машин этими приборами обеспечить руководителей производства и операторов машин непрерывной информацией, существенно повысившей эффективность всего рабочего процесса и общую безопасность на строительстве.

Заметным событием в строительстве грунтовых плотин явилось внедрение нового их типа, представляющего собой конструкцию трапецеидального профиля, возводимую слоями из жесткой грунтоцементной смеси с виброуплотнением (рис. 7). Смесь состоит из цемента (С), песка (S), гравия (G) и воды (отчего плотина получила название “CSG”). Количество цемента — не более $80 \text{ кг}/\text{м}^3$, вода — в пределах $100 - 140 \text{ кг}/\text{м}^3$. Толщина слоя при разравнивании — 25 см. Укатку виброкатком осуществляют одновременно для трех уже уложенных слоев, при общей толщине 75 см. К настоящему времени кроме большого количества вспомогательных сооружений построены две плотины CSG — Тобетсу (52,4 м) (рис. 8) и Окукуби (39 м). Среди нескольких строящихся одна высотой 95 м. Несколько плотин в стадии проектирования.

Преимущество нового типа плотин выразилось в более быстром их возведении, большей экономичности и надежности по сравнению с традици-

онными типами за счет более простого и дешевого способа получения исходных грунтовых материалов, без сортировки, промывки и пр.; несложного приготовления смеси в смесительной установке; укладки слоями с виброуплотнением; отсутствия, кроме бортовых примыканий, поперечных швов из-за низкой экзотермии смеси и др. Новая конструкция оказалась и более надежной, так как в ней практически отсутствуют растягивающие напряжения и обеспечены необходимые параметры по прочности, устойчивости, фильтрационной прочности и т.д. [21 – 24].

В Японии на о. Окинава завершают строительство первой в мире ГАЭС Янбиру, работающей на океанской воде. Нижним бассейном служит отгороженный дамбой небольшой участок поверхности воды у береговой линии, а верхний бассейн расположен выше на склоне горы. Напор составляет 136 м, расход — $26 \text{ м}^3/\text{с}$, мощность ГАЭС — 30 МВт. Диаметр подводящего туннельного водовода — 2,4 м, длина — 314 м. Диаметр отводящего туннеля — 2,7 м, длина — 317 м (рис. 9, 10).

ГАЭС, подобные Янбиру, обладают определенными преимуществами. Это, в первую очередь, экономия средств на строительстве нижнего бассейна и возможность размещать сооружения ГАЭС там, где это наиболее удобно с позиций приближения к нужным промышленным объектам. Но имеется и ряд нерешенных до конца проблем: воздействие различных находящихся в морской воде организмов на состояние проточного тракта ГАЭС; высокая степень коррозии металлических деталей оборудования, стабильность работы водоприемников и водовыпусков при сильном волнении в океане; влияние протечек морской воды в грунты основания верхнего бассейна, а также на флору и фауну в районе бассейна. Полагаем, что опыт, полученный при эксплуатации ГАЭС Янбиру, может оказаться востребованным и в других странах.

С начала 1990х гг. в стране произошли определенные изменения в приоритетах по отношению к строительству плотин. Если до конца 80-х практически повсеместно строили новые сооружения, то в течение двух последних десятилетий больше стали уделять внимания ремонту и реконструкции уже построенных. Случилось это прежде всего потому, что стоимость нового строительства становится все дороже, а ущерб окружающей среде от новой плотины больше, чем от реконструкции уже существующей. В связи с этим, в условиях наличия большого числа старых плотин, серьезной тенденцией стала их реновация.

Для начала ремонта или реконструкции плотин могут быть разные причины — износ и старение материалов самого тела плотины, выход из строя гидромеханического оборудования, недостаточная

пропускная способность водосбросов или недостаточный объем воды в водохранилище.

