Открытое акционерное общество
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ГИДРОТЕХНИКИ имени Б.Е.ВЕДЕНЕЕВА»

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО АНАЛИЗУ ДАННЫХ И ПРОВЕДЕНИЮ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ОСАДКАМИ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ СМЕЩЕНИЯМИ БЕТОННЫХ ПЛОТИН

П 83 – 2001
ВНИИГ

Санкт-Петербург
2001

Открытое акционерное общество
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ГИДРОТЕХНИКИ имени Б.Е.ВЕДЕНЕЕВА»

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО АНАЛИЗУ ДАННЫХ И ПРОВЕДЕНИЮ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ОСАДКАМИ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ СМЕЩЕНИЯМИ БЕТОННЫХ ПЛОТИН

П 83 – 2001
ВНИИГ

Санкт-Петербург
2001

УДК 626/627.03.001.42+627.824.012.4

Рекомендации содержат методы измерений осадок и горизонтальных смещений бетонных плотин, а также методы обработки и анализа результатов этих измерений.

Рекомендации предназначены для практического использования службами эксплуатации гидроэлектростанций, а также инженерно-техническими работниками, занимающимися вопросами оценки бетонных и железобетонных плотин, и могут рассматриваться как дополнение к "Правилам технической эксплуатации электрических станций и сетей" и другим действующим нормативным документам.

© ОАО «ВНИИГ им.Б.Е.Веденеева», 2001

ПРЕДИСЛОВИЕ

Осадки и горизонтальные смещения являются основными и наиболее показательными параметрами, необходимыми для диагностики состояния эксплуатируемых гидротехнических сооружений.

Рекомендации содержат основные положения о составе и рациональном размещении контрольно-измерительной аппаратуры (КИА) для измерения осадок и горизонтальных смещений бетонных (железобетонных) плотин на скальном и нескальном основаниях, методах проведения измерений, их периодичности и методах обобщения и анализа данных наблюдений. Они могут быть использованы также при анализе данных наблюдений за осадками и горизонтальными смещениями зданий ГЭС, совмещенных с водосливами или входящих в напорный фронт.

Рекомендации составлены на основе многолетнего опыта наблюдений и исследований, проводимых на ряде отечественных гидроузлов, а также зарубежного опыта и являются дополнением к действующим в настоящее время "Правилам технической эксплуатации электрических станций и сетей", к положениям СНиП и другим нормативным документам (РД 34.20.501-95, СНиП 2.06.06-85, СНиП 2.02.02-85).

Рекомендации предназначены для использования службами эксплуатации ГЭС, а также инженерно-техническими и научными работниками, привлекаемыми для оценки состояния плотин и их оснований по результатам натурных наблюдений.

Составлены Рекомендации в ОАО "ВНИИГ им.Б.Е.Веденеева" инженерами Александровской Э.К. и Урахчиным В. П. и в АОО НИИЭС канд. техн. наук Алиповым В.В.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Смещения бетонных плотин (высотные и плановые) относятся к основным диагностическим параметрам, связанным с критериями надежности. Наблюдения за смещениями являются наиболее представительными из всех видов наблюдений, поскольку наглядно характеризуют поведение плотины и основания в период строительства и последующей эксплуатации и позволяют достаточно обоснованно оценить статическую работу системы "плотина-основание".

1.2. Методы измерений и оснащенность сооружения КИА для наблюдений за общими смещениями зависят:

от класса плотины;

от типа плотины и ее конструктивных особенностей;

от топографических и инженерно-геологических условий основания и береговых примыканий.

1.3. Основными действующими нагрузками на бетонную плотину и ее основание являются:

собственный вес сооружения, включая вес постоянного технологического оборудования;

гидростатическое давление воды на напорную и низовую грани;

фильтрационное противодавление на подошву сооружения;

давление воды на дно водохранилища и борта;

температурные воздействия на сооружение.

Внесены ОАО «ВНИИГ им.Б.Е.Веденеева»	Утверждены РАО «ЕЭС России» Письмо № 02-1-03-4/618 от 03.07.98	Срок введения в действие I кв.2002 г.

Линейное смещение сооружения под действием перечисленных нагрузок состоит из вертикального и горизонтального. Вертикальное смещение включает осадку плотины в результате деформирования основания под нагрузками, а также изменение вертикальных размеров бетона сооружения в результате температурных воздействий. Горизонтальное смещение плотины и основания обусловлено воздействием воды водохранилища (гидростатическое давление плюс давление воды на ложе водохранилища), температурными деформациями тела плотины, связанными с сезонными изменениями температуры воздуха и воды и неупругими деформациями основания, берегов и материала плотины.

1.4. Наблюдения за осадками и горизонтальными смещениями плотины и основания осуществляются во время строительства, первоначального наполнения водохранилища и в период постоянной эксплуатации.

1.5. Количество КИА должно быть достаточным для определения реакции сооружения и его основания на нагрузки и температурные воздействия. На основании опыта эксплуатации объем КИА и ее состав на конкретном сооружении могут быть увеличены и дополнены.

1.6. Измерения осадок и горизонтальных смещений плотины и ее основания предусматриваются проектом организации инженерно-геодезических работ, входящим в состав проекта натурных наблюдений и исследований для каждого конкретного сооружения (Рекомендации П 100-81/ ВНИИГ) . В проекте организации геодезических работ определяются методика наблюдений, сроки и частота проведения измерений и их точность.

