

Стефаненко Николай Иванович



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ
ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА
АРОЧНО-ГРАВИТАЦИОННОЙ ПЛОТИНЫ
САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС

25.00.32 – «Геодезия»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Карпик Александр Петрович.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Каленицкий Анатолий Иванович;
кандидат технических наук, доцент
Щербаков Владимир Васильевич.

Ведущая организация – ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»
(г. Санкт-Петербург).

Защита состоится 28 июня 2010 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.251.02 при Сибирской государственной геодезической академии (СГГА) по адресу: 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, д. 10, СГГА, ауд. 403.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГГА.

Автореферат разослан 27 мая 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Середович В.А.

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.
Формат 60 × 84 1/16. Печать цифровая
Усл. печ. л. 1,22. Уч.-изд. л. 0,99. Тираж 100 экз.
Заказ

Редакционно-издательский отдел СГГА
630108, Новосибирск, Плеханова, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГГА
630108, Новосибирск, Плеханова, 8.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Арочно-гравитационная плотина Саяно-Шушенской ГЭС (СШГЭС) возведена в суровых климатических условиях на многоводной реке Енисей. Имеет высоту 242 м, длину по гребню – 1 074 м, ширину по гребню и основанию 25 м и 106 м соответственно. Полная емкость водохранилища составляет 31,3 км³, в том числе полезная – 15,3 км³. Нарушение устойчивости гидротехнических сооружений такого класса, как СШГЭС, создающих водохранилища больших объемов, может привести к катастрофическим последствиям, соизмеримым со стихийным бедствием. Обеспечение эксплуатационной надежности таких плотин является исключительно важной научно-технической, экономической и социальной проблемой.

Геодезические измерения являются сегодня необходимой и одной из основных частей натурных наблюдений, так как непосредственно дают информацию о пространственных перемещениях системы «плотина – основание» под действием нагрузок и воздействий, о деформации береговых массивов, вмещающих гидротехническое сооружение, а также информацию о влиянии техногенных факторов в случае проведения ремонтных работ. Высотные и плановые смещения бетонной плотины относятся к основным диагностическим параметрам, связанным с критериями безопасности сооружения. Именно поэтому работы по совершенствованию геодезической системы мониторинга ГЭС, исследование методов измерений, их модернизация позволяют решить проблему получения корректной информации о состоянии объекта контроля и в целом обеспечить эксплуатационную надежность Саяно-Шушенской плотины.

Научную базу в области развития средств и методов геодезических измерений на сооружениях составляют теоретические исследования, методические и технические разработки отечественных ученых: Большакова В.Д., Васютинского И.Ю., Гуляева В.П., Жукова Б.Н., Карлсона А.А., Левчука Г.П., Уставича Г.А. и многих других. Значительный вклад в решение проблем по обеспечению безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений (ГТС) СШГЭС в части создания специализированного структурного подразделения по мониторингу за ГТС (лаборатории гидротехнических сооружений), организации натурных наблюдений, организации ремонтных работ и контролю их проведения внес доктор технических наук, генеральный директор СШГЭС с 1977 по 2001 г. Брызгалов В.И.

Цель работы заключалась в проведении исследований и совершенствовании геодезического измерительного комплекса средств и методов натурных наблюдений за вертикальными и горизонтальными перемещениями арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС.

В соответствии с поставленной целью решены следующие основные задачи:

- проведены исследования средств и методов геодезических наблюдений, разработанные проектной организацией на строительно-эксплуатационный период;
- установлено, что проектные методы измерения горизонтальных и вертикальных перемещений, а именно: по сети вытянутых треугольников (СВТ);

передачи отметок между горизонтами плотины посредством проволочных элеваторов высот; измерения длин линий мерным жезлом, рабочее тело которого изготовлено из инвара; измерения уровней бьефов, ненадежны и не обеспечивают требуемую точность;

- выполнено усовершенствование проектных средств и методов измерений за горизонтальными и вертикальными перемещениями плотины;
- усовершенствована методика оценки необратимой составляющей смещений системы «плотина – основание» по данным геодезических измерений;
- реализована автоматизированная оперативная геодезическая система контроля состояния плотины на основе прямых и обратных отвесов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- реализована автоматизированная система измерения уровней бьефов с использованием лазерных дальномерных рулеток типа Disto-pro;
- реализована система передачи отметок между отдельными горизонтами и на гребень плотины с использованием высокоточной дальномерной насадки Di 2002;
- для наблюдения за деформациями берегов плотины разработан мерный геодезический трехметровый жезл, изготовленный из углепластикового материала с минимальным коэффициентом линейного расширения;
- предложена методика оценки необратимых составляющих перемещений и углов наклона Саяно-Шушенской плотины.

Научная значимость работы заключается во внесении вклада в геодезическую науку в части использования современных технологий для мониторинга арочно-гравитационных плотин, критичных к значительным планово-высотным деформациям.

Практическая значимость работы. Результаты выполненных в работе исследований, проведенные совершенствования проектного геодезического измерительного комплекса и методик измерений позволили повысить качество мониторинга Саяно-Шушенской плотины и в целом повысить надежность ее эксплуатации.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты выполненных разработок внедрены и используются для повышения качества мониторинга системы «плотина – основание» Саяно-Шушенской ГЭС.

Апробация работы.

Основные положения и результаты работы представлены в виде докладов и сообщений:

- на семинарах «Организация надзора за безопасностью ГТС» в 2004–2007 гг. (на базе Саяно-Шушенского филиала СФУ);
- на Международных научных конгрессах «ГЕО-Сибирь-2005», «ГЕО-Сибирь-2009», «ГЕО-Сибирь-2010», г. Новосибирск, СГГА;
- на совещании экспертов по ГТС (5–6 июня 2006 г.), г. Москва, НИИЭС;
- на Международных симпозиумах и конгрессах по Большим Плотинам (ICOLD-CIGB), г. Санкт-Петербург, 2007 г.; г. София, Болгария, 2008 г.; г. Бразилиа, Бразилия, 2009 г.;

- на совместном заседании Бюро НТС ОАО «РусГидро» и секции ГТС НП «НТС ЕЭС» 24 ноября 2009 г.;
- на IV Всероссийском совещании гидроэнергетиков 25–27 февраля 2010 г.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 12 научных статей, из них одна – в издательстве из перечня рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, списка литературы, включающего 64 наименования. Диссертация содержит 128 страниц текста, 46 рисунков, 10 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе дан анализ существующих методов натурных наблюдений за состоянием бетонных плотин. Отмечается, что большую роль в изучении проблем, связанных с исследованиями состояния арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС, внесли отечественные ученые: Брызгалов В.И., Бронштейн В.Б., Вульфович Н.А., Гордон Л.А., Газиев Э.Г., Дурчева В.Н., Епифанов А.П., Марчук А.Н., Храпков А.А. и многие другие.