При наличии большого числа плотин, построенных еще до 1940 г., в стране в настоящее время значительное число таких гидроузлов подверглись реконструкции. По данным [14] реновационные мероприятия проводили путем наращивания бетонных и грунтовых плотин по высоте с целью реконструкции водозаборных и водосбросных сооружений, увеличения их пропускной способности, организации пропуска наносов заиливающих водохранилищ, ремонта в связи с проблемами старения, для повышения сейсмостойкости плотин и т.д. В целом количество отремонтированных и реконструированных плотин насчитывается десятками [13, 14].

Технические решения при реконструкции плотин, в том числе при их наращивании по высоте, могут быть самые разные, но основным для бетонных плотин все же является увеличение высоты за счет расширения тела плотины (Каязе, рис. 11), а для грунтовых — либо строительство новой плотины рядом со старой (Саннокаи, рис. 12), либо возведение более высокой плотины со стороны верхнего бьефа, и не всегда грунтовой (Хонгочи, рис. 13).

Серьезной проблемой для Японии является заиливание водохранилищ, что связано с природными условиями страны — короткими горными реками с большим падением, значительными атмосферными осадками, частыми землетрясениями. В период паводков реки несут большое количество наносов, которые оседают в водохранилищах. Объем наносов в целом по стране очень значительный и измеряется в зависимости от параметров отдельных рек многими миллионами кубических метров. Наносы осложняют эксплуатацию гидротехнических сооружений, загрязняя воду, уменьшая объем водохранилищ и выработку электроэнергии, ухудшая состояние окружающей среды.

Для борьбы с заиливанием водохранилищ используют в основном два метода: механическую уборку осадков и сброс через створ плотины вниз по течению, используя транспортирующую способность потока воды во время паводков. Механическую уборку с помощью экскаваторов и автосамосвалов применяют в основном в верховьях водохранилищ в периоды, когда поверхность ложа водохранилищ освобождается от воды (рис. 14). Наносы, которые там разрабатывают, стараются осаждать в этой зоне водохранилищ с помощью специальных перехватывающих эти наносы невысоких плотин и дамб, имеющих пролеты для пропуска воды.

Второй способ — это скоординированный пропуск наносов по каскаду гидроузлов через каждую плотину во время паводка, при этом используется

снижение уровней воды в водохранилищах. Перемещение наносов осуществляется мощным придонным потоком, размывающим наносы и несущим их в бьеф расположенного ниже гидроузла через специальные туннели, которые в новых сооружениях строят заранее, а в старых выполняют в ходе реконструкции. Таким примером может служить каскад из 6-ти гидроузлов на р. Куробе. При водосбросной площади 660 км² и общей длине 85 км суммарный годовой объем переносимых по каскаду наносов составляет 1,4 млн. м³ [13, 14].

Еще один способ пропуска наносов через плотину можно продемонстрировать на примере гидроузла Мива, где наносы в период паводка пропускают не через плотину, а с помощью обводного туннеля сечением 50 м² и длиной 4300 м, проходящего в скальном массиве левого берега долины [13, 14].

В области надежности гидротехнических сооружений заслуживают внимания технические решения, повышающие сейсмостойкость как бетонных, так и грунтовых плотин, а также методы их ремонта в случае, если плотины подверглись землетрясению. Разработан и комплекс мер по ремонту плотин, имеющих признаки старения. В вопросах защиты окружающей среды выделяются как конструктивные решения по устройству селективных водозаборов, так и методы их строительства, включающие, кроме возводимых по новым проектам, выполнение специальных туннельных водопропускных отверстий в уже эксплуатирующихся плотинах. Представляют интерес усовершенствованные конструкции рыбоходов и мероприятия по борьбе с загрязнением воды в водохранилищах и ее эвтрофикацией, направленные на обеспечение качества воды, требуемого по нормативам.

Выводы

При наличии 2677 больших плотин, продолжаемемся строительстве новых и реконструкции уже построенных сооружений в Японии создан водноэнергетический комплекс, являющийся одной из важнейших составляющих экономики, полностью обеспечивающий функционирование таких сфер как сельское хозяйство, гражданское и промышленное водоснабжение, энергетика и т.д.