1.7. Наблюдения за осадками и горизонтальными смещениями бетонных плотин проводятся в соответствии с существующими рекомендациями [1]. Для выполнения наблюдений, а также первичной обработки данных измерений привлекаются геодезисты соответствующей квалификации. На эксплуатируемых сооружениях геодезические работы выполняются, как правило, специализированной подрядной организацией. На крупных гидроузлах группа геодезических измерений может входить в состав гидроцеха ГЭС.

1.8. Вторичная обработка и анализ данных измерений осадок и горизонтальных смещений, необходимых для оценки состояния сооружений, разработки предельно допустимых значений (ПДЗ) диагностических и контролируемых параметров, а также для прогнозирования работы сооружения при дальнейшей эксплуатации выполняются с привлечением научно-исследовательской или проектной организации.

1.9. В тексте Рекомендаций используются ссылки на следующие нормативные документы:

1. **Правила** технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации : РД 34.20.501-95. 15-е издание. М., 1996.

2. **СНиП 2.06.06-85.** Плотины бетонные и железобетонные. М.: ЦНТП Госстроя СССР, 1986.

3. **СНиП 2.02.02-85.** Основания гидротехнических сооружений. М.: ЦНТП Госстроя СССР, 1986.

4. **Пособие** для изучения "Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей" (14-е издание, глава 3.1). М.- СПб, 1992.

5. **Рекомендации** по наблюдениям за напряженно-деформированным состоянием бетонных плотин: П-100-81/ВНИИГ им.Б.Е.Веденеева. Л., 1982.

6. **Рекомендации** по проведению натурных наблюдений за деформациями скальных оснований бетонных плотин: П-792-83/Гидропроект. М., 1985.

7. **Рекомендации** по прогнозированию экстремальных перемещений гребня бетонных гравитационных плотин в период их эксплуатации: П-06-73/ ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева. Л., 1974.

8. **Рекомендации** по прогнозированию деформаций сооружений гидроузлов на основе результатов геодезических наблюдений: П-53-90/ ВНИИГ им.Б.Е.Веденеева. Л., 1991.

2. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ОСАДОК БЕТОННЫХ ПЛОТИН

2.1. Измерения осадок бетонных плотин и их оснований выполняются, в основном, геодезическими методами – геометрического, тригонометрического или гидростатического нивелирования. Наибольшее распространение получило геометрическое нивелирование. Точность измерения осадок характеризуется средней квадратической погрешностью определения деформаций и, в зависимости от допустимой погрешности, назначаются разряды (классы) нивелирования.

2.2. Осадка бетонных плотин на скальном основании должна определяться со средней квадратической погрешностью ±1 мм, на нескальном основании – ±2 мм. Методика нивелирования, используемая при наблюдении за осадками плотин, отличается от методики, рекомендуемой государственной инструкцией,большей точностью и называется гидротехническим нивелированием [1].

2.3. Для обеспечения наблюдений за осадками на сооружениях I – III классов создается высотная опорная сеть, в состав которой входят:

фундаментальные (исходные) реперы, закладываемые в прочные, устойчивые породы за пределами зоны возможных деформаций основания, вызванных строительством сооружений и наполнением водохранилища;

рабочие реперы, закладываемые вблизи сооружения в деформируемой зоне основания, от которых нивелируют марки на сооружении;

высотные марки, располагаемые на плотине, основании и берегах вблизи плотины.

2.4. Количество и размещение высотных марок на плотине определяется проектом натурных наблюдений с учетом типа плотины и ее конструктивных особенностей, исходя из необходимости получения данных о величине и распределении осадок каждой секции (блока, столба).

Марки на плотине устанавливают в местах, доступных для проведения наблюдений:

на гребне, горизонтальных и слабо наклонных поверхностях сооружения;

в потернах, галереях внутри тела плотины.

Для секций плотины, имеющих значительную жесткость, количество одновременно наблюдаемых марок может быть ограничено четырьмя, которые в плане располагаются вблизи углов секции. В случае больших плановых размеров секций плотины, когда секция представляет собой недостаточно жесткую конструкцию (особенно в строительный период), количество устанавливаемых на ней марок следует увеличить до 6-9. На узком гребне плотины ограничиваются установкой двух марок - со стороны нижнего бьефа по краям секции. Остальные марки устанавливают на низовом откосе плотины или в потернах.

Кроме марок для эксплуатационных наблюдений, обычно предусматривается установка временных марок на низких отметках для контроля осадок основания в период строительства. Последовательность установки временных и постоянных (эксплуатационных) марок определяется из условия непрерывности и преемственности наблюдений с начала строительства.

2.5. Геометрическое нивелирование является наиболее распространенным методом измерения осадок гидротехнических сооружений и их оснований. Превышение одной точки сооружения над другой определяют посредством горизонтального луча визирования, для чего между наблюдаемыми точками (марками) устанавливают нивелир, а на точках – рейки. Превышение определяют по разности отсчетов по двум рейкам. Подробнее о геометрическом нивелировании см. в нормативных изданиях [1], (Пособие для изучения «Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей», 14-е издание; Рекомендации П 792-83/Гидропроект).

Геометрическое нивелирование отличает высокая точность наблюдений (средняя квадратическая погрешность до 0,1 мм на 100 м нивелирного хода), а также сравнительно недорогое оборудование.