Показано, что геодезические методы натурных наблюдений являются составной частью общего измерительного комплекса по наблюдению за сооружениями, основное место которого долгое время занимали тензометрические методы контроля. Однако, тензометрические датчики, устанавливаемые в бетон в период строительства, имеют ряд существенных недостатков, а именно – ограниченный срок надежной эксплуатации, невозможность их метрологической аттестации и, как следствие, правильной оценки результатов измерений. В этом случае достоверность вычисляемых деформаций может искажаться, корректировка результатов невозможна из-за отсутствия доступа к заложенной в бетон аппаратуре и методик определения их метрологических характеристик, в силу чего возникла сложная научно-техническая проблема в получении надежной первичной измерительной информации о состоянии сооружения, ее обработке и последующем диагностировании.

Контроль перемещений сооружения с применением современных геодезических методов и средств измерений свободен от этих недостатков, контролируемые параметры измеряются непосредственно, технические средства измерений поверяются, погрешность измерений поддается достоверной количественной оценке, поэтому высотные и плановые смещения плотины относятся к основным диагностическим параметрам, на основе которых разрабатываются критерии безопасной эксплуатации сооружения.

Для определения горизонтальных перемещений в основном создаются инженерные комплексы, включающие внешнюю и внутреннюю измерительные сети. Внешняя сеть создается для изучения перемещений прилегающей к гидроузлу поверхности, определения смещений гребня плотины и т. д. Внутренняя сеть включает определяемые пункты в галереях плотины. Особое распространение внутренние сети получили после создания профессором Муравьевым М.С. сухого обратного отвеса. Отвесы являются простым и надежным средством измерения относительных горизонтальных перемещений, они обеспечива-

ют довольно высокую точность определения смещений (0,2–0,7 мм). Цикл измерений непродолжителен, из-за простоты снятия отсчетов не требуется высокая квалификация персонала. Вопросы связи сетей в настоящее время недостаточно проработаны.

Выполненный автором анализ существующих средств и методов геодезических наблюдений за состоянием бетонных плотин позволил определить основные направления по исследованию проектного измерительного комплекса и пути его совершенствования.

Во второй главе показаны проведенные с участием автора исследования геодезического измерительного комплекса, используемого на СШГЭС в строительно-эксплуатационный период, основой которых послужили программы натурных наблюдений за деформациями основных гидротехнических сооружений геодезическими методами, разработанные Ленинградским отделением Гидропроекта имени С.Я. Жука в 1975–1987 гг.

Было установлено, что методы измерения смещений, передачи отметок между горизонтами плотины посредством элеваторов высот, измерения длин линий мерным жезлом, рабочее тело которого изготовлено из инвара, измерения уровней бьефов, определения смещения пят арок в консольном направлении створно-оптическим методом, недостаточно надежны и не обеспечивают требуемую точность.

Так, в строительно-эксплуатационный период, при определении плановых смещений плотины и берегов на горизонтах 344, 413 и 467 м, выявлено, что получаемые по СВТ смещения существенно отличались от смещений, полученных по другой измерительной системе, состоящей из прямых и обратных отвесов. Сущность метода заключается в том, что он представляет полигонометрический ход с косвенным определением углов поворота, где непосредственно измеряются высоты h и длины малых сторон s (рисунок 1). Углы поворота вычислялись по тригонометрическим формулам. Длины малых сторон в начальный период измерялись трехметровым инварным жезлом, позднее определялись по изменению стрелы провеса. Измерения высот производились зенит-прибором, изготовленным на основе нивелира НА-1.

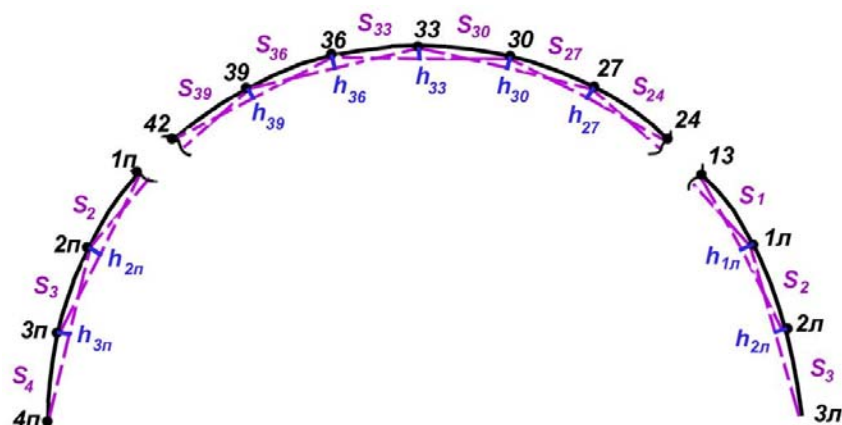


Рисунок 1 – Схема сети вытянутых треугольников:

h – высоты вытянутых треугольников; S – длины малых сторон;

30 – марки вершин СВТ

Анализ многолетних наблюдений выявил определенную закономерность, которая не совпадала с изменением гидростатической нагрузки и имела сезонный характер. Максимальные «смещения» в нижний бьеф наблюдались в мае-июле, в верхний бьеф – в декабре-феврале. Проведенные исследования показали влияние на положение струны воздушных потоков, образующихся в галереях плотины, на основании чего было принято решение о невозможности применения струнных систем в качестве измерителей горизонтальных смещений без существенной доработки, требующей значительных материальных затрат.

Связь марок, расположенных на гребне плотины, и марок продольных гидростатических нивелиров с внешней опорной сетью осуществляется через элеваторы высот. При анализе осадок, получаемых из продольных гидростатических нивелиров, расположенных в теле плотины, были выявлены резкие изменения отметок отдельных ее горизонтов, причиной которых послужили скачкообразные изменения длин высотных элеваторов. В 1993 г. в период с 10.06 по 29.07 в секции 55 между горизонтами плотины в отметках с 467 по 542 м зафиксировано изменение длины элеватора на 3,52 мм. В секции 18 между горизонтами с 344 по 413 м в период с 02.06.93 по 28.07.94 гг. изменение длины составило 3,26 мм и т. д. Было установлено, что скачкообразное изменение длин элеваторов совпадает со временем проведения работ по их компарированию, монтажных работ в помещениях отвесов и, возможно, связано с механическим повреждением струн при опускании груза в трубу отвеса. Проведение работ по компарированию проектных элеваторов высот было затруднено еще и тем, что в этом случае возникала необходимость демонтажа первичных измерительных преобразователей системы автоматизированного контроля плановых смещений (САК ПС), размещенных в тех же трубах «прямых» отвесов. Совместное размещение двух измерительных систем (прямых отвесов и элеваторов высот) в одной защитной трубе является явным недостатком проекта размещения геодезической КИА на СШГЭС.

В левобережной галерее № 3 на отметке 344 м были установлены марки для определения смещения пят арок в консольном направлении створно-оптическим методом. В забое штольни установлен опорный знак трубчатого типа, а на расстоянии 24 и 48 м и по обеим сторонам от контакта «скала – бетон» – боковые штриховые марки. Створное направление задавалось наведением на первую штриховую марку. Наблюдения данным методом проводились около года. Анализ результатов измерений показал неэффективность данной методики измерений в галереях плотины. Ошибки, вызванные боковой рефракцией (как на Братской, Усть-Илимской и других ГЭС), превосходили возможные величины смещений, поэтому от данного метода определения смещения пят арок пришлось отказаться.

