

УДК528.2

Н.И. Стефаненко

Филиал ОАО «РусГидро» – «Саяно-Шушенская ГЭС имени П.С. Непорожного»,
Саяногорск

ИЗ ОПЫТА ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ И МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ОБЩИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ АРОЧНО-ГРАВИТАЦИОННОЙ ПЛОТИНЫ СШГЭС

N.I. Stefanenko

Sayano-Shushenskaya HPS
665619, Post Box 39, Cheremushky,
Sayanogorsk, Khakasiya, Russia

THE OPERATING EXPERIENCE OF GEODETIC COMPLEX OF CONTROL DEVICES AND METHODS MONITORING THE MOVEMENT OF THE SAYANO-SHUSHENSKAYA ARCH- GRAVITY DAM

The article estimates the engineering-geodesic complex of control devices and methods monitoring general movements of the Sayano-Shushenskaya arch-gravity dam. It explores the technique aimed at detecting horizontal shifts of the dam and based on the network of prolated triangles. It also considers the stability of initial horizontal high-altitude nets and the problems connected with the improvement of monitoring control devices and methods.

Дана оценка инженерно-геодезического комплекса средств и методов контроля общих перемещений арочно-гравитационной плотины СШГЭС. Исследована методика определения горизонтальных перемещений плотины по сети вытянутых треугольников. Произведена оценка стабильности исходных плано-высотных сетей. Отражены отдельные вопросы по совершенствованию средств и методов наблюдений.

В соответствии с Федеральным законом "О безопасности гидротехнических сооружений (№ 117-ФЗ, 21.07.1997 г.)" натурные наблюдения являются основным средством обеспечения безопасной работы гидротехнических сооружений. Данные натурных наблюдений позволяют сравнить действительное поведение сооружения с проектным и контролировать все изменения в процессе эксплуатации, т.е. диагностировать сооружение в различные периоды его жизнедеятельности.

В общем комплексе натурных наблюдений за состоянием гидротехнических сооружений геодезические методы контроля являются надежными, позволяющими оценить фактическое состояние сооружения, выявить нежелательные процессы, происходящие в сооружении, и с учетом данных других методов, принять решения к предотвращению возможных аварийных ситуаций.

Разработка и совершенствование средств, методов диагностического контроля состояния гидротехнических сооружений, оценка стабильности исходных точек с целью получения наиболее достоверных данных о состоянии сооружений являются одной из основных задач, которые стоят

перед эксплуатационным персоналом любых ответственных гидротехнических сооружений.

Методы наблюдений, используемые в период нормальной эксплуатации.

Наблюдения за осадками плотины и прилегающей территории выполняются методами геометрического и гидростатического нивелирования. Определение горизонтальных перемещений плотины, основания и вмещающих горных массивов в основном производится методом линейных измерений и по показаниям «прямых» и «обратных» отвесов. Раскрытия швов контролируются по показаниям щелемеров.

Геодезическая контрольно-измерительная аппаратура (КИА) состоит из опорных и рабочих планово-высотных сетей. Опорная высотная сеть состоит из кустов фундаментальных реперов, плановая сеть представлена гидротехнической спецтриангуляцией (рис. 1, 2). Обе сети ("внешние" опорные сети) находятся вне зоны активных деформаций, что подтверждается результатами измерений. На гребне плотины и прилегающей территории развиты "рабочие" планово-высотные сети, представленные в виде поверхностных марок, скальных и грунтовых реперов и плановых знаков преимущественно трубчатого типа.

В плотине, для определения перемещений отдельных секций, столбов или горизонтов также развиты планово-высотные ("внутренние") измерительные сети (рис. 3). Высотная сеть состоит из системы продольных и поперечных гидростатических нивелиров, поверхностных марок и элеваторов высот.

