

**КОНТРОЛЬ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ БЕТОННЫХ ПЛОТИН В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ
ПЕРИОД (НА ПРИМЕРЕ ОПЫТА ПРИМЕНЕНИЯ В УСЛОВИЯХ
САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС)**

УДК 622.831

Барышников В.Д.

*Учреждение Российской академии наук «Институт
горного дела Сибирского отделения РАН»*

Нарушения устойчивости элементов инженерных сооружений, вызванные природными и техногенными воздействиями, могут привести к негативным последствиям и авариям. Многие бетонные гидротехнические сооружения (ГТС) в нашей стране находятся в эксплуатации длительное время (30 лет и более), что требует постоянного контроля их состояния, актуальность которого по мере старения сооружений должна возрастать. Многолетними натурными наблюдениями на ряде бетонных плотин установлены отклонения от проектных предположений в характере взаимодействия системы «плотина – скальное основание»: появление нерасчетных напряжений и трещин на контактах с основанием и в теле плотины; изменения водопроницаемости и деформационных свойств скального основания; снижение устойчивости береговых примыканий [1, 2]. Крупные гидроузлы с высокими плотинами ($H > 100$ м) и значительными изменениями уровня водохранилищ требуют особого внимания с учетом значительных техногенных нагрузок (статических и динамических) и активного фильтрационного влияния на скальное основание.

Традиционно контроль напряженно-деформированного состояния (НДС) ГТС осуществляется на основе регулярно проводимых наблюдений с использованием закладной контрольно-измерительной аппаратуры (КИА). Закладная КИА (струнные датчики деформаций и температур) размещается, как правило, по створному принципу в наиболее характерных сечениях плотины при её строительстве. Такой принцип размещения в сложных инженерно-геологических условиях не всегда отражает особенности статической работы сооружения, определяемые, прежде всего, геологическим строением и механическим состоянием скального основания. Во время строительства и начального периода эксплуатации ГТС (в период адаптации «плотина – основание») могут обнаружиться некоторые отклонения в деформировании плотины от проектных предположений [3]. Причинами этого могут быть не только геолого-структурные особенности скального массива, но и технологические влияния при сооружении плотины (технология укладки бетона и цементации швов, температурные влияния, последовательность и этапность возведения и нагружения плотины и т.п.), учесть которые в проектных решениях не всегда удается.

Специфика экспериментальной оценки НДС заключается в пересчете измеренных с помощью закладной КИА деформаций в напряжения на основе использования, как правило, аппарата теории упругости, предполагающего сплошность, однородность и изотропность бетонного массива. Поэтому достоверность полученных результатов во многом определяется тем, насколько точно выбранная расчетная модель отвечает реальному механическому состоянию и свойствам контролируемого участка массива. Если установкой дополнительных контрольных датчиков можно в какой-то степени оценить соответствие принятой модели (иначе, методические погрешности), то в отношении использования показателей упругих свойств бетона вопрос остается нерешенным. Характеристики, определенные при испытании бетонных образцов, как правило, отличаются от полученных в натуре, а различие величин модуля упругости нередко оказывается существенным. Следует также отметить, что инструментальные погрешности, свойственные самому датчику, со временем возрастают. Закладной датчик, установленный в массиве еще на стадии строительства, уже не поддается каким-либо регулировкам, а его характеристики – строгой метрологической аттестации. Чем больше срок работы КИА, тем выше вероятность возрастания погрешности оценки величин напряжений (при этом приращения напряжений за отдельный цикл наполнения – сработки водохранилища могут сохраняться или изменяться).

Всё вышеизложенное, а также потеря работоспособности части датчиков в процессе эксплуатации по различным причинам приводит в конечном счете к снижению надежности контроля за состоянием сооружения в целом.

В работе [4] предложен один из подходов к решению вопросов расширения сети наблюдений за НДС ГТС на участках отсутствия или выхода из строя КИА. Суть его заключается в следующем. Количественная оценка начальных (действующих в данное время) напряжений выбранного участка производится с использованием скважинных геомеханических методов, а последующий контроль за изменением НДС – по деформациям стенок и контура галерей вследствие температурных изменений, геодинамических и техногенных воздействий.