В арочном направлении смещение пят арок определялось методом непосредственных линейных измерений по сферическим маркам, заложенным в бетон и скалу на высоте около одного метра от пола галереи. Для измерения длин отрезков использовался трехметровый инварный жезл. Жезл имеет основу в виде тонкостенной дюралевой трубы диаметром 34 мм, внутри трубы уложен измерительный стержень, изготовленный из инвара. Для уменьшения стрелы провеса стержень укладывается на подкладки из пенопласта. С одного конца жезл имеет

глухую контактную пятую из твердого сплава, с другого – оборудован индикатором часового типа с ценой деления 0,01 мм. Контроль длины жезла проверяется на компараторе, рабочей мерой которого являются кварцевые трубки. Анализ данных наблюдений показал значительное влияние температуры на точность измерений и необходимость ослабления данного источника погрешностей.

В проекте СШГЭС предусматривались две системы измерения уровней бьефов: пневмогидравлическая система измерения и уровнемеры типа ДСУ-1М с сельсинной передачей измеренной информации. Пневмогидравлическая система из-за низкого качества строительно-монтажных работ оказалась неработоспособной, поэтому основным измерительным средством до 2000 г. являлись уровнемеры типа ДСУ-1М. Пределы измерений уровня сельсинном-приемником составляют от 1,25 до 20 м. Измерители подобной конструкции применялись на СШГЭС продолжительное время, но из-за частых сбоев, связанных с износом механических частей прибора, неравномерной намотки троса на барабан и сброса витков, залипания поплавка в трубе и т. д. потребовалась их существенная доработка.

Проведенные исследования показали, что для получения корректной и объективной информации о состоянии ГТС проектный геодезический измерительный комплекс требует существенной доработки.

В третьей главе приводятся результаты совершенствования средств и методов геодезических наблюдений за состоянием ГТС СШГЭС.

Современный геодезический измерительный комплекс включает внешние и внутренние измерительные сети. Внешняя сеть состоит из опорных и рабочих планово-высотных знаков. Опорная высотная сеть состоит из кустов фундаментальных реперов, плановая сеть – из знаков трубчатого типа. Обе сети выбраны так, чтобы их пункты находились вне зоны возможных деформаций, что подтверждается результатами регулярных контрольных измерений. Смещения гребня плотины и оценка стабильности исходной внешней сети выполняются методом трилатерации (рисунок 2).

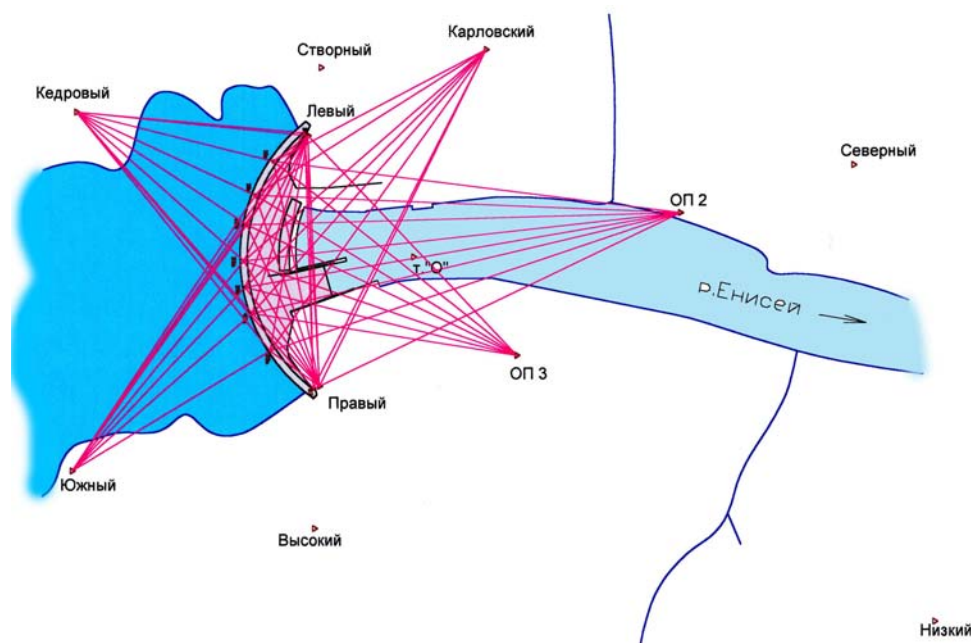


Рисунок 2 – Определения смещений гребня плотины

Эффективность использования данного метода наблюдений была достигнута за счет применения современных высокоточных дальномеров типа DI 2002 и тахеометра ТС 2003 в качестве основных средств измерений, что позволило повысить точность и сократить время измерений в цикле почти в 2 раза. Полевые измерения смещения гребня плотины относительно внешней опорной сети не превышают одной рабочей смены.

Передача отметок от кустов фундаментальных реперов, расположенных в нижнем бьефе СШГЭС, на плотину – трудоемкая и долговременная процедура. Осадки реперов, расположенных в приплотинной зоне, при изменении уровня в водохранилище от уровня «мертвого» объема (УМО) до нормального подпорного уровня (НПУ) оцениваются в 4–6 мм и с 1992 г. характер и диапазон этих изменений практически не менялся. Была разработана зависимость вертикальных перемещений марок гидростатических нивелиров, расположенных в забое скального массива на отметке 344 м (марка гидростатического нивелира левая (МГН 7л), марка гидростатического нивелира правая (МГН 8п)), от изменения уровня верхнего бьефа (УВБ):

$$\text{МГН 7л} = [346,8557 - 0,000116 \times (\text{УВБ} - 500)] \text{ м};$$

$$\text{МГН 8п} = [346,8922 - 0,000114 \times (\text{УВБ} - 500)] \text{ м}.$$

Марки, расположенные в забое штолен, используются в качестве исходных реперов высотной внутренней сети плотины, и в случае упругой деформации скального основания их отметки хорошо прогнозируются с помощью выше приведенной аналитической зависимости. Оценка стабильности внутренних исходных высотных марок проверяется регулярными циклами нивелирования от кустов фундаментальных реперов. Предложенная методика использования конечных марок гидростатического нивелира как опорных точек (между циклами гидротехнического нивелирования) позволила значительно быстрее и точнее получать информацию о вертикальных перемещениях отдельных секций, горизонтов и столбов плотины.

Разработана новая методика и изготовлены приспособления для передачи отметок между горизонтами плотины и на гребень, взамен неэффективной проектной системы, состоящей из проволочных элеваторов. Для передачи отметок используются высокоточные светодальнометры DI 2002, позволяющие измерять расстояния до 100 метров с точностью $\pm 0,2$ мм. Опыт эксплуатации системы с 2002 г. показал ее надежность, высокую точность и оперативность передачи отметок между горизонтами плотины и на гребень (рисунок 3).