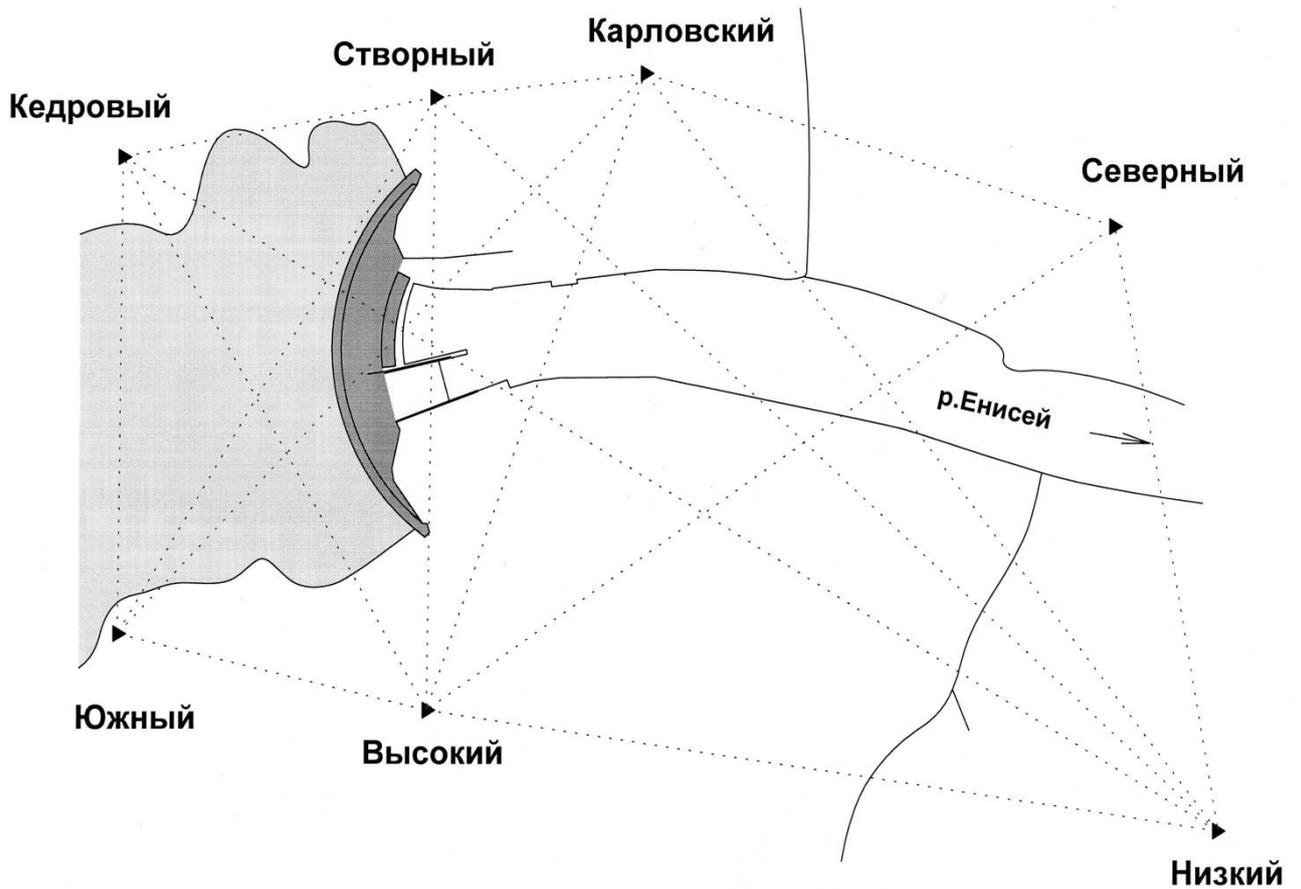


Рис. 1. Внешняя опорная плановая сеть

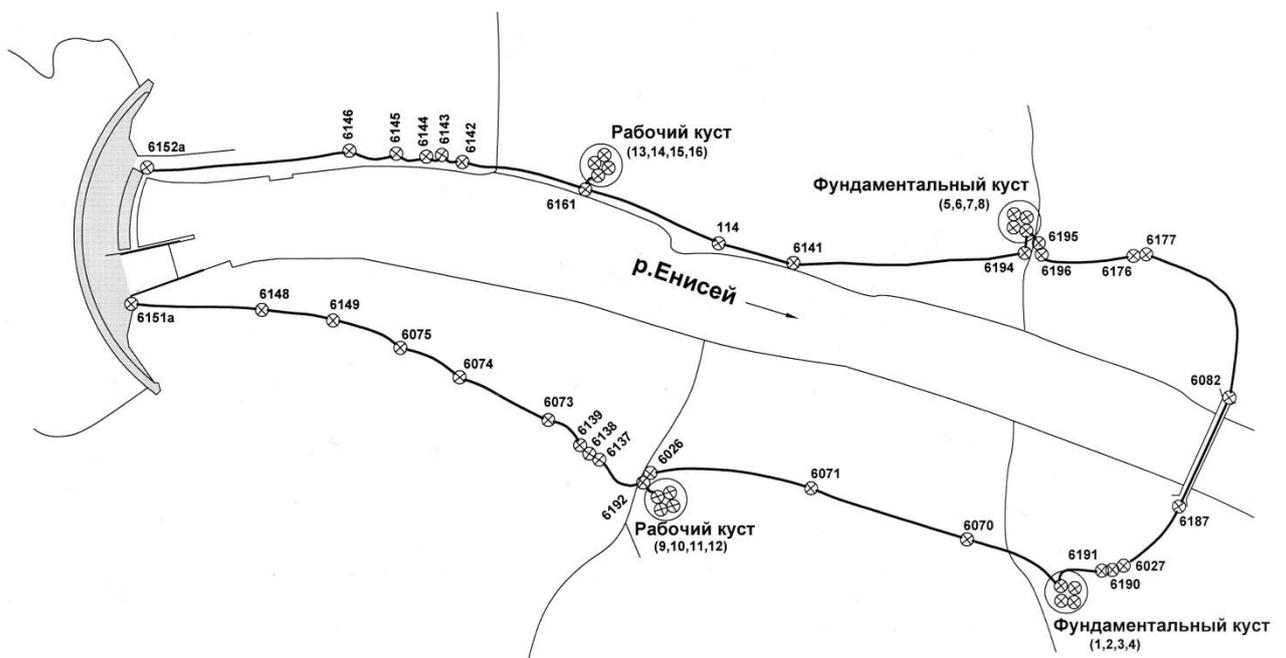


Рис. 2. Внешняя высотная сеть

В период строительства и начальный период эксплуатации для определения плановых смещений отдельных секций плотины и берегов на горизонтах 344, 413 и 467 м использовались измерительные системы,

состоящие из сети вытянутых треугольников (СВТ). Результаты измерений по СВТ неоднократно подвергались сомнению и мало использовались для анализа состояния сооружения. Отмечается, что на других ГЭС аналогичные сети не применялись. Используются только отдельные струнные створы как, например, на Красноярской ГЭС.

Полученные по СВТ так называемые "смещения" существенно различались с показаниями другой независимой измерительной системы, состоящей из "прямых" и "обратных" отвесов. Также были зафиксированы большие "смещения" концов штолен, особенно в галерее на отметке 413 м, что не находило логического объяснения. Например, в период с 13.01.93 по 21.05.93 во время сработки водохранилища при общем смещении плотины в верхний бьеф, концевые точки штолен смещались в нижний бьеф. В забоях левобережных штолен на отметке 413 м эта величина составила 58 мм, а на отметке 467 м - 19 мм. В забоях правобережных штолен эти величины соответственно составили 45 и 32 мм [1].

Анализ многолетних наблюдений выявил определенную закономерность, не совпадающую с изменением гидростатической нагрузки и имеющую сезонный характер.

Максимальные смещения в нижний бьеф наблюдались в мае-июле, в верхний бьеф в декабре-феврале, в связи с чем было высказано предположение об отклонении струны от истинного положения потоками воздуха, что существенно вносит искажения в конечный результат определения смещений.