2.6. Тригонометрическое нивелирование применяют для измерения осадки точек, расположенных в труднодоступных местах (например, на плотинах в узких и глубоких каньонах). Метод заключается в определении превышения одной точки над другой путем измерения угла наклона визирного луча и расстояния от инструмента до точки визирования. При необходимости определения расстояния с высокой точностью тригонометрическое нивелирование применяют, в основном, совместно с триангуляционным методом. Для тригонометрического нивелирования возможно использование тахеометров – обычных и электронных тахеометров-автоматов. В последних весь процесс измерений и вычислений проходит автоматически до получения всех необходимых данных (наклонные расстояния между точками, горизонтальные проекции, превышения одной точки над другой).

Следует отметить, что высокая точность угловых и линейных измерений с помощью тахеометров-автоматов выпуска последних лет позволяет получить данные об осадках сооружений с точностью, приближающейся к точности геометрического нивелирования, при значительном сокращении времени до получения конечных результатов наблюдений при одновременном снижении трудозатрат. Это может служить обоснованием для более широкого применения тригонометрического нивелирования совместно с геометрическим.

2.7. Гидростатическое нивелирование для определения превышения одной точки сооружения над другой основано на законе сообщающихся сосудов. Наиболее распространенной является стационарная установка гидростатического нивелирования, состоящая из труб, горизонтально укрепленных на швах между секциями (или столбами) плотины в продольных или поперечных галереях и соединенных между собой шлангами. Система заполняется жидкостью. В местах измерения осадки над трубами закладываются специальные боковые осадочные марки с отверстиями для установки в них переносного микроизмерителя. Средние квадратические погрешности измерения составляют ±0,2 мм между точками одной гидросистемы.

Система гидростатического нивелирования должна быть привязана к исходным реперам наружной опорной сети.

Измерения уровня жидкости в системах гидростатического нивелирования можно выполнять дистанционно с использованием отечественной аппаратуры(например, преобразователя уровня жидкости типа ПУЖС конструкции НИСа Гидропроекта – АО ДИГЭС).

Примечание: Преобразователи типа ПУЖС выпускаются с пределами измерений от 32 до 500 мм, погрешность измерений – 0,6% от верхнего предела.

2.8. Для наблюдений за осадками скальных массивов могут быть использованы также скальные экстензометры. Прибор состоит из трех основ-

ных частей: анкера, стержня и индикатора (измерителя) смещений. В качестве индикатора могут быть использованы приборы ПЛДС или ПЛПС [2]. Стержень соединяет индикатор с анкером, представляющим собой механически расширяющуюся конструкцию, изготовленную на базе клина, конуса или пружины, крепящуюся к стенам скважины при помощи удара или завертывания. Погрешности измерений зависят от измерительной базы (расстояния между анкером и анкером ПЛДС) и составляют 0,025-0,25 мм.

2.9. Нивелирование высотных марок, расположенных на плотине, основании и бортах, в первый период постоянной эксплуатации (после достижения НПУ) должно производиться один раз в месяц. В дальнейшем, после того, как приращение осадки окажется меньше погрешностей измерения, нивелирование следует производить каждые два месяца в течение первого года, каждые три месяца в течение второго и третьего года, а затем два раза в год (весной и осенью). Переход на более редкие наблюдения (не реже одного раза в 5 лет) возможен после того, как наблюдениями будет установлено, что система "плотина-основание" работает упруго и необратимые процессы отсутствуют.

Для снижения погрешностей измерения осадок, вызванных колебаниями уровня воды в водохранилище и температурными деформациями бетона сооружений, измерения следует производить строго в одинаковые календарные сроки.

3. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СМЕЩЕНИЙ БЕТОННЫХ ПЛОТИН

3.1. Горизонтальное смещение бетонной плотины, особенно ее гребня, дает интегральную характеристику работы системы плотина-основание и является поэтому одним из основных диагностических параметров.

3.2. Для проведения наблюдений за горизонтальными смещениями бетонных плотин на сооружениях, основаниях и бортах создают геодезические сети - наружную и внутреннюю. Это позволяет применять одновременно несколько методов наблюдений, общее число которых, используемых на практике, доходит до 10-15. К наиболее распространенным методам наблюдений относятся:

методы, основанные на точных линейных измерениях;
методы, основанные на линейно-угловых построениях;
методы космической (спутниковой) геодезии;
створные методы – оптический, струнный;
методы измерений с помощью прямых и обратных отвесов.

Первые три метода применяют для измерений абсолютных смещений, последние – для измерения относительных смещений. Возможно использование комбинированных методов измерений, при которых концевые пункты створов, точки анкеровки отвесов включаются в общие геодезические сети, а промежуточные контрольные точки наблюдаются относительно створа или нити отвеса.

3.3. Количество и размещение знаков для наблюдений за горизонтальными смещениями бетонных плотин, их оснований и бортов определяется проектом натурных наблюдений, исходя из принятых методов наблюдений, типов плотин, их конструктивных особенностей из условия получения полных данных о величине и распределении смещений как всех секций сооружения, так и основания.

Знаки на плотине устанавливают на гребне, на выступах со стороны нижнего бьефа, в потернах и галереях внутри тела плотины. При поэтапном возведении плотины обычно предусматривается установка временных знаков.

3.4. Методы, основанные на точных линейных измерениях между опорными и контрольными пунктами на сооружении и основании, являются весьма распространенными при изучении горизонтальных перемещений гидротехнических сооружений.

Их отличают простота измерений, большой диапазон длин между пунктами (от нескольких метров до нескольких километров), высокая точность и простота измерений, возможность автоматизации наблюдений.