Разработано и изготовлено средство измерения длин отрезков для определения деформаций бетона плотины и береговых штолен. Жезл изготовлен из полый углепластиковой трубы диаметром 25 мм и толщиной стенки 2 мм. По результатам проведенных исследований коэффициент линейного расширения углепластикового жезла составил $0,0075 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Ошибка рабочей длины жезла, определенная на кварцевом компараторе, изготовленном экспедицией № 7 Ленгидропроекта и расположенном в специальном помещении внутри плотины, где поддерживается постоянная температура $+16 \text{ } ^\circ\text{C}$, составила $\pm 0,008$ мм.

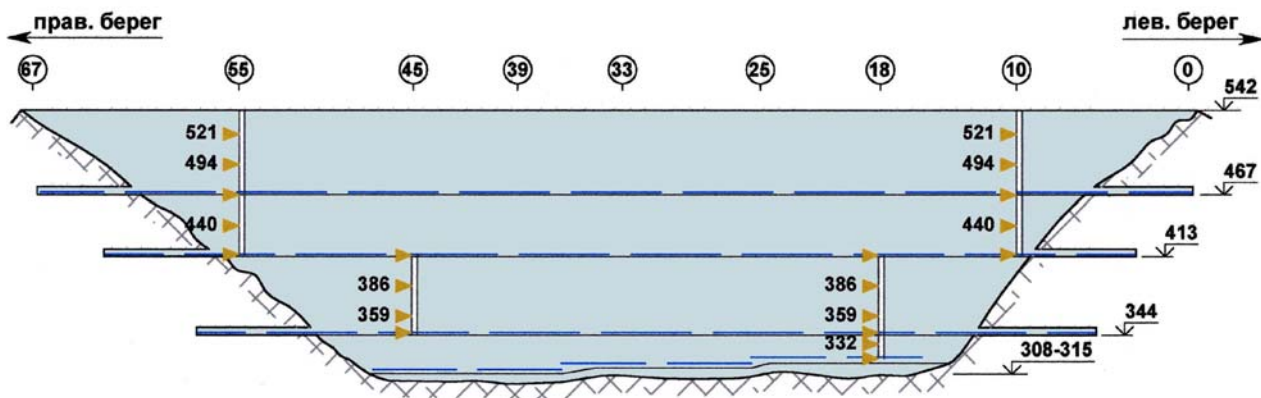


Рисунок 3 – Схема передачи отметок на гребень плотины

Так как ошибки определения длины компаратора, отсчетов по микроскопам, поправки за разность температур и коэффициент линейного расширения несоизмеримо малы по сравнению с точностью измерительного индикатора, то ошибка определения рабочей длины жезла для каждого цикла измерений будет определяться точностью взятия отсчетов по индикатору жезла.

Средняя квадратическая ошибка измерений одного трехметрового отрезка из результатов многократных измерений составляет $m_{\text{изм}} = \pm 0,02$ мм, что более чем в 2 раза превышает точность измерений с использованием жезла из инвара. Применение углепластиковых материалов в качестве рабочего тела дало ряд преимуществ по сравнению с традиционными инварными измерительными средствами, используемыми на СШГЭС в строительный период и период начальной эксплуатации:

- малый вес и высокая прочность сводят к минимуму влияние ошибки за счет стрелы прогиба;
- очень низкий коэффициент линейного расширения и малая теплопроводность практически исключают влияние перепада температур в процессе измерений (рисунок 4).

В обеспечении эксплуатационной надежности гидротехнических сооружений все более важную роль приобретают автоматизированные системы измерений. На Саяно-Шушенской ГЭС реализована система автоматизированного геодезического контроля плановых перемещений плотины на основе геодезических измерений, которая позволяет в режиме реального времени получать информацию о горизонтальных перемещениях отдельных секций и горизонтов плотины. В настоящее время автоматизировано 19 измерительных точек. Разработка и внедрение САК ПС производились Новосибирским институтом прикладной геодезии (НИИПГ) при непосредственном участии автора. Автоматизированный съем информации реализован на основе первичных измерительных преобразователей индукционного типа (ПИС).

За период эксплуатации системы были получены стабильные результаты, сходимость ручных измерений с использованием модернизированного оптического координатомера и показаний автоматизированной системы удовлетвори-

тельная. Данные показания используются в настоящее время в оперативной геодезической диагностической системе (ОГДС) контроля перемещений плотины.



Рисунок 4 – Пример измерения длин отрезков в плотине трехметровым углепластиковым жезлом

Предложенный автором светодальномерный метод измерения уровней бьефов полностью заменил неэффективную проектную пневмогидравлическую систему и недостаточно надежные сельсинные устройства, использованные в различные периоды строительства и начальной эксплуатации ГТС. В качестве средства измерений уровней бьефов в системе используются лазерные безотражательные дальномерные рулетки DISTO pro и DISTO мето швейцарского производителя Leica. Измерения осуществляются непосредственным способом, сбоев исключительно редки, среднеквадратичная погрешность определения уровня бьефов не превышает $m = \pm 5$ мм (рисунок 5).

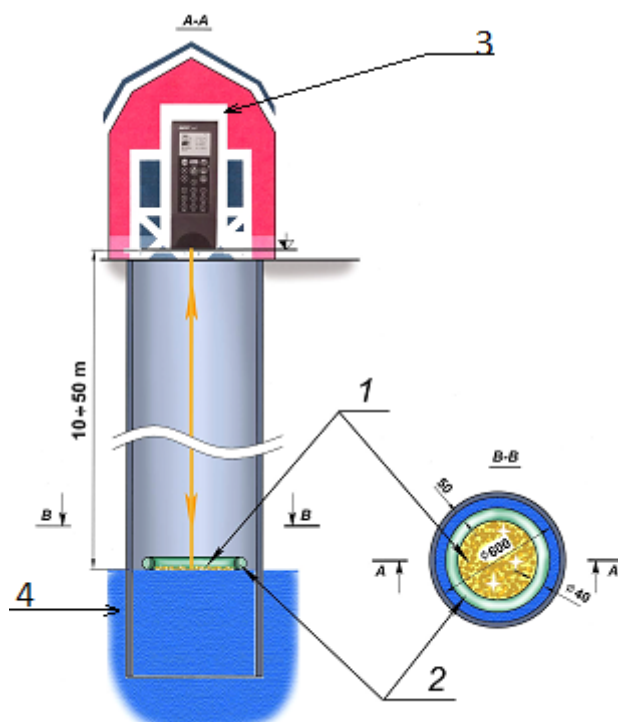


Рисунок 5 – Схема измерения уровня бьефов:
 1 – светотражающий слой; 2 – полая полиэтиленовая трубка;
 3 – лазерная рулетка DISTO; 4 – уровень бьефа

Опыт натурных наблюдений геодезическими методами в строительно-эксплуатационный период потребовал пересмотра периодичности наблюдений за состоянием ГТС СШГЭС (таблица 1).