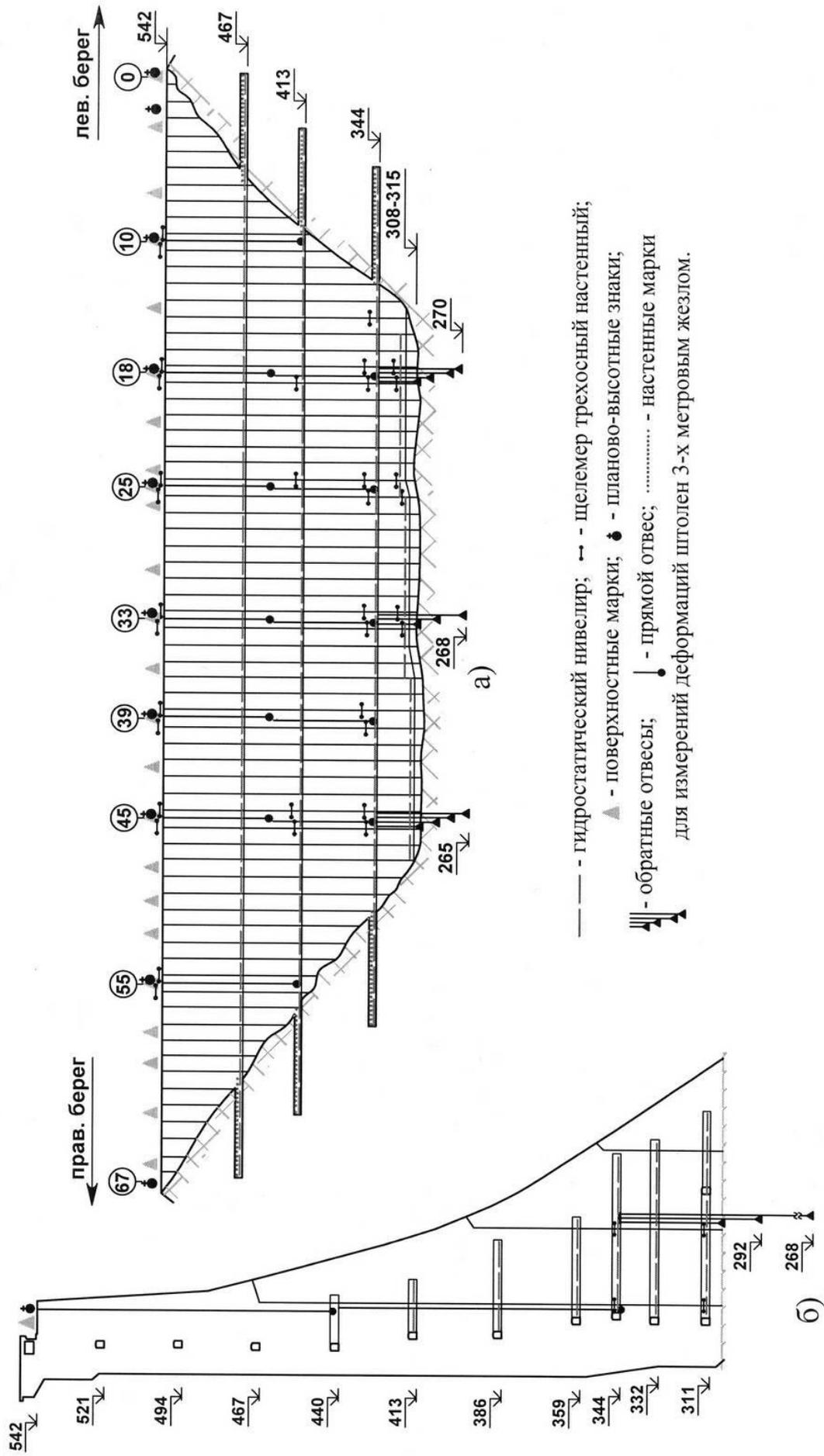


Рис. 3. Внутренняя плано-высотная сеть:
 а) вид на плотину с нижнего бьефа; б) разрез по секции 33.

Расчет возможного отклонения струны в середине пролета под действием ветрового напора показал, что при длине струны 90 м, диаметре 1.6 мм, натяжении струны более 1177 Н и скорости ветрового потока, принимаемой значение 1 м/с, отклонение может составлять до 0.64 мм.

Для фактической оценки влияния воздушных потоков на струны СВТ были выполнены специальные исследования. На отметке 413 м от измерительной балки секции 50 до балки 1п к струне по всей длине был установлен экран, вдвое увеличивающий площадь поперечного сечения струны, практически без увеличения силы натяжения. В секции 52, до установки экрана и после, были выполнены измерения высоты. Разность результатов измерений составила 0.8 мм.

Расчеты показывают, что при систематической ошибке в измерении высот +0.25 мм зимой и -0.25 мм летом, «смещения» концевых точек штолен на отметке 413 м могут достигать до 58 мм. Данные векторы так называемых «смещений», вычисленные как возможные ошибки измерений, имеют то же направление, что и получаемые по результатам наблюдений.

Галереи плотины в вертикальной плоскости пересекаются смотровыми шахтами, шахтами лифтов, маршевыми лестницами, в горизонтальной - имеют сообщения с «дневной» поверхностью. Из-за перепада атмосферного давления в следствии разности температур наружного воздуха и в галереях плотины, образуется воздушный поток, отклоняющий струну от створа, что и подтверждается приведенными выше экспериментальными данными. Направление и скорость потока воздуха меняется от разности температур в зависимости от времени года.

С целью определения истинного положения концевых точек штолен, их координаты определялись методом полигонометрии относительно внешней опорной сети. Ошибка определения смещений не превышает $m=\pm 4$ мм. Смещения, полученные по результатам наблюдений, не превосходят ошибок измерений (табл. 1), что подтверждает стабильность концов штолен, и не согласуется с показаниями СВТ.

Таблица 1. Смещения концевых марок СВТ, расположенных в забое штолен

Дата	С М Е Щ Е Н И Я			
	Отметка 467 м		Отметка 413 м	
	X	Y	X	Y
23.05.94	+2	0	-	-
13.09.94	+7	+2	-	-
17.05.95	0	0	0	0
22.06.95	-1	+7	+1	+2
07.09.95	+1	+2	-1	+2
17.12.97	+2	0	-	-

Следовательно, “смещения” концов штолен получаемые по СВТ являются следствием ошибок измерений, основной источник которых - это действие ветрового напора.