Отличает гидротехническую отрасль Японии высокое качество строительства и эксплуатации ГТС, эффективная система организации и проведения научно-исследовательских работ, осуществлявшихся в том числе и с государственной поддержкой, позволивших внедрить в практику строительства новые типы плотин, современные методы ремонта и реконструкции, систему борьбы с заиливанием водохранилищ и ряд других передовых решений. Ориентирами на будущее в системе вод-

ного хозяйства и гидроэнергетики заявлено надежное, экономичное и более эффективное строительство ГЭС с минимальным ущербом для окружающей среды.

Список литературы

1. *80-th Annual Meeting*. 24th ICOLD Congress. Final Bulletin. ICOLD. 2012. 117 p.
2. *Jinsheng Jia* (ICOLD President). Joint efforts for better development of dams and reservoirs // *The Int. Journal on Hydro Power & Dams*. 2012. Vol. 19. Issue 4. Pp. 27 – 32.
3. *Chandra Madramootoo*. Mitigating global disasters: what role can the water institutions play? *World Atlas & Industry Guide // The Int. Journal on HydroPower & Dams*. 2011. p. 11.
4. *Jun Xia*. Perspective on a sustainable water future through IWRM. *World Atlas & Industry Guide // The Int. Journal on HydroPower & Dams*. 2011. p. 12 – 13.
5. *World Declaration*. Water Storage for Sustainable Development. ICOLD, ICID, IHA, IWRA. Approved on 5-th June 2012. Kyoto. Japan.
6. *ICOLD Annual Meeting report // The Int. Journal on HydroPower & Dams*. 2012. Vol. 19. Issue 4. pp. 24 – 26.
7. *24-th Congress of the International Commission on Large Dams (Report) // The Int. Journal on HydroPower & Dams*. 2012. Vol. 19. Issue 4. pp. 93 – 105.
8. *Adama Nombre*. Building on ICOLD's strengths, and facing future challenges // *The Int. Journal on HydroPower & Dams*. 2012. Vol. 19. Is. 4. pp. 33 – 34.
9. *Япония*. Большая Советская Энциклопедия. 1978. сс. 517 – 546.
10. *T. Hamaguchi*. An overview of dams in Japan // *The Int. Journal on Hydro Power & Dams*. 2012. Vol. 19. Issue 3. pp. 53 – 57.
11. *Japan*. 2011. *World Atlas & Industry Guide*. pp. 135 – 136.
12. *Y. Yoshizu*. Hydropower development in Japan. *The Int. Journal on Hydro Power & Dams*. 2012. Vol. 19. Issue 3. pp. 94 – 97.
13. *History of Dams*. Current activities on Dams in Japan. Effective Utilization of Existing Dams. JCOLD. 2006. pp. 2 – 10.
14. *Role of dams in Japan*. Current activities on Dams in Japan. Special Issue on Dam Renovation JCOLD. 2009. pp. 2 – 3.
15. *M. Mizuno*. The historical development of concrete dams in Japan // *The Int. Journal on Hydro Power & Dams*. 2012. Vol. 19. Issue 3. pp. 80 – 84.
16. *Ерахтин Б. М.* Новая технология производства бетонных работ на строительстве Бухтарминской ГЭС // *Энергетическое строительство*. 1958. № 6. С. 39 – 42.
17. *Судаков В. Б., Толкачев Л. А.* Современные методы бетонирования высоких плотин. — М.: Энергоатомиздат, 1988. 255 с.
18. *S. Nagataki, T. Fujisawa, H. Kawasaki*. State of art of RCD dams in Japan. *Anais do 50 Congresso Brasileiro do Concreto. CBC 2008 — RCC Symposium*. 20 p.
19. *M. R. H. Dunstan*. New developments in RCC dams // *The Int. Journal on HydroPower & Dams*. 2012. Vol. 19. Issue 5. pp. 50 – 55.
20. *N. Matsumoto*. The development of embankment dam engineering in Japan // *The Int. Journal on Hydro Power & Dams*. 2012. Vol. 19. Issue 3. pp. 68 – 79.
21. *T. Fujisawa, T. Sasaki*. Development of the trapezoidal CSG dam // *The Int. Journal on HydroPower & Dams*. 2012. Vol. 19. Is. 3. pp. 58 – 63.
22. *Hokkaido Prefecture*. Toubetsu dam: an example of the innovative CSG technology // *The Int. Journal on HydroPower & Dams*. 2012. Vol. 19. Is. 3. pp. 64 – 67.
23. *Trapezoidal CSG dam*. Japan Dam Engineering Center. 2012. 10 p.
24. *Mixing devices for CSG method*. Information guide. Japan Dam Foundation. 2012. 10 p.