Таблица 1 – Периодичность наблюдений по геодезической КИА

Наименование работ	Кол-во циклов по проекту, год	Кол-во циклов после пересмотра, год
1. Измерения по прямым и обратным отвесам	18	32
2. Измерения по продольным гидростатическим нивелирам	12	12
3. Измерения по поперечным гидростатическим нивелирам	12	32
4. Измерения по поперечным и продольным гидростатическим нивелирам здания ГЭС	12	12
5. Светодальномерные измерения смещений гребня плотины	10	10
6. Светодальномерные измерения длин хорд	10	10
7. Передача отметок по элеваторам высот, методом светодальномерных измерений	12	12
8. Измерения по гидростатическим нивелирам и глубинным реперам в анкерных опорах	Не предусмотрено	4

Окончание таблицы 1

Наименование работ	Кол-во циклов по проекту, год	Кол-во циклов после пересмотра, год
9. Измерения по трехосным щелемерам в анкерных опорах	Не предусмотрено	12
10. Измерения длин линий по береговым штольням и напорной грани 3-метровым жезлом	12	12
11. Измерения по щелемерам плотины, раздельного устоя и здания ГЭС	4	4
12. Измерения наклонов пера раздельного устоя	Не предусмотрено	4
13. Измерения прогибов конструкций кровли машинного зала здания ГЭС («МАРХИ»)	Не предусмотрено	2
14. Нивелирование 1-го разряда по реперам опорной сети, водоводам, раздельного устоя и гребня плотины	2	1
15. Нивелирование 1-го разряда по агрегатным блокам здания ГЭС	12	6
16. Передача отметок в анкерные опоры нивелированием 1-го разряда	Не предусмотрено	4
17. Нивелирование 1-го разряда по реперам верхнего бьефа	2	1
18. Светодалномерные измерения по внешней опорной сети	Не предусмотрено	1 раз в 3 года
19. Светодалномерные измерения по «Кантегирскому» тектоническому разлому и «Урскому» оползневому массиву	Не предусмотрено	1 раз в 5 лет

Выполненные работы по совершенствованию геодезического измерительного комплекса позволили получать в оперативном режиме, в достаточном объеме и требуемой точности информацию о состоянии ГТС СШГЭС.

В четвертой главе приводятся результаты исследований состояния арочно-гравитационной плотины СШГЭС, выполненные автором. Показано, что плотина Саяно-Шушенской ГЭС длительное время воспринимала нагрузки неполным профилем (недостроенная в требуемом объеме проекта, для пускового комплекса). В 1983 г. были установлены первые признаки раскрытия контактного шва под секцией 33 ключевого сечения плотины. По показаниям глубинных реперов секции 33 величина раскрытия составила около 1,6 мм. В 1985 г., когда напор на сооружение составлял около 80 % от проектного, шов уже раскрылся под всей напорной гранью. А к моменту достижения проектного напора (1990 г.), кроме расширения зоны разуплотнения в основании, были обнаружены и интенсивно фильтрующие трещины в бетоне напорной грани. Проведенный анализ радиальных смещений контрольных секций на различных горизонтах плотины установил неравномерное изменение наклона профиля плотины в зоне отметок 292–310 и 359 м, где выше отметки 359 м угол наклона плотины в сторону нижнего бьефа больше, чем в ее нижней части.

В результате, суммарный фильтрационный расход на тот период времени (1995 г.) составил 549 л/с в основании плотины и 458 л/с через бетон напорной грани. От действия высокоскоростного фильтрационного потока разрушался бетон и размывалось скальное основание плотины, состояние системы «плотина – основание», в соответствии с современной терминологией, можно было считать на тот период времени ограниченно работоспособным.

Возникла объективная необходимость выполнения ремонтных работ в теле плотины и ее основании, которые были успешно выполнены за период с 1995 по 2009 г. Весь ход ремонтных работ контролировался и корректировался на основе данных натурных наблюдений. Опыт выполненных работ доказал правильность и достаточность принятых мер. Ремонтные работы в теле плотины и основании позволили восстановить водонепроницаемость напорного фронта и оказали существенное положительное воздействие на статическую работу сооружения.

Кроме практически полной ликвидации фильтрации через трещины, было достигнуто заметное обжатие бетона напорной грани по горизонтальным площадкам без продвижения инъецируемых трещин в глубину массива. Обжатие бетона в зоне проведения ремонтных работ положительным образом отразилось на общей жесткости сооружения. Было установлено, что сезонные размахи радиальных перемещений снизились на 20–25 %. В свою очередь, нагнетание полимерных растворов в трещины способствовало невозвращению плотины в верхний бьеф (ВБ), которое она занимала до ремонтных работ. В связи с этим образовывались необратимые или остаточные наклоны плотины в сторону нижнего бьефа (НБ), фиксируемые по отвесам и гидростатическим нивелирам, так как отвердевший в трещинах раствор не позволял подошве плотины вернуться в исходное положение, занимаемое ею до заполнения трещин (рисунок 6).

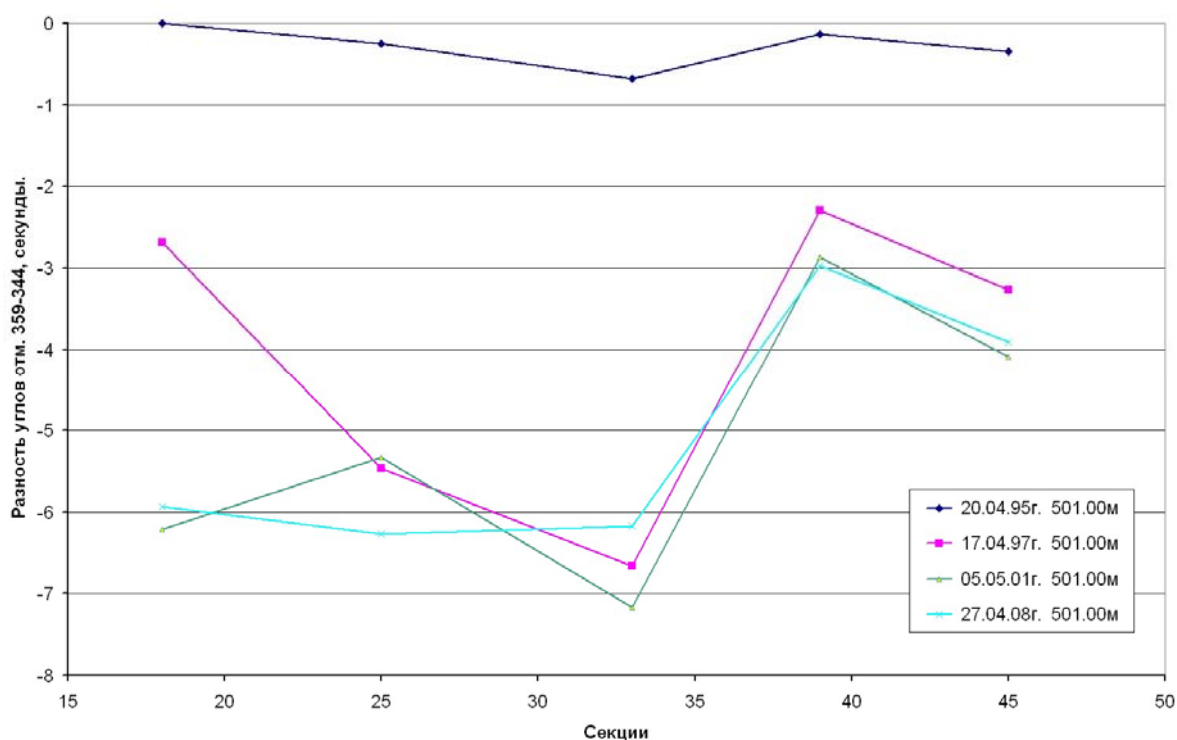


Рисунок 6 – Эпюры приращения углов наклона поперечных гидростатических нивелиров до и после ремонтных работ

Необратимые перемещения и наклоны плотины являются важным показателем ее состояния. Под необратимыми перемещениями понимаются те перемещения, которые остаются в системе «плотина – основание» после снятия гидростатической нагрузки. Оценка необратимых перемещений проводится при доведении уровня верхнего бьефа до уровня «мертвого» объема, установленного для данного сооружения (рисунок 7).