Квадратические погрешности наблюдений: $\Delta = (0{,}5 - 2{,}0) + Д \cdot 10^{-6}$ при измерениях светодальномерами (Д – расстояние между пунктами); Δ – 0,1÷0,2 мм при измерении проволочными лентами.

3.5. Методы, основанные на линейно-угловых построениях (триангуляции, полигонометрии и др.), отличаются тем, что позволяют охватывать наблюдениями большие территории. К достоинствам следует отнести также высокую точность наблюдений - квадратические погрешности составляют: $\Delta = Д \cdot 10^{-5} \div Д \cdot 10^{-6}$.

Недостатками этих методов являются: влияние внешних факторов на точность измерений (рефракция), а также сложность автоматизации наблюдений.

3.6. Методы космической (спутниковой) геодезии отличаются высокой точностью наблюдений при больших расстояниях между пунктами (1 – 50 км), при этом нет необходимости взаимной видимости наблюдаемых пунктов. Методы используются, в основном, при изучении плановых и высотных подвижек территории сооружений.

3.7. Створные методы измерения горизонтальных смещений являются самыми простыми и распространенными. Эти методы применяют в случае прямолинейной оси сооружений, но возможно их использование и в случае, когда ось сооружений криволинейна. Для проведения измерений на сооружении прокладывается створ, закрепленный по концам опорными пунктами. Опорные пункты, как правило, располагают за пределами сооружений, в зонах, не испытывающих деформаций от действующих нагрузок. Принципиально возможно устройство опорных пунктов на деформируемых участках основания или на крайних секциях плотины, но в этом случае включение опорных пунктов в общую геодезическую сеть (например, путем установки вблизи них обратных отвесов с анкеровкой на максимально возможной глубине) является обязательным. Между опорными пунктами по створу устанавливают контрольные знаки. По способам измерений различают следующие варианты створных методов:

оптический с установкой на контрольных пунктах неподвижных или подвижных марок;

струнный;

струнно-оптический;

способ светового луча (лазерного и др.).

Оптический створный метод используют, в основном, для измерений на поверхности сооружений (гребень, уступы и т.д.). Длина створа – от 1 км и более. Квадратическая погрешность измерений – 1-2 мм при длине створа 200 м.

Струнный и струнно-оптический (при котором створ задается струной, а для измерений применяются оптические измерительные устройства) створные методы можно использовать только в помещении (потерны, галереи и т.д.). Погрешность измерений - 0,5 мм при длине створа до 800 м. Возможна автоматизация наблюдений.

3.8. Для наблюдений за относительными горизонтальными смещениями плотин и их оснований используют прямые и обратные отвесы. Прямой отвес представляет собой груз, подвешенный на проволоке, верхний конец которой закреплен в верхней части плотины. В обратном отвесе, в отличие от прямого, нижний конец проволоки закреплен в забое скважины в основании или в нижней части плотины. Вертикальное положение проволоки поддерживается с помощью поплавка, погруженного в бак с жидкостью, или каким-либо другим способом.

Измерение по отвесам заключается в определении положения проволоки относительно сооружения по его высоте с помощью механических, оптических или дистанционных средств измерений. Смещение сооружения

в контрольной точке относительно точки закрепления нити отвеса определяют как разность измерений в двух циклах наблюдений.

На бетонных плотинах, на которых для измерения горизонтальных смещений используют отвесы, обычно устанавливают системы, каждая из которых состоит из прямого и обратного отвеса. Прямой отвес проходит от гребня плотины до ее подошвы, якорь обратного отвеса закрепляют в том же створе в основании под сооружением, а оголовок отвеса выходит на ту же отметку, где размещен груз прямого отвеса.

При большой высоте плотины один прямой отвес может быть заменен двумя-тремя более короткими. Для полного исключения влияния на результаты измерений нагрузок на основание анкер обратного отвеса должен быть заглублен от подошвы плотины на глубину, равную примерно высоте плотины. Однако, практически установить обратный отвес на глубину более 60-80 м затруднительно из-за отклонения скважины от вертикали.

Число отвесов (или систем) на сооружении зависит от формы створа и конструктивных особенностей плотины.

3.9. Измерения абсолютных горизонтальных смещений геодезическими методами (триангуляция, полигонометрия и др.) в период постоянной эксплуатации должны производиться не менее одного раза в год в первые 3-4 года после заполнения водохранилища до НПУ и далее один раз в 3-5 лет.

Измерения проводят при максимальной гидростатической нагрузке.

Измерения относительных смещений, выполняемые с помощью отвесов в первые два года постоянной эксплуатации, проводят 1-2 раза в месяц. Сроки проведения измерений назначают с учетом динамики верхнего и нижнего бьефов и температурных изменений.

При проведении наблюдений за деформациями плотин (осадки, горизонтальные смещения) даты измерений должны быть согласованы со сроками снятия показаний по контрольно-измерительной аппаратуре других видов – фильтрационной, дистанционной, в частности, для наблюдений за раскрытием швов и трещин, напряжениями в бетоне, поровым давлением и т.д.

4. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ОСАДКАМИ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ СМЕЩЕНИЯМИ

4.1. Целью анализа результатов натурных наблюдений является техническая диагностика сооружения, т.е. оценка его состояния по контролируемым параметрам: осадкам и горизонтальным смещениям. Кроме того,

на основании расчетного анализа результатов натурных наблюдений за осадками и горизонтальными смещениями могут быть достаточно точно определены деформативные характеристики как скального основания, так и сооружения [3]. Эти характеристики необходимы при создании математической модели работы сооружения для оценки его фактического состояния и составления прогнозов.