Новости гидроэнергетики и гидротехники

Строительство Богучанской ГЭС

25 февраля 2013 г. Енисейское управление Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору выдало ОАО “Богучанская ГЭС” заключение о соответствии первого этапа строительства Богучанской ГЭС требованиям технических регламентов и проектной документации. Это означает, что строительство объекта велось с соблюдением всех современных норм и правил по технической и экологической безопасности. Заключение выдано по результатам проверок, проводившихся Ростехнадзором в декабре 2012 г. и феврале 2013 г. На основании заключения Енисейского управления Ростехнадзора администрация Кежемского района Красноярского края выдала ОАО “Богучанская ГЭС” разрешение на ввод в эксплуатацию объектов первого этапа строительства гидроэлектростанции. Полученное разрешение позволяет ОАО “Богучанская ГЭС” провести ее регистрацию в Федеральной службе государственной регистрации, кадастра и картографии (Росреестр). Для получения разрешения на ввод в промышленную эксплуатацию всей ГЭС будет необходимо получить заключения Ростехнадзора по семи этапам строительства гидроэлектростанции.

В первой декаде марта 2013 г. Богучанская ГЭС выдала в сеть первый миллиард киловатт-часов электроэнергии. Оборудование работало в штатном режиме, без каких-либо сбоев. В ноябре 2012 г. в режиме пусконаладочных работ гидроэлектростанция выработала 175 млн. кВт·ч. С 1 декабря 2012 г. Богучанская ГЭС начала работать в режиме промышленной эксплуатации. В декабре гидроэлектростанция поставила на ОРЭМ 244 млн. кВт·ч электроэнергии, в январе 2013 г. – 286 млн. кВт·ч, в феврале – 243 млн. кВт·ч.

На Богучанской ГЭС продолжают строиться и монтажные работы. Из 34 секций бетонной плотины до проектной отметки 214,0 м остается возвести всего одну глухую секцию № 30. На ступенчатом водосбросе № 2 завершается укладка бетона в последний блок. Ведется подготовка к бетонированию последнего из пяти временных донных отверстий, перекрытых с началом наполнения Богучанского водохранилища. Завершены строительные работы на последней, девятой агрегатной секции машинного зала. Выполнено остекление окон, утепление стен и кровли, установлены электриче-

ские обогреватели. После того как температура поднимется выше нуля, девятая секция станет частью единого пространства машинного зала. Всего в течение марта уложено 2841 м³ бетона, смонтировано 480 м³ сборного железобетона.

ГА № 5 и 6 подготовлены к проведению пусконаладочных работ, которые начнутся после получения разрешения от Ростехнадзора. Готовность ГА № 7 составляет 90 %. Идет подготовка к важному этапу монтажных работ – провороту вала гидроагрегата. Наиболее интенсивные работы ведутся на ГА № 8. На монтажной площадке начата сборка ротора генератора; в кратере агрегата все готово к сборке статора, которая начнется после завершения испытаний магнитопровода. На монтажной площадке уже ведется укрупнительная сборка крышки турбины, опоры подпятника и регулирующего кольца агрегата № 9.