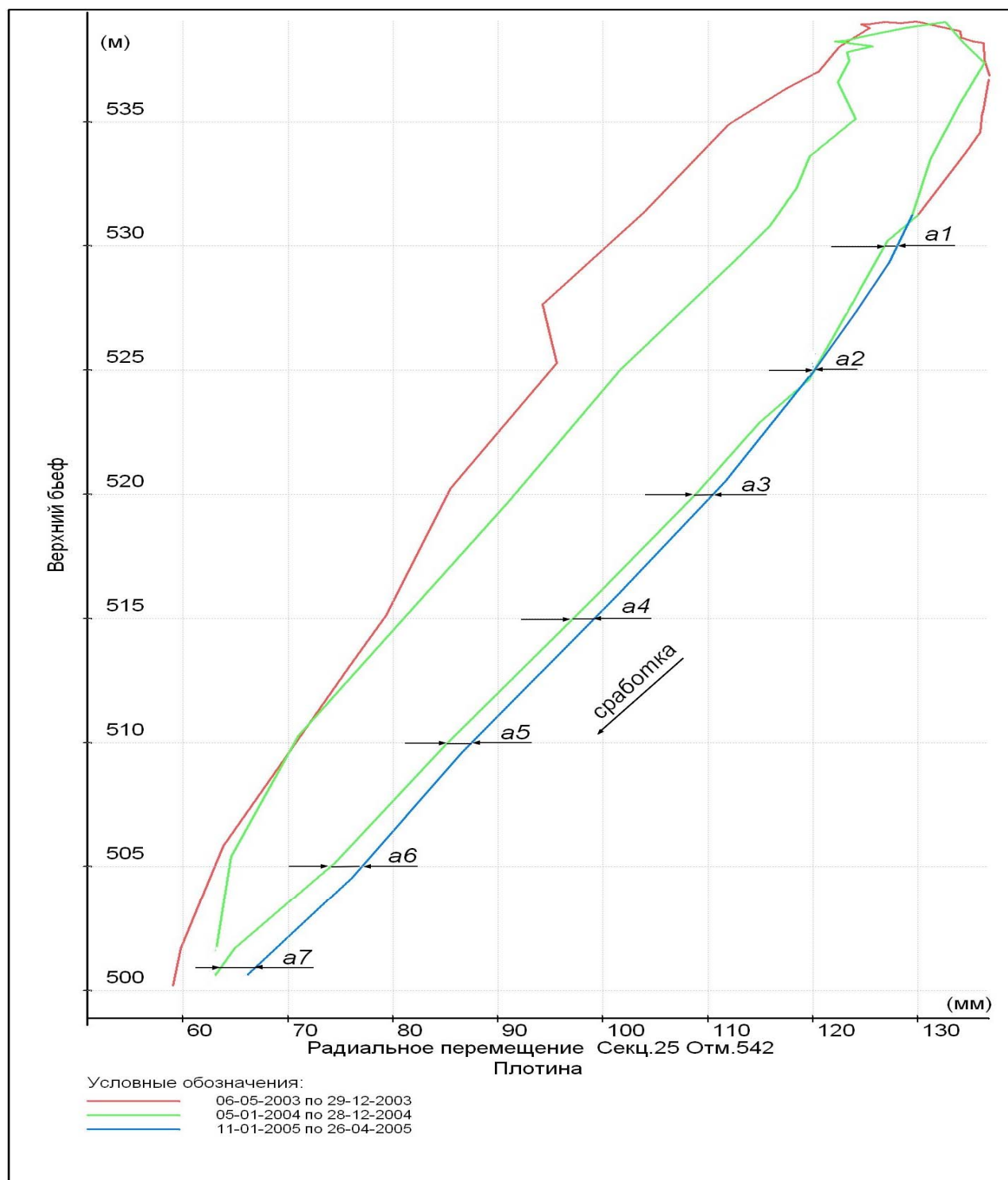


Рисунок 7 – Оценка необратимой составляющей смещений

При участии автора была усовершенствована методика определения необратимой составляющей перемещений. Необходимость совершенствования методики обусловлена тем, что сработка водохранилища производится не строго до УМО, циклы измерения не всегда совпадают по времени с моментом достижения минимальных гидростатических нагрузок, наблюдается определенная инерционность в реакции сооружения на изменения нагрузок и воздействий, температуры бетона на моменты измерений могут существенно различаться. Все эти факторы приводят к некорректности получения конечной информации. В связи с изложенным потребовалась разработка методики определения необратимых перемещений, свободной от выше перечисленных недостатков.

На ветвях сработки водохранилища устанавливаются определенные интервалы уровня верхнего бьефа (УВБ) (от 530 до 500 м). В пределах интервала выбирается несколько УВБ (530, 525, 520 м и т. д.). При этих отметках УВБ измеряются X_{mn} – радиальные перемещения X при n -уровне верхнего бьефа в определенный m -й год. Вычисляется разность измеренных перемещений m -го и предыдущего $(m - 1)$ -го года при одинаковых уровнях верхнего бьефа

$$\Delta X = X_{mn} - X_{m-1, n}.$$

По всем вычисленным ΔX находится $\Delta X_{ср}$. Величина $\Delta X_{ср}$ и будет искомым необратимым перемещением, полученным в m -й год по сравнению с годом $m - 1$. Отрицательная величина необратимых перемещений свидетельствует также об их отсутствии.

Наибольшие необратимые перемещения (до 15 мм) были получены в 1990 г. (таблица 2). Необратимые перемещения с 1990 по 1994 г. явились следствием адаптации сооружения к проектной нагрузке. В этот период шло затухание необратимых перемещений, и к 1995 г. их рост практически прекратился (до 1 мм). Большие величины необратимых перемещений были получены в 1996 г. – году ремонтных работ бетона плотины между отметками 344 и 359 м, где образованный клин из инъекционного материала не позволил плотине вернуться в исходное доремонтное положение. С 1999 по 2003 г. наблюдается дальнейший рост необратимых смещений, фиксируемый показаниями отвесов и гидростатических нивелиров, обусловленный ремонтными работами в основании плотины. С 2006 г. и по настоящее время роста необратимых перемещений не установлено.

В целом следует отметить, что основной рост необратимых перемещений обусловлен техногенным вмешательством в систему «плотина – основание» вследствие проведенных ремонтных работ.