Помимо этого полученные деформативные характеристики могут быть использованы при проектировании сооружений, находящихся в аналогичных условиях, а также для контроля современных способов выбора расчетных значений характеристик.

4.2. Основными задачами обработки и анализа результатов наблюдений за осадками бетонных сооружений являются:

определение величины осадок, изменения их во времени, связь с действующими нагрузками, характер при постоянной нагрузке (рост или стабилизация);

оценка распределения осадок в пределах секций плотины в продольном и поперечном направлениях, выявление связи неравномерности осадок с инженерно-геологическими условиями основания;

оценка влияния осадок береговых массивов и ложа водохранилища на состояние бетонной плотины;

сопоставление измеренной осадки с расчетной; прогнозирование осадки на последующий период эксплуатации;

использование результатов наблюдений за осадками плотины для определения деформативных характеристик основания.

4.3. Основными задачами обработки и анализа результатов наблюдений за горизонтальными смещениями бетонных плотин являются:

оценка величины и распределения абсолютных горизонтальных смещений, их зависимость от уровня верхнего и нижнего бьефов и температуры;

оценка относительных горизонтальных смещений, их распределение по высоте плотины (прогибы), зависимость от изменений уровней бьефов и температуры;

определение и оценка смещений плотины по контакту бетон-основание, а также основания ниже контакта;

расчетный анализ измеренных смещений (определение их упругой, температурной и необратимой составляющих) с помощью регрессионных и математических моделей;

сопоставление измеренных горизонтальных смещений с расчетными; прогнозирование горизонтальных смещений на последующий период эксплуатации;

определение “активной” зоны основания;

использование результатов наблюдений за горизонтальными смещениями для определения деформативных характеристик плотины и основания.

4.4. Обработка, обобщение и анализ данных измерений осадок и горизонтальных смещений плотин, исходя из перечисленных задач, разделяются на два этапа. На первом этапе данные измерений представляются в виде:

эпюр распределения осадок в пределах каждой секции вдоль и поперек потока;

графиков изменения осадок в функции от времени и действующих нагрузок;

эпюр распределения горизонтальных смещений вдоль потока (по данным измерений геодезическими методами);

графиков изменения горизонтальных смещений точек плотины и ее основания во времени на различных отметках (по данным измерений с помощью прямых и обратных отвесов);

эпюр прогибов плотины.

На втором этапе определяется влияние каждой нагрузки на контролируемые параметры, выявляются причины отклонения контролируемых параметров от их расчетной (прогнозируемой) величины. Для этого выполняются как ретроспективные расчеты, так и анализ данных натурных измерений с использованием моделей детерминистического, вероятностного или смешанного типов. Кроме того, на этом этапе устанавливаются зависимости не только между аргументами и функциями (например, осадки или горизонтальные смещения в зависимости от отметки верхнего бьефа), но также между функциями, т.е. диагностическими параметрами (например, прогибы в зависимости от раскрытия швов).

4.5. Анализ данных измерений осадок и горизонтальных смещений позволяет разделить суммарную величину деформации на следующие основные составляющие:

упругую часть, связанную с изменениями гидростатической нагрузки;

обратимую часть, связанную с сезонными колебаниями температуры;

необратимую часть, связанную с ползучестью бетона и реологией основания [4], (Рекомендации П 53-90/ВНИИГ).

4.6. Оценка влияния температурного воздействия может быть облегчена при наличии периодов времени, в течение которых другие нагрузки и условия работы сооружения оставались неизменными. Оценка воздействия гидростатической нагрузки упрощается при возможности опорожнения и наполнения вновь водохранилища при незначительных изменениях других нагрузок.

4.7. Необратимая составляющая суммарной величины контролируемого параметра является наиболее значимой при оценке состояния сооружения и определения степени его надежности. При этом определяющим является не только величина контролируемого параметра, но также характер и скорость его изменения во времени. Незатухающий характер необратимой составляющей свидетельствует о непроектной схеме работы сооружения, а нарастание скорости ее увеличения - о предаварийном его состоянии, которое определяется расчетом как предельное либо критическое.

При незатухающем характере необратимой составляющей в контролируемых параметрах (осадка, горизонтальное смещение), свидетельствующем о наличии необратимых процессов в основании плотины или самом сооружении, следует провести тщательное визуальное обследование (осмотр) сооружения, изменить график наблюдений (участить) и рассмотреть вопрос о необходимости установки дополнительной КИА.

4.8. Наиболее простой и хорошо зарекомендовавшей себя моделью для количественного анализа измеренных суммарных смещений является вероятностная или, так называемая, статистическая модель, представляющая ряд зависимостей между нагрузками и реакциями сооружения на эти нагрузки. Зависимости получают методами регрессии на основании данных измерений ряда лет. В случаях, когда такие зависимости можно получить теоретическим путем, используются детерминистические модели. Необходимость использования принципа суммирования реакций от разных нагрузок вынуждает решать задачи в линейно-упругой постановке.

Детерминистическая модель, как правило, совершенствуется или "калибруется" в первые годы эксплуатации: уточняются прочностные и деформативные свойства материалов с тем, чтобы модель возможно более точно воспроизводила реальную работу сооружения. Имеющийся отечественный и зарубежный опыт показывает, что в одних случаях приемлема первая, а в других - вторая модель. Следует отметить, что вероятностная модель является несколько формальной, поскольку не отражает физическую сущность тех или иных процессов, происходящих в сооружении: раскрытия швов, изменения модуля деформации сооружения и основания и др. Недостатком же детерминистической модели является некоторая схематизация работы сооружения, предусматривающая ряд допущений [5,6].