Строительство Нижнебурейской ГЭС

На Нижнебурейской ГЭС завершены работы по сооружению противофильтрационного элемента перемычек котлована – “стены в грунте”. Все проектные скважины в количестве 1187 штук пробурены и заполнены специальной смесью. Проведенные работы позволят обеспечить водонепроницаемость перемычек и приступить к осушению котлована основных сооружений. В настоящее время ведется проверка качества выполненных работ. При необходимости будут пробурены дополнительные скважины для обеспечения полной водонепроницаемости. Уже свернуты два из пяти буровых комплексов. В связи с завершением устройства “стены в грунте” производится переоборудование бетонного завода с изготовления глинобетона на производство бетона.

Параллельно ведется сборка насосов и трубопровода, предназначенного для откачки воды из котлована. Осушение котлована запланировано на май – начало июня 2013 г.

Строительство Загорской ГАЭС-2

В рамках мероприятий по подготовке Загорской ГАЭС-2 к испытаниям завершена разборка земляной перемычки нижнего бассейна. Работы проведены с опережением установленного графика, что обусловлено благоприятными погодными условия-

ми. В марте установилась морозная погода, что способствовало ускорению работ по выемке грунта.

В период разборки перемычки и ведения работ по углублению бассейна ежедневно работало около 100 единиц специализированной строительной техники, в том числе 20 бульдозеров. Извлекалось 30 тыс. м³ грунта в сутки. Общий объем вывезенного грунта превышает 250 тыс. м³. Этот грунт использовался для отсыпки откосов дамбы верхнего бассейна. Параллельно строители укрепляют дно бассейна гравием, а также ликвидируют ледяные торосы. Расколотый лед вывозится выше по течению.

На текущий момент строительная готовность Загорской ГАЭС-2 составляет более 90 %. В декабре 2012 г. проведены испытания вспомогательного и генерирующего оборудования первого пускового комплекса. Ввод первой очереди гидроаккумулирующей электростанции будет происходить по мере сдачи в эксплуатацию ОАО “ФСК ЕЭС” двухцепной линии электропередачи 500 кВ “Загорская ГАЭС – Ярцево 1” и “Загорская ГАЭС – Ярцево 2” в рамках договора технологического присоединения. Работа задерживается из-за нерешенности ОАО “ФСК ЕЭС” вопросов по землеотводу.

Строительство Зеленчукской ГЭС-ГАЭС

Строительная готовность Зеленчукской ГЭС-ГАЭС превысила 20 %. В 2012 г. работы были сконцентрированы на водоводе верхнего бьефа и нижнем бассейне станции. Завершен основной объем работ по сооружению деривационного и напорного туннелей, а также вертикальной шахты. Смонтировано верхнее колено – участок водовода, на котором происходит переход напорного туннеля в вертикальную шахту. Закончены бетонные работы по строительству уравнильного резервуара высотой более 40 м, ведется монтаж его металлоконструкций. Продолжается сооружение железобетонного трубопровода длиной 423 м и диаметром 5 м.

На строительстве нижнего бассейна выполнено более половины работ по выемке грунта, ведется бетонирование подпорных стен общей длиной 1700 м. Произведен вынос из зоны строительства водопровода, канализационного трубопровода и линии электропередачи.

На заводе-изготовителе проведены успешные испытания модели обратимой гидротурбины Зеленчукской ГЭС-ГАЭС, подтвердившие ее проектные параметры. Принято решение об изменении конструкции турбинных водоводов, соединяющих здание ГЭС-ГАЭС и нижний бассейн. По этому решению водоводы будут пересекать р. Кубань не по мостовому переходу, а по дну реки.

ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева

В ОАО “ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева” разрабатывается универсальный диагностический комплекс для управления безопасностью и надежностью гидротехнических сооружений (УДК УБиН). Комплекс создается как средство автоматизации мониторинга всех гидротехнических сооружений (ГТС) холдинга “РусГидро”. Такой глобальный мониторинг, а также управление безопасностью и надежностью ГТС будет осуществлять Аналитический центр (АЦ) ОАО “РусГидро”. К основным автоматизируемым процессам относятся: оперативная диагностика и комплексная оценка состояния ГТС, оценка риска аварий, декларирование безопасности, планирование мероприятий по повышению безопасности и надежности.