Оценка стабильности исходных планово-высотных сетей

Выбор исходных пунктов планово-высотной сети и оценка стабильности их положения - это одна из наиболее важных проблем натурных наблюдений за общими перемещениями гидротехнических сооружений. Расположение исходных пунктов вблизи сооружения способствует вовлечению их в зону распространения "воронки" оседания. Значительное удаление от сооружения, в свою очередь, ведет к росту ошибок самих результатов измерений, что, в конечном итоге, приводит к искажению определяемых параметров. Следовательно, перед эксплуатационниками возникает две проблемы:

1. Необходимость оптимального выбора расположения пунктов;
2. Ведение периодического контроля за их стабильностью с максимально возможной точностью.

Так как плотина Саяно-Шушенской ГЭС расположена в глубоко врезанной каньонообразной долине с крутизной склонов от 35° до 90° , то расположение пунктов в большей степени диктуется особенностями рельефа, и выбор оптимального их расположения достаточно ограничен. Поэтому процесс оптимизации в данном случае решается путем совершенствования средств и методов измерений.

Горизонтальные перемещения гидротехнических сооружений определяются относительно закрепленных вне деформационной зоны исходных пунктов, которые должны быть в пределах ошибок измерений неподвижными за весь период наблюдений («внешняя» плановая сеть). Положение координат исходных пунктов проверяется регулярными измерениями и в случае обнаружения их подвижек, превышающих ошибки измерений, подлежат тщательной дополнительной проверке и корректировке. На СШГЭС исходной плановой основой (внешняя сеть) служит сеть 1964 - 1972 г.г. гидротехнической спецтриангуляции. Сеть спецтриангуляции создавалась на период строительства гидроузла с целью обеспечения геодезической основы крупномасштабных съемок и выноса в натуру основных осей сооружения - эта сеть состояла из трех ярусов, расположенных на различных горизонтах.

В настоящее время в качестве исходных используются пункты сети гидротехнической спецтриангуляции третьего яруса (каркасная сеть), расположенные на отметках 600 - 800 метров, как наиболее сохранившиеся и менее подверженные влияниям возможных деформаций и техногенных явлений.

Измерения горизонтальных смещений по "каркасной" сети и смещений гребня плотины проводятся методом трилатерации. Данный метод в сравнении с триангуляцией и линейно-угловыми измерениями позволяет определять смещения пунктов с более высокой точностью и

меньшими трудозатратами, что достигается применением высокоточных и современных лазерных дальномеров.

До 2001 года измерения выполнялись отечественными светодальномерами СП- 2 "Топаз". Паспортная средняя квадратическая погрешность измерения расстояния составляла $m = \pm(2+2*10^{-6}*D)$ мм, где D - расстояние в км.

С 2000 года измерения выполняются с применением высокоточного лазерного дальномера DI 2002 и электронного тахеометра ТС 2003. Паспортная средняя квадратическая погрешность измерения расстояния этими приборами составляет $m = \pm(1+1*10^{-6}*D)$ мм.

Уравнивание сети трилатерации выполняется в программном комплексе CREDO.

Отклонения значений координат и длин линий по оценке точности не выходят за пределы эллипса ошибок, что говорит о достаточной стабильности исходной "внешней" плановой сети (рис. 4).