4.9. На всех этапах обработки и анализа данных наблюдений за осадкой и горизонтальными смещениями рекомендуется использование ЭВМ, что позволяет существенно ускорить анализ и повысить его достоверность. Современный уровень обработки и анализа данных натурных наблюдений требует использования информационно-вычислительных систем.

4.10. На основании количественного анализа данных натурных наблюдений и выполненных ретроспективных расчетов сооружения составляется прогноз изменений контролируемых параметров на период постоянной эксплуатации сооружения. При этом определяются контрольные или, так называемые, предельно допустимые значения* измеряемого параметра и возможные пределы их изменений, вызванных изменением внешних нагрузок.

Оценка состояния сооружения на том или ином этапе нормальной эксплуатации выполняется путем сопоставления измеренной величины контролируемого параметра – $u_{изм}$ (осадки, горизонтального смещения и др.) с прогнозируемой $u_{пр}$. Разность между прогнозируемой и измеренной величиной является показателем неизменности условий работы сооружения:

$$\Delta = u_{пр} - u_{изм}. \qquad (1)$$

Состояние сооружения по контролируемому параметру признается отвечающим условиям нормальной эксплуатации, если

$$0 < \Delta \leq \mu, \qquad (2)$$

где μ – средняя квадратическая погрешность модели.

В случае, если $\mu < \Delta \leq 2\mu$, требуется анализ значения Δ в предыдущих циклах наблюдений. Если эти значения носили случайный характер и не выходили из интервала (2), то состояние сооружения оценивается как отвечающее нормальной эксплуатации, т.е. работоспособным. В противном случае производят экспертный анализ результатов наблюдений.

В случае, если $\Delta > 2\mu$, требуется анализ других контролируемых параметров за этот же период времени. При их отклонении от контрольной (допустимой) величины окончательное заключение о состоянии сооружения составляют также на основе экспертной оценки.

4.11. По измеренным в натуре осадкам сооружения и его горизонтальным смещениям могут быть определены осредненные деформативные характеристики как самого сооружения, так и скального основания: модуль деформации скалы, коэффициент объемной пористости скального основания и модуль упругости сооружения (конструкционный модуль) [3]. При этом используются соответствующие зависимости теории упругости.

---

* *Понятие "предельно допустимое значение" (ПДЗ) является условным, т.к.* резервы надежности реального сооружения неизвестны. Под ПДЗ следует понимать значение какого-либо контролируемого параметра при экстремальных сочетаниях действующих нагрузок.

Приложение

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА СМЕЩЕНИЙ КРАСНОЯРСКОЙ И МИАТЛИНСКОЙ ПЛОТИН

Комплексный анализ измеренных суммарных смещений гребня Красноярской и Миатлинской плотин выполнялся с помощью статистических моделей.

Статистическая модель основывается на следующих предпосылках:

контролируемый параметр (смещение) зависит от конечного числа переменных факторов, основными из которых являются: воздействие воды водохранилища, температура и время;

неизвестная зависимость между контролируемым параметром и факторами, его определяющими, выражается алгебраической функцией переменных. Вид этой функции должен наиболее точно отражать влияние переменных факторов на контролируемый диагностический параметр. Подобранная таким образом модель работы сооружения включает переменные коэффициенты;

определение коэффициентов (тарировка модели) производится по данным натурных измерений методом наименьших квадратов. Модель тем лучше будет отражать действительность, чем большее число измерений диагностического параметра используется для определения коэффициентов;

предполагается, что модель отражает фактическую работу сооружения не только за тот период времени, в который производились измерения, используемые для ее тарировки, но и позволяет определить работу сооружения в будущем, т.к. является прогностической.

Смещения бетонной плотины в эксплуатационный период обусловлены:

а) воздействием воды водохранилища;

б) температурными изменениями в теле плотины, зависящими от изменений температуры внешней среды (воздух, вода);

в) неупругими деформациями основания, берегов и материала плотины.

Примечание: предполагается, что температурные воздействия строительного периода прекратились.

Первые два фактора имеют периодический характер. Неупругие деформации приводят к наличию необратимой составляющей.

Горизонтальное смещение какой-либо точки плотины выражается как

$$U = f(H,T,\tau), \qquad (1)$$

где U – горизонтальное смещение, мм; H – уровень нижнего бьефа, м; T – температура, °C; τ – время, сут.

При условии, что воздействия определяющих факторов независимы друг от друга, (1) будет иметь вид:

$$U = f_1(H) + f_2(T) + f_3(\tau). \tag{2}$$

Упругая составляющая смещений от гидростатической нагрузки в зависимости (2) представима полиномом третьей степени:

$$f_1(H) = a_1(H - H_0) + a_2(H - H_0)^2 + a_3(H - H_0)^3, \tag{3}$$

где H_0 – уровень бьефа, принимаемый за начальный; a - неизвестные коэффициенты.

Температурная составляющая смещений от изменения температуры внешней среды может быть представлена тригонометрическим полиномом:

$$f_2(T) = a_0 + a_4 \cos\frac{2\pi}{P}\tau + a_5 \sin\frac{2\pi}{P}\tau + a_6 \cos\frac{4\pi}{P}\tau + a_7 \sin\frac{4\pi}{P}\tau, \tag{4}$$

где P – период, равный году.