За период с 1990 по 2009 г. необратимые перемещения составили более 40 % от общих значений смещений. На гребне ключевой секции суммарное накопление необратимых перемещений к 2009 г. достигло 59 мм при максимальных смещениях в нижний бьеф 142 мм.

На основе данных натурных наблюдений сделан комплексный анализ состояния системы «плотина – основание» после произошедшей 17 августа 2009 г. аварии на СШГЭС. По данным геодезической КИА установлено, что

авария не оказала влияния на состояние арочно-гравитационной плотины СШГЭС. По данным трехосных щелемеров, расположенных на агрегатных блоках ГА1-ГА10, установленных на отметке 305,75 м здания ГЭС, поперечных гидростатических нивелиров и щелемеров, расположенных на деформационном шве между плотиной и зданием ГЭС, установлено, что массивный бетон ниже отметки 320 м и фундаментные блоки гидроагрегатов практически не получили повреждений, а все произошедшие разрушения строительных конструкций здания ГЭС локализованы в пределах отметок 320–341 м.

Таблица 2 – Необратимые радиальные перемещения гребня плотины

Год	Перемещения гребня плотины в секциях, мм				
	18	25	33	39	45
990	10,2	13,6	15,0	12,8	9,9
1991	5,8	6,9	8,5	7,5	6,4
1992	8,7	4,3	4,0	3,6	3,7
1993	4,7	6,2	5,1	5,0	4,3
1994	-	-	-	-	-
1995	0,6	1,1	1,0	-	0,2
1996	3,6	8,3	10,9	7,1	4,4
1997	-	0,4	0,6	1,4	1,1
1998	-	-	-	-	-
1999	2,5	4,6	3,7	3,8	0,7
2000	2,2	4,2	4,4	3,4	1,5
2001	-	-	-	-	-
2002	1,2	1,5	-	-	-
2003	3,4	4,3	3,6	2,6	1,3
2004	1,3	1,7	1,2	1,1	1,4
2005	0,7	0,5	1,1	0,5	0,4
2006	-	-	-	-	-
2007	-	-	-	-	-
2008	-	-	-	-	-
Сумма перемещений за период с 1990 по 2008 г.	44,9	57,6	59,1	48,8	35,3

Особо важную роль в обеспечении эксплуатационной надежности сооружения играет оперативность в съеме, оценке и предоставлении результатов измерений, особенно в периоды половодий и паводков. Установлено, что ради-

альные перемещения, получаемые из системы отвесов, и наклоны по гидростатическим нивелирам являются наиболее ценными диагностическими показателями. Они соответствуют следующим требованиям:

- диагностический показатель должен изменяться в соответствии с изменением нагрузок и воздействий;
- диагностический показатель должен поддаваться прогнозированию;
- величина сезонного изменения диагностического показателя (размах от УМО до НПУ) должна в разы превосходить допустимые погрешности измерений;
- диагностический показатель должен обязательно входить в перечень показателей с установленными критериальными значениями, зафиксированными в Декларации безопасности ГТС.

Всем выше перечисленным требованиям соответствуют радиальные перемещения гребня ключевой секции плотины, получаемые из внутренней системы измерений.

В связи с этим в рамках информационно-диагностической системы (ИДС) ГТС реализована оперативная геодезическая диагностическая система, предложенная автором.

В режиме реального времени предоставляется информация о смещениях гребня ключевой секции плотины, уровнях бьефов и температурах бетона. Результаты сравниваются с критериями, определенными в Декларации безопасности. Производится сравнительный анализ измеренных параметров с данными прошлых лет применительно к идентичным уровням гидростатической нагрузки. Информация предоставляется в виде таблиц, графиков, циклограмм (рисунок 8). Наличие такой системы на сооружении позволяет оперативно анализировать существующую ситуацию, вырабатывать своевременные предложения по вариантам воздействий на сооружение, управлять режимом наполнения-сработки водохранилища и таким образом снижать риски возникновения негативных ситуаций на ГТС.

Приток в июне-июле 2006 г. к створу ГЭС был с 1-процентной обеспеченностью (один раз в 100 лет). Оперативно, по мере поступления данных натурных наблюдений, проводился анализ состояния сооружения, выполнялись прогнозные расчеты перемещений плотины для различных неблагоприятных сочетаний гидростатических нагрузок и температурных воздействий. По результатам натурных наблюдений и расчетов было принято решение о снижении УВБ к началу ноября 2006 г. ниже отметки, определенной плановым графиком сработки водохранилища. Достигнутая к 01.11.2006 г. отметка УВБ составила 537,19 м, что на 79 см ниже определяемого по графику уровня. Принятое на основе натурных данных и прогнозных расчетов своевременное решение об изменении режима сработки позволило не допустить достижения контрольными параметрами состояния плотины критериальных значений К1 и предотвратить риск возникновения негативных последствий в системе «плотина – основание».

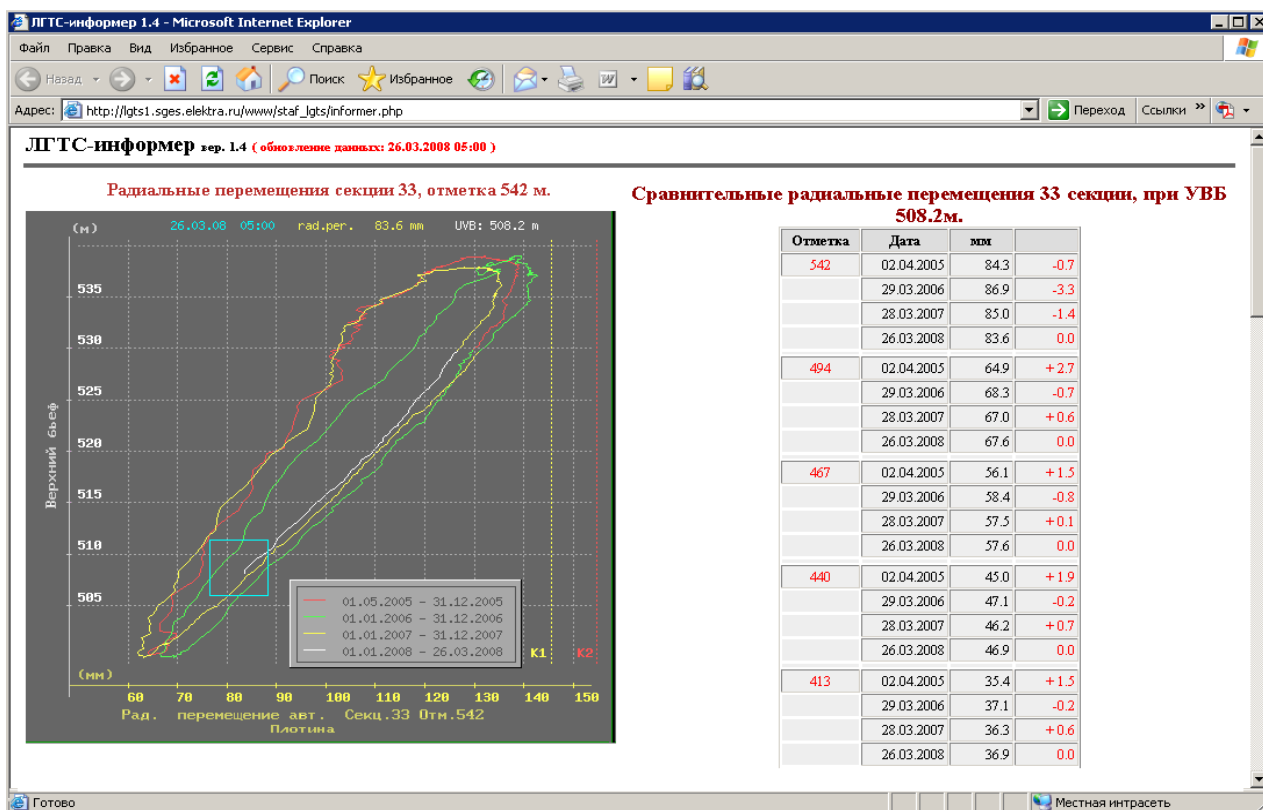


Рисунок 8 – Радиальные перемещения гребня ключевой секции плотины, полученные по ОГДС