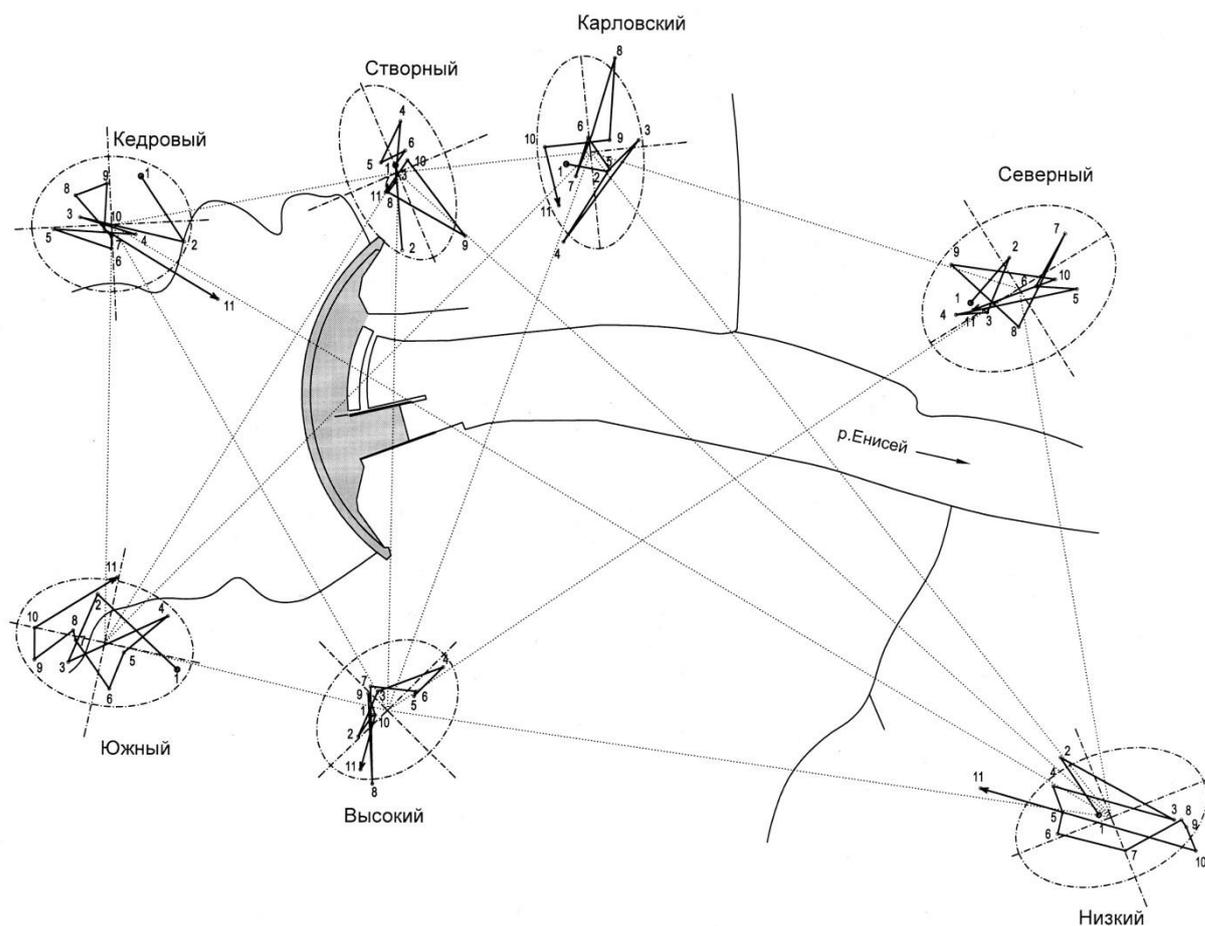


Рис. 4. Схема опорной внешней плановой сети с эллипсами ошибок

Применение дальномера DI 2002 и тахеометра ТС 2003 в качестве основных средств измерений позволило существенно повысить точность и сократить время измерений в цикле.

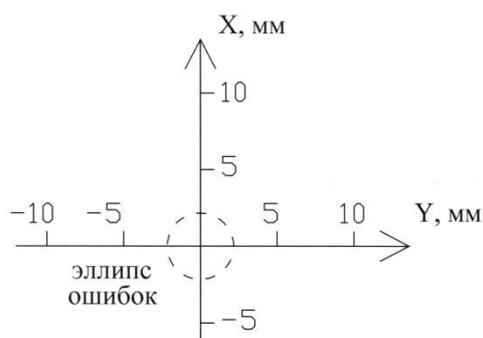
"Внутренняя" измерительная сеть состоит из трех кустов "обратных" отвесов, расположенных в секциях 18, 33 и 45, и 7 "прямых" отвесов в двух

ярусах. "Прямые" отвесы расположены в секциях 10, 18, 25, 33, 45, 55, оголовки выведены на гребень плотины. Якоря "обратных" отвесов заглублены в подошву плотины на максимальную глубину до 40 м от контакта скала-бетон, а оголовки выведены на отметку 344 м (рис. 3).

Совместная обработка результатов измерений смещений гребня плотины по "внешней" и "внутренней" сетям позволяет решать две задачи:

1. Оценить стабильность исходных пунктов "внутренней" измерительной сети, что особенно важно, так как якоря "обратных" отвесов являются опорными знаками "внутренней" измерительной сети;
2. Определить смещение якорей "обратных" отвесов на разных горизонтах.

Оценка данных результатов позволяет судить о деформациях, происходящих в основании плотины. Исходя из анализа ряда наблюдений за период нормальной эксплуатации с 1990 по 2008 гг., положение якорей обратных отвесов стабильно (рис. 5).