Диагностический комплекс будет состоять из средств мониторинга и диагностики, расположенных на гидроузле. К ним относятся различные средства измерений, автоматизированные системы опроса и диагностического контроля и др. На этом уровне будут происходить прием данных со всех сооружений в автоматическом режиме и размещение их в специальных информационных моделях гидроузлов. Эти информационные модели входят в состав диагностического комплекса и расположены на серверах АЦ. Унифицируются состав информации, способы её обработки и предоставления, что создаёт возможность дальнейшей обработки и совместного анализа данных.

На следующем уровне с помощью специального программного обеспечения специалистами АЦ и отраслевых НИИ будет выполняться комплексная оценка состояния ГТС. Для этого будут использоваться собранная на первом этапе информация, результаты испытаний материалов и обследований сооружений, результаты математического моделирования. Будут выполняться анализ рисков, оценка вероятностей и последствий возможных инцидентов и выявление причин, которые могут к ним привести. Полученные данные будут накапливаться в системе в структурированном виде и служить в дальнейшем для оперативной оценки текущей ситуации, совершенствования контроля и ретроспективного анализа.

Заключительный уровень системы будет позволять ранжировать имеющиеся дефекты в контексте всех ГТС холдинга по уровню безопасности, анализировать эффективность различных вариантов технических воздействий и на этой основе проводить планирование мероприятий по устранению дефектов.

К настоящему времени разработана техническая концепция УДК УБиН и реализован пилотный проект для Чиркейского гидроузла. Чиркейская

ГЭС была выбрана в качестве испытательной площадки, поскольку представляет собой крупный гидроузел, оснащенный широким спектром контрольно-измерительной аппаратуры и информационно-диагностической системой. Все это позволило отработать основные программно-технические решения УДК УБиН и апробировать их в полевых условиях.

Модернизация Камской ГЭС

В филиале ОАО «РусГидро» – «Камская ГЭС» в рамках программы комплексной модернизации заменена половина гидромеханического оборудования. Реализация проекта началась в 2007 г. К настоящему времени на станции заменено 11 затворов водослива, 10 турбинных затворов, 13 сороудерживающих решеток, установлены новые крышки водослива над двумя гидроагрегатами.

Работы по реконструкции гидромеханического оборудования Камской ГЭС отличаются повышенной сложностью, обусловленной уникальной кон-

струкцией сооружения. Компоновка станции такова, что гидроагрегаты располагаются непосредственно в теле плотины, а крыша машинного зала одновременно является водосливом.

Вместе с реконструкцией затворов выполняется реконструкция пазов затворов. Новые материалы, применяемые при реконструкции, позволяют существенно повысить надёжность конструкции. Новое оборудование может эксплуатироваться при низких температурах. В конструкциях широко применяется коррозионностойкая сталь. Узлы скольжения выполнены из полимеров, обладающих низкой способностью к впитыванию влаги, что сводит к минимуму вероятность заклинивания затворов и решёток в пазах.

Проект реконструкции рассчитан до 2023 г. Всего будет установлено 23 комплекта нового оборудования по числу гидроагрегатов. Столь масштабная замена выполняется впервые с момента пуска станции в 1954 г.

*Материалы подготовлены пресс-службой ОАО «РусГидро»:
Слива И., Скрацук В., Коренюк И., Бутусова А., Воронова Д., Мишина М.*

Памяти Константина Дмитриевича Пердикиса

16 февраля 2013 г. ушел из жизни один из известных гидроэнергетиков СССР, участник второй мировой войны и греческого движения сопротивления против фашизма Константин Дмитриевич Пердикис.