Необратимые смещения могут быть представлены одной из следующих зависимостей:

$$f_3(\tau) = a_8\left(1 - e\right)^{-\alpha\tau}; \tag{5}$$

$$f_3(\tau) = a_8 \frac{\tau}{\tau + \beta}; \tag{6}$$

$$f_3(\tau) = a_8\tau + a_9 \ln\tau. \tag{7}$$

Зависимости (5) и (6) имеют асимптоты: при $\tau \to \infty$ $f_3(\tau) \to a_8$. Такой характер необратимой составляющей присущ исправно работающему сооружению. Входящие в зависимости (5) и (6) параметры α и β требуют разработки специальных алгоритмов для их определения или использования метода последовательных приближений.

Принимая во внимание (3), (4) и (5),статистическая модель имеет вид:

$$\begin{aligned} U = {} & a_1\left(H - H_0\right) + a_2\left(H - H_0\right)^2 + a_3\left(H - H_0\right)^3 + a_4 \cos\frac{2\pi}{P}\tau + \\ & + a_5 \sin\frac{2\pi}{P}\tau + a_6 \cos\frac{4\pi}{P}\tau + a_7 \sin\frac{4\pi}{P}\tau + a_8\left(1 - e^{-\alpha\tau}\right) + a_0, \end{aligned} \tag{8}$$

где a_0 – свободный член, представляющий температурное смещение в момент начала изменений.

По результатам статистического анализа горизонтальных смещений Красноярской и Миатлинской плотин для известных режимов подъемов и сработки водохранилищ, а также изменений среднедекадной температуры воздуха во время нормальной эксплуатации этих сооружений были построены номограммы смещений гребня плотин, позволившие осуществлять оперативный эксплуатационный контроль за ними.

Правая часть номограммы (рис.1) представляет собой сумму смещений от гидростатики и температуры, т.е. $U_{гид} + U_{темп}$. Каждая синусоидальная кривая соответствует температурным смещениям в зависимости от момента времени (периода года) при определенном уровне верхнего бьефа. Расстояние между прямыми, расположенными под углом 45° в левой части номограммы, соответствует необратимым смещениям $U_{необ}$, происходящим в течение года. Суммарные смещения U определяются по шкале, расположенной в верхней части номограммы. Порядок определения суммарных смещений в зависимости от периода соответствующего года и уровня верхнего бьефа показан пунктирной линией.

Контроль осуществляется следующим образом:

в любой момент эксплуатации при известной отметке уровня верхнего бьефа измеряется тем или иным способом величина суммарного перемещения гребня плотин;

по номограмме для этого же момента времени, при этом же уровне воды в верхнем бьефе определяется контрольная величина суммарного перемещения гребня плотины;

измеренная величина смещения сопоставляется с контрольной величиной. Если они совпадают или расхождение между ними составляет не выше 10-12%, то работа сооружения считается нормальной. Если расхождение составляет больше указанной величины, это свидетельствует о появлении аномалии в работе сооружения и является сигналом эксплуатационному персоналу для принятия адекватных мер*.

При соответствующем уровне компьютеризации натурных наблюдений на сооружении использование вышеописанной номограммы не требуется. Превышение фактической величины контролируемого параметра над ее прогнозируемым значением фиксируется на компьютере определенным сигналом.

---

* Более точная оценка состояния сооружения по контролируемому параметру производится в соответствии с п.4.7 настоящих Рекомендаций.

Номограммы горизонтальных смещений гребня Красноярской и Миатлинской плотин представлены соответственно на рис. 1 и 2.

Красноярская плотина на р.Енисей - плотина гравитационного типа, максимальной высотой 124 м, с расчетным напором 93 м и призмой сработки 18 м имеет длину по гребню 1150 м. Плотина с вертикальной напорной гранью, заложение низовой 0,8; разрезка температурно-осадочными швами на секции длиной по 15 м. Профиль плотины разрезан цементируемыми швами на 7 столбов шириной по 11,5 м. Номограмма горизонтальных смещений построена для одной из секций станционной плотины. Измерение горизонтальных смещений гребня выполняется прямым отвесом.

Миатлинская плотина на р.Сулак – арочная плотина высотой (с учетом "пробки") 86,5 м, длиной по гребню 179 м. Арочная часть плотины имеет высоту 73 м. Толщина арок изменяется от 11,5 м (на контакте с "подушкой") до 6,3 м на гребне. Коэффициент стройности плотины – 0,12. Водохранилище суточного регулирования. Максимальные колебания УВБ в течение года не превышают 10 м. НБ отсутствует.

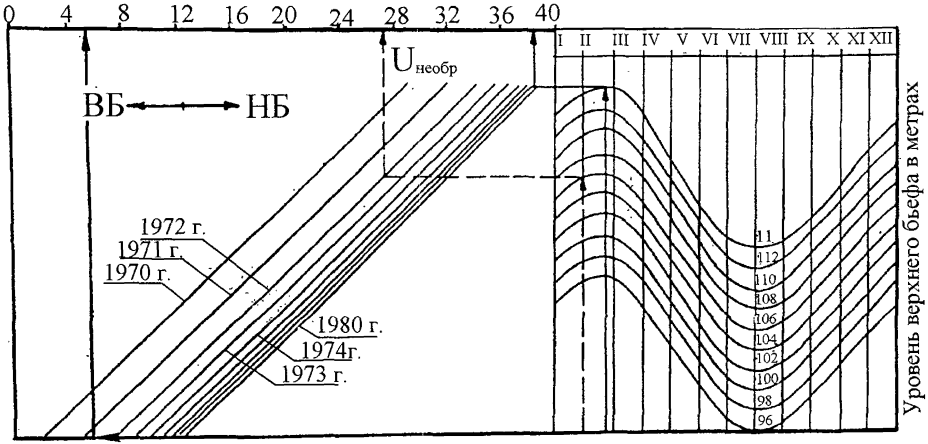

Рис.1. Номограмма горизонтальных перемещений гребня Красноярской плотины.