- 1- 25.04.00 г. УВБ=501.1м
- 2- 15.11.00 г. УВБ=536.7м
- 3- 18.04.01 г. УВБ=503.7м
- 4- 12.11.01 г. УВБ=537.7м
- 5- 07.05.02 г. УВБ=500.5м
- 6- 12.08.02 г. УВБ=529.6м
- 7- 08.05.03 г. УВБ=500.3м
- 8- 27.08.03 г. УВБ=538.9м
- 9- 06.05.04 г. УВБ=500.3м
- 10- 30.09.04 г. УВБ=539.0м

- 11- 19.04.05 г. УВБ=501.8м
- 12- 10.10.05 г. УВБ=538.6м
- 13- 24.04.06 г. УВБ=500.7м
- 14- 23.10.06 г. УВБ=537.4м
- 15- 27.04.07 г. УВБ=500.6м
- 16- 21.08.07 г. УВБ=536.0м
- 17- 05.05.08 г. УВБ=500.1м
- 18- 14.10.08 г. УВБ=535.7м

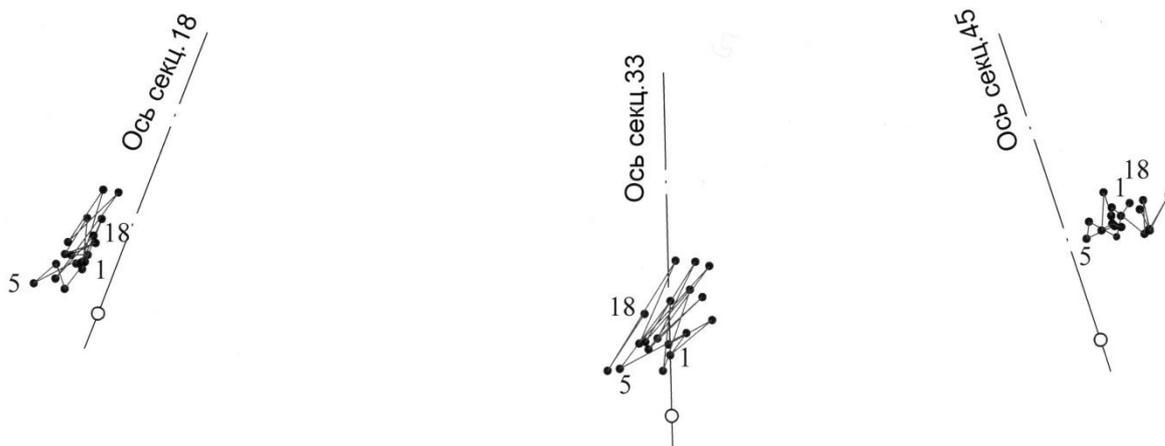


Рис. 5. График смещений якорей «обратных» отвесов

Оценка устойчивости положения исходных высотных реперов регулярно контролируется высокоточными нивелирными ходами между ними и проверкой взаимного положения куста реперов. Расхождения превышений от среднего многолетнего значения за период с 1993 по 2006 года не выходят за

пределы допустимых значений, что говорит о стабильности высотной опорной сети.

Совершенствование средств и методов измерений

Вопросу совершенствования средств и методов наблюдений на СШГЭС уделяется особое внимание.

Так, вертикальные перемещения гидротехнических сооружений СШГЭС и прилегающей территории определяются относительно фундаментальных и рабочих кустов реперов ("внешняя" высотная сеть), расположенных в нижнем бьефе СШГЭС на расстоянии 3 и 1.5 км (рисунок 2).

Нивелирование между реперами выполняется по методике гидротехнического нивелирования первого разряда. Средняя квадратическая ошибка на станции, полученная по результатам уравнивания высотной сети, составляет порядка ± 0.13 мм при допустимой ± 0.3 мм. Фактическая ошибка определения осадки марки, наиболее удаленной от фундаментальных реперов, составляет ± 1.4 мм. Нивелирование в различное время выполнялось высокоточными нивелирами Ni 002 А, электронным нивелиром DL 101, в настоящее время используется нивелир НАК-2.

При наполнении водохранилища от УМО до НПУ осадка реперов, расположенных в приплотинной зоне, и конечных марок гидростатических нивелиров, расположенных в забое лево - и правобережных штолен, составляет 4-6 мм и с 1992 практически не изменяется. При статистической обработке имеющегося ряда наблюдений была получена аналитическая зависимость вертикальных перемещений марок, расположенных в торцах штолен на отметке 344 м от изменения УВБ, которая может быть представлена в виде:

$$\text{МГН 7л} = [346.8557 - 0.000116 \times (\text{УВБ} - 500)] \text{ м,}$$

$$\text{МГН 8п} = [346.8922 - 0.000114 \times (\text{УВБ} - 500)] \text{ м.}$$

Использование марок гидростатического нивелира, расположенных на отметке 344м, МГН 7л и МГН 8п как опорных точек (между циклами подходного нивелирования), позволяет значительно быстрее и, следовательно, точнее получать информацию о вертикальных перемещениях секций плотины. В целях контроля и подтверждения приведенной выше зависимости проводятся два ежегодных цикла нивелирования.