К. Д. Пердикис родился 14 апреля 1929 г. в рабочей семье, в греческом городе Салоники. После оккупации Греции фашистской Германией Константин Дмитриевич был вынужден прекратить учебу на втором курсе торгового училища, и с 12 лет он стал работать. С 14 лет с 1943 по 1945 г. радистом участвовал в вооруженном сопротивлении греческого народа немецким оккупантам. В 1947 – 1949 гг. – участник гражданской войны греческого народа против реакционного режима “черных” полковников, дважды был тяжело ранен. С 1949 по 1990 г. – политэмигрант в СССР. В 1950 – 1953 гг. К. Д. Пердикис учился, окончил Объединенное военное училище и был направлен на учебу в ТИИИМСХ, который закончил в 1959 г. С 1959 по 1973 г. работал в Среднеазиатском отделении института “Гидропроект” в ОРП на строительстве Нурекской ГЭС инженером, старшим инженером, руководителем группы сооружений подземного комплекса, начальником объединенного ОРП. К. Д. Пердикис работал с известными



ми гидротехниками: главным инженером проекта Нурекской ГЭС П. П. Листровым, главным инженером института С. А. Боровцом.

С 1973 г. К. Д. Пердикис работал в Таджикглавэнерго заместителем директора Нурекской ГЭС по капитальному строительству (1973 – 1976) и директором Рогунской ГЭС (1976 – 1990). Под его руководством была проделана большая подготовительная работа перед возобновлением вводов последующих

гидроагрегатов Нурекской ГЭС с постоянными рабочими колесами. Он был одним из первых руководителей нового строительства в Таджикской ССР – Рогунской ГЭС, им были подписаны в производство первая партия проектно-сметной документации по гидроэлектростанции.

К. Д. Пердикис был талантливым инженером и высококвалифицированным проектировщиком, умным и обаятельным человеком. Жизненный путь Константина Дмитриевича – пример верного служения своей родине Греции и второй родине – Советскому Союзу.

Светлая память о Константине Дмитриевиче Пердикисе навсегда сохранится в сердцах его коллег, соратников и друзей.

Сдано в набор 20.03.2013. Подписано в печать 17.04.2013. Формат 60×84 1/8.

Печать офсетная. Печ. л. 9,0. Цена свободная

Оригинал-макет выполнен в издательстве “Фолиум”
127238, Москва, Дмитровское ш. 58, тел/факс (495) 482-5590, 482-5544

Internet: <http://www.folium.ru>, **E-mail:** info@folium.ru

Отпечатано в типографии издательства “Фолиум”

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСИ СТАТЬИ

Статью в редакцию журнала “Гидротехническое строительство” можно направить по адресу: 109044, г. Москва, Воронцовский переулок, дом 2, стр. 1. ЗАО НТФ «Энергопрогресс» или по E-mail: gts1930@yandex.ru

Статья должна отвечать следующим требованиям.

1. Статью необходимо сопроводить письмом с указанием *сведений об авторах* (фамилия, имя и отчество полностью, место работы, ученая степень и должность, служебный и домашний адреса, номера домашнего и служебного телефонов), *краткой аннотацией*.

2. Принимаются к рассмотрению: статьи, напечатанные *на машинке* (на одной стороне листа через два интервала с полями 3 – 4 см), в двух экземплярах или один экземпляр распечатки статьи, набранной *на компьютере* (шрифт не менее 14 пт с полуторным межстрочным интервалом), плюс электронная версия статьи на диске (3,5" или CD) или по E-mail.

3. *Рисунки* представляются отдельно в двух экземплярах, их нельзя вклеивать в текст. В тексте (на полях) приводятся лишь ссылки на номера рисунков. Следует учитывать, что при печати рисунки уменьшаются, поэтому детали их не должны быть мелкими, однако размер каждого рисунка не должен превышать 200 × 290 мм.

Все *чертежи* выполняются в соответствии с действующими стандартами, аккуратно и четко. *Графики* должны быть выполнены в координатах в единицах измерения СИ (обязательных). Графики или кривые зависимости, если их на рисунке несколько, а также отдельные детали на чертежах, узлы и линии на схемах следует обозначать цифрами (позициями) или буквенными обозначениями. Сокращение слов не допускается.