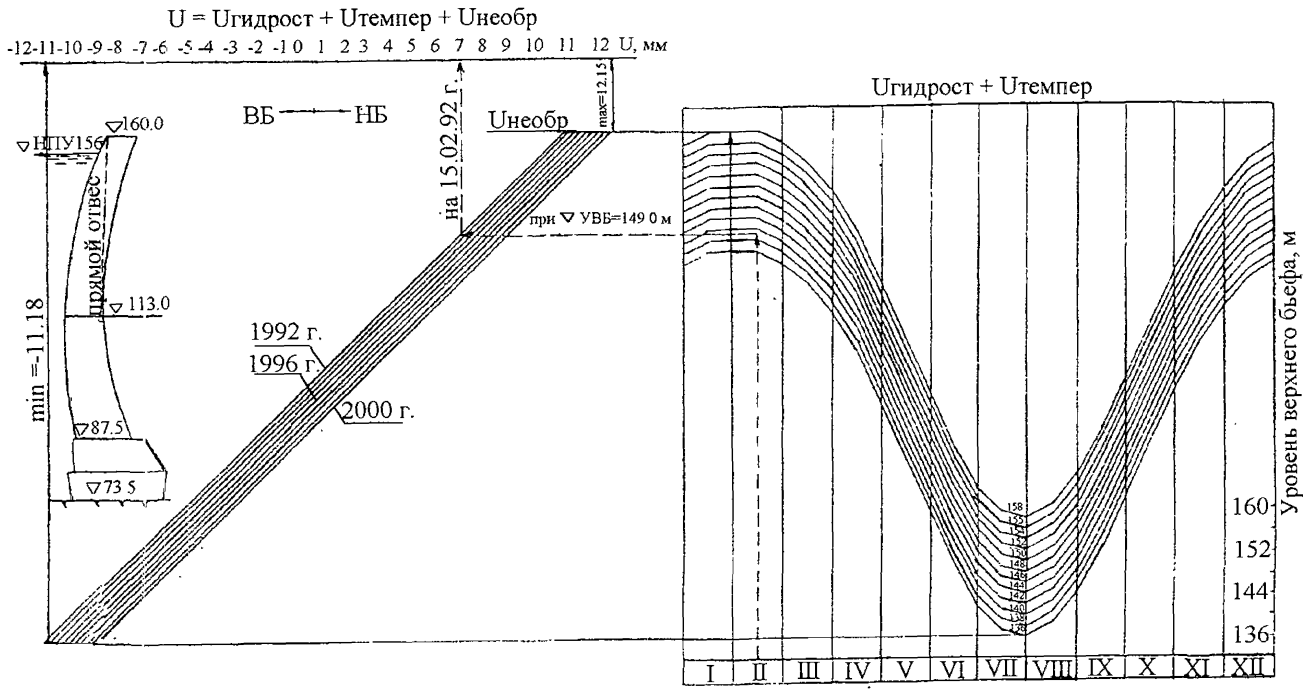

Рис.2. Номограмма горизонтальных перемещений гребня Миатлинской плотины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Карлсон А.А.** Руководство по натурным наблюдениям за деформациями гидротехнических сооружений и их оснований геодезическими методами: П-648/ Гидропроект. М., 1980.

2. **Контрольно-измерительные приборы** и средства автоматизации. Номенклатурный каталог на серийно выпускаемые оборудование и изделия. Энергетика и электрификация. М.: Информэнерго, 1988.

3. **Урахчин В.П., Александровская Э.К., Соколов И.Б.** Определение модулей деформации плотины и ее скального основания по данным натурных наблюдений за перемещениями сооружения // Гидротехническое строительство. 1981. № 10.

4. **Александровская Э.К.** Методы измерений и анализа перемещений высоких бетонных плотин (обзор). М.: Информэнерго, 1978.

5. **Александровская Э.К.** О контроле за высокими бетонными плотинами во время их возведения и эксплуатации // Гидротехническое строительство. 1989. № 12.

6. **Бердичевский Г.Ю., Бронштейн В.И., Фрадкин Б.В.** Использование математической модели в целях интерпретации данных натурных наблюдений за арочной плотиной Ингури ГЭС // Гидротехническое строительство. 1992. № 10.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3

1. Общие положения 4

2. Методы измерения осадок бетонных плотин. 6

3. Методы измерения горизонтальных смещений бетонных плотин . . 9

4. Методы обработки и анализа результатов натурных наблюдений за осадками и горизонтальными смещениями. 12

Приложение. Результаты анализа смещений Красноярской и Миатлинской плотин 17

Список литературы. 23

Редактор *Т.С. Артюхина*
Корректор *Т.М. Бовичева*
Компьютерная верстка *Н.Н. Седова*

Лицензия ЛР № 020629 от 14.01.98.
Подписано к печати 09.10.2001. Формат 60x90 1/16.
Бумага типографская № 1. Печать офсетная.
Печ.л. 1,5. Тираж 300. Заказ 178.

Издательство и типография ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева».
195220, Санкт-Петербург, Гжатская ул., 21.