Связь марок, расположенных на гребне плотины, и продольных гидростатических нивелиров с «внешней» опорной сетью осуществляется через элеваторы высот. До 2002 года для передачи отметок использовались струнные элеваторы высот, сложные в эксплуатации и очень уязвимые к внешним воздействиям, последствия которых могли быть обнаружены только при очередном компарировании. Затруднено также проведение работ по компарированию проволок элеваторов высот, так как в этом случае возникает необходимость демонтировать первичные измерительные преобразователи системы автоматизированного контроля плановых смещений (САК ПС), размещенные в тех же трубах «прямых» отвесов. В этом случае полностью нарушается эксплуатация данной системы, что явно неприемлемо. Случайное

изменение длин в основном объясняется механическим повреждением проволок вследствие выполнения различных работ, проводимых в помещениях прямых отвесов. Совместное размещение двух измерительных систем (прямых отвесов и элеваторов высот) в одной защитной трубе является явным недостатком проекта размещения геодезической КИА. Так, например в 1993 году в период с 10.06 по 29.07 в секции 55 между горизонтами 467 - 542 м зафиксировано изменение длины элеватора на 3,5 мм. В секции 18 между горизонтами 344 - 413 м в период с 02.06.93 по 28.07.94 гг. изменение длины составило 3,3 мм. Ретроспективно вносить поправки в длины элеваторов невозможно. В связи с этим было принято решение о разработке новой методики для передачи отметок по элеваторам высот с применением высокоточного светодальномера DI 2002, позволяющего измерять расстояния до 100 метров с погрешностью порядка ± 0.1 мм. Были разработаны специальные приспособления для установки светодальномера и отражателей. Опыт эксплуатации данной системы с 2002 года показал ее надежность, хорошую сходимости результатов измерений и высокую оперативность при производстве работ. Анализ полученных результатов показал, что поправки в измеренные вертикальные расстояния не превышают 0.2 мм, а средняя квадратическая ошибка передачи отметки не превышает ± 0.1 мм.

Для определения изменения длин штолен на отметках 344, 413, 467 м на берегах плотины от контакта скала-бетон до забоя по стенам галереи заложены марки, расположенные через каждые 3 м. До 2000 года измерение расстояний между марками (или длин малых сторон СВТ) выполнялось инварным трехметровым жезлом, состоящим из дюралевого корпуса диаметром 36 мм, внутри которого был проложен инварный стержень, отсчетным приспособлением служил индикатор часового типа с ценой деления 0.01 мм. Из-за ряда ошибок (стрелы прогиба измерительного тела, температурных ошибок и т.д.) точность измерений, выполняемых инварным жезлом, была недостаточной.

С 2000 года измерения выполняются специально изготовленным трехметровым углепластиковым жезлом. Жезл выполнен из полый углепластиковой трубы диаметром 25 мм и толщиной стенки 2 мм. На одном конце жезла закреплен контакт из твердосплавной стали, взятый со скобы микрометра (пятка), на другом - индикатор часового типа с ценой деления 0.01 мм. Коэффициент температурного расширения этого материала, полученный по результатам исследований, не превышает $0.08 \cdot 10^{-6} \text{C}^{\circ}$, и поэтому поправки в длины линий, вызванные колебанием температуры, можно не учитывать.

Средняя квадратическая ошибка измерений одного интервала из результатов многократных измерений составляет $m_{\text{изм}} = \pm 0.02$ мм.

Суммарная ошибка определения изменения общей длины штолен лежит в пределах от ± 0.18 до ± 0.3 мм (в зависимости от длины штольни).

Применение углепластиковых материалов в качестве рабочего тела дает ряд преимуществ по сравнению с инварными жезлами:

1. Малый вес и высокая прочность сводят к минимуму влияние прогиба жезла на точность измерений;

2. Очень низкий коэффициент линейного расширения и малая теплопроводность практически исключают влияние перепада температур в процессе измерений.

Выводы:

1. Разработанная система передачи отметок между горизонтами плотины с применением лазерных дальномеров является более надежным и точным средством измерений по сравнению с аналогичными, традиционными методами, и может быть рекомендована на других гидротехнических сооружениях.

2. Применение новых углепластиковых материалов в качестве измерительного средства для жезлов, элеваторов и т.д. позволяет существенно повысить точность измерений, исключив основной источник ошибок, связанных с изменением температур рабочего тела.

3. Применение современных геодезических приборов и совершенствование методик наблюдений существенно повысили точность определения смещений и производительность труда за счет снижения времени на выполнение циклов измерений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стефаненко, Н.И. Опыт применения струнных систем в качестве измерителей горизонтальных смещений при наблюдениях за деформациями гидротехнических сооружений Саяно-Шушенской ГЭС/ Н.И. Стефаненко // Гидротехническое строительство. - 1998. - №9. -С. 52-54.

© Н.И. Стефаненко, 2009