Фотоснимки с четким контрастным изображением и хорошо проработанными деталями представляются в двух экземплярах, на одном из которых не должно быть никаких надписей и позиций.

4. *Формулы* должны быть четко написаны в отдельные строки (а не в текст). При этом прописные (большие) буквы подчеркиваются двумя черточками снизу, а строчные (маленькие) – двумя черточками сверху. Греческие буквы обводятся красным карандашом, латинские – синим. Индексы пишутся ниже строки, показатели степени – выше. На полях рукописи делаются пометки, поясняющие, какие буквы являются русскими, какие – латинскими, делается разметка букв [на полях или рядом пишется слово “буква” О, З, Ч, I (латинская), П, Ш, У в отличие от цифр 0, 3, 4, I, II Ш, V] в типах оборудования и других случаях. Если формулы набраны на компьютере, но их элементы имеют двойное прочтение, они должны быть размечены так же, как и при написании вручную.

5. *Таблицы* не должны быть громоздкими, все наименования необходимо писать без сокращения слов (за исключением единиц измерения). Численные значения величин в таблицах и в тексте должны быть в единицах измерения СИ (обязательных).

6. Статья должна завершаться *конкретными выводами*, в которых в лаконичной форме (по пунктам) излагаются результаты работы и предложения автора, вытекающие из изложенного материала.

7. *Список литературы* приводится в конце статьи. Он составляется в порядке последовательности ссылок в тексте. Ссылки на литературу в тексте заключаются в квадратные скобки. В списке указывается:

а) для *журнальных статей* – фамилия и инициалы всех авторов, название статьи, журнала, год издания, номер журнала (том);

б) для *книг* – фамилия и инициалы всех авторов, название книги, издательства, год издания;

в) для *сборников и продолжающихся изданий* – фамилия и инициалы всех авторов конкретной статьи, ее название, название сборника или издания, город, издательство, год, выпуск;

г) для *других видов изданий* перечисляются идентичные библиографические данные.

В список литературы не должны включаться неопубликованные материалы, материалы служебного пользования, а также мало распространенные издания и материалы, отпечатанные литографическим или подобным ему способом.

Технические требования к электронной версии статьи. Текст статьи должен быть набран на PC-совместимом компьютере (не Mac) с использованием базовых шрифтов Windows. Рисунки необходимо выполнить в форматах EPS, CDR, BMP, TIFF или JPEG и предоставить отдельными файлами (нельзя заверстывать рисунки в текст статьи). Сканирование графических рисунков нужно производить с разрешением 600 dpi, а фотоснимков, представляемых в электронном виде, – с разрешением не менее 300 dpi.

СПРАВКА

(предоставляется в редакцию каждым автором/соавтором статьи)

В соответствии с Законом Российской Федерации об авторских правах, сообщаю, что я, _____

автор (соавтор) статьи _____

уведомлён об ответственности за использование в статье таких материалов, защищённых авторским правом, как цитаты, воспроизведённые данные, иллюстрации и иные материалы, и о том, что ответственность за нарушение авторских прав ложится на автора статьи.

Я сообщаю, что данная статья не опубликована и не представлена для опубликования в другие периодические издания.

В связи с тем, что издательство “Springer” издаёт новый журнал на английском языке “Power Technology and Engineering”, статьи для которого будут отбираться из журналов “Электрические станции” и “Гидротехническое строительство”, я подтверждаю передачу прав издательству “Springer” на перевод статьи на английский язык и опубликование в печатном и электронном виде названной статьи в журнале “Power Technology and Engineering”, а также распространение её во всех странах мира в случае, если статья будет выбрана для печати в этом издании, и сообщаю, что такая передача указанных прав не нарушает авторских прав других лиц и организаций.

Подпись автора _____ « ____ » _____ 201_ г.

Ф.И.О. _____

Адрес _____

Место работы _____

Тел. _____

Факс _____

E-mail, который может быть размещён в свободном доступе на сайте журнала для общения читателя с автором статьи _____

E-mail для переписки с редакцией _____