Опыт ведения режима наполнения водохранилища в 2006 г. полностью подтвердил необходимость управления уровнем режимом по состоянию сооружения и целесообразность создания аналогичных систем (ОГДС) на других ГТС ГЭС.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Установлено, что данные геодезического мониторинга, получаемые из показаний отвесов и гидростатических нивелиров, внутренней системы измерений, являются наиболее ценными для оперативной оценки эксплуатационной надежности СШГЭС диагностическими показателями.

2. Проведенная комплексная модернизация проектной геодезической измерительной сети позволила создать целостную систему мониторинга арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС на основе современных средств и методов геодезических измерений:

- предложена методика использования скальных марок продольного гидростатического нивелира в качестве исходных реперов для внутренней высотной сети, что позволило более эффективно, за счет снижения времени измерения в цикле и сокращения трудозатрат, определять осадки плотины;

- разработана методика передачи отметок на продольные гидростатические нивелиры и гребень плотины посредством линейных светодальномерных

измерений, что позволило сократить время измерения в цикле более чем в два раза, снизить трудозатраты и повысить точность измерений;

- предложено новое средство измерения длин отрезков с использованием углепластиковых материалов в качестве рабочего измерительного тела, что позволило практически полностью исключить влияние изменения температур на результаты измерений;

- выполнена модернизация ранее запроектированной системы измерения уровней верхнего и нижнего бьефов СШГЭС. Использование безотражательных дальномерных рулеток швейцарской фирмы Leica в качестве средства измерений позволило практически полностью исключить сбои в работе системы, а также повысить точность измерений почти в 2,5 раза;

- выполнена автоматизация измерений обратных отвесов и ключевого сечения прямого отвеса с использованием индукционных датчиков, что позволило оценивать состояние сооружения в режиме реального времени.

3. Усовершенствована методика определения необратимых перемещений плотины и дана оценка их необратимых составляющих за период нормальной эксплуатации плотины.

4. По данным геодезических наблюдений дана оценка современного состояния арочно-гравитационной плотины и установлено, что авария, произошедшая на СШГЭС 17 августа 2009 г., не отразилась на общем состоянии системы «плотина – основание».

5. На основе геодезических данных измерений разработана система оперативного контроля состояния сооружения, позволяющая в режиме реального времени оценить состояние системы «плотина – основание», прогнозировать возможные ситуации и, таким образом, управлять режимом водохранилища в целях максимального снижения рисков возникновения аварийных ситуаций на СШГЭС.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:

1. Стефаненко, Н.И. Исследование влияния внешней среды на струнные системы Саяно-Шушенской ГЭС / Н.И. Стефаненко, С.П. Калинин // Сборник научных трудов НИИПГ. Совершенствование инженерно-геодезических работ при строительстве, монтаже и эксплуатации сооружений. – Вып. 9. – М.: ЦНИИГАИК, 1985. – С. 122–127.

2. Мозжерин Ю.Г., Стефаненко Н.И., Ковтун М.И., Новоселов С.П. Авторское свидетельство № 1223025, от 08.12.1985 г. «Датчик линейных перемещений».

3. Брызгалов, В.И. Необратимые перемещения плотины Саяно-Шушенской ГЭС, методика их определения, анализ полученных значений / В.И. Брызгалов, Е.Ю. Шахмаева, Н.И. Стефаненко // Гидротехническое строительство. – 1998. – № 4. – С. 25–29.

4. Стефаненко, Н.И. Опыт применения струнных систем в качестве измерителей горизонтальных смещений при наблюдениях за деформациями гид-

ротехнических сооружений Саяно-Шушенской ГЭС / Н.И. Стефаненко // Гидротехническое строительство. – 1998. – № 8. – С. 52–54.

5. Стефаненко, Н.И. Необратимые перемещения плотины Саяно-Шушенской ГЭС / Н.И. Стефаненко // Вестник Красноярской государственной архитектурно-строительной академии: Сборник научных трудов. Вып. 6. – 2003. – С. 33–43.

6. Стафиевский, В.А. Состояние плотины Саяно-Шушенской ГЭС на завершающем этапе ремонта бетона напорной грани и контактной зоны скального основания / В.А. Стафиевский, В.А. Булатов, Е.Н. Решетникова, Н.И. Стефаненко, Л.С. Пермякова, А.П. Епифанов // Гидротехническое строительство. – 2003. – № 11. – С. 18–24.

7. Стефаненко, Н.И. Методы и средства контроля общих перемещений плотины СШГЭС и опыт их совершенствования / Н.И. Стефаненко, С.С. Гутов, О.Ю. Синельников // Гидротехническое строительство. – 2003. – № 11. – С. 39–43.

8. Гордон, Л.А. Оценка безопасности плотины Саяно-Шушенской ГЭС (по данным натурных измерений плановых перемещений) / Л.А. Гордон, В.Б. Затеев, Н.И. Стефаненко // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. Т. 244. Бетонные и железобетонные гидротехнические сооружения. – СПб., 2005. – С. 55–64.

9. Пермякова, Л.С. Состояние напорного фронта Саяно-Шушенской плотины после завершения ремонтных работ по снижению его водонепроницаемости / Л.С. Пермякова, А.П. Епифанов, Н.И. Стефаненко // Гидротехническое строительство. – 2008. – № 1. – С. 9–13.

10. Епифанов, А.П. Из опыта организации безопасной эксплуатации Саяно-Шушенской арочно-гравитационной плотины / А.П. Епифанов, Н.И. Стефаненко // Гидротехническое строительство. – 2008. – № 11. – С. 5–10.

11. Богуш, Б.Б. Обеспечение эксплуатационной надежности гидротехнических сооружений. Саяно-Шушенской ГЭС / Б.Б. Богуш, А.Н. Митрофанов, Н.И. Стефаненко // Гидротехническое строительство. – 2008. – № 11. – С. 19–24.

12. Карпик, А.П. Оценка состояния Саяно-Шушенской плотины в период нормальной эксплуатации по данным геодезических измерений / А.П. Карпик, Н.И. Стефаненко // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2009. – № 5. – С. 3–11.