Для количественной оценки величин напряжений могут быть использованы как методы измерений в глубине (до 10 м от обнажений) бетонного массива (метод параллельных скважин [5, 6]), так и на поверхности бетонных обнажений (методы щелевой и частичной разгрузки скважиной [7]). Важным достоинством указанных методов является возможность определения деформационных свойств бетона непосредственно на участке замера напряжений путем деформирования массива с применением специальных нагрузочных устройств и оценки правомерности основных допущений расчетной модели (упругость, изотропность и однородность материала). Использование в методах измерительных схем,

обеспечивающих избыточность полученной информации, позволяет судить о качестве каждого конкретного опыта на основе оценки погрешностей определения компонентов напряжений [6, 7]. Проведение повторных замеров напряжений на данном участке позволяет оценить приращения напряжений за период между циклами измерений. Опыт натурной апробации данных методов в бетонной плотине СШ ГЭС (рис. 1, 2) свидетельствует о принципиальной возможности их применения для организации системы контроля НДС элементов сооружений в местах отсутствия или выхода из строя закладной КИА, а также уточнения результатов численных расчетов НДС сооружений [5, 8].

В качестве элемента системы контроля НДС ГЭС в эксплуатационный период предложен деформационный метод, основанный на измерениях деформаций контура и стенок галерей (потерн) плотины [8-10]. Равномерное размещение галерей в теле плотин обеспечивает доступ и возможность контроля приращений напряжений в процессе их эксплуатации. Незначительные затраты на реализацию метода (из-за отсутствия буровых работ для размещения датчиков в глубине массива), принципиальная возможность автоматизированного съема показаний (при использовании, например, накладных телетензометров) делают его привлекательным как с экономической точки зрения, так и с точки зрения оперативности и надежности контроля в целом.

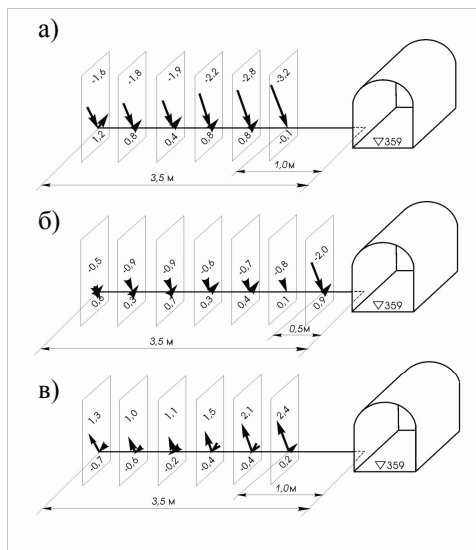


Рис. 1. Величины напряжений (МПа) в конце I столба секции 33 (отм.+359,000):
 а – при отметке водохранилища +500,000 (УМО); б – при отм.+540,000 (НПУ);
 в – изменения напряжений при наполнении водохранилища от УМО до НПУ

смещения реперов пересчитывались в деформации [10]. Расчет приращений напряжений по измеренным деформациям проводился с учетом поправок на перераспределение напряжений в окрестности галерей. Коэффициенты концентрации напряжений при этом определялись по результатам численных решений задач теории упругости для типовых форм сечений галерей и потерн [8-10].

На рис. 3,а приведены приращения консольных деформаций при наполнении и сработке водохранилища в 2005-2006 гг. Полученные результаты свидетельствуют об их удовлетворительной сходимости. Для сравнения приведены графики приращений консольных деформаций при наполнении водохранилища в доремонтный (1996 г.) и послеремонтный (2006 г.) периоды (рис. 3,б). Анализ графиков показывает более существенные расхождения измеренных деформаций как в верхней, так и нижней частях плотины.

Рис. 4 отражает величины и характер остаточных деформаций за период с 1996 г. (начальный отсчет) по 2006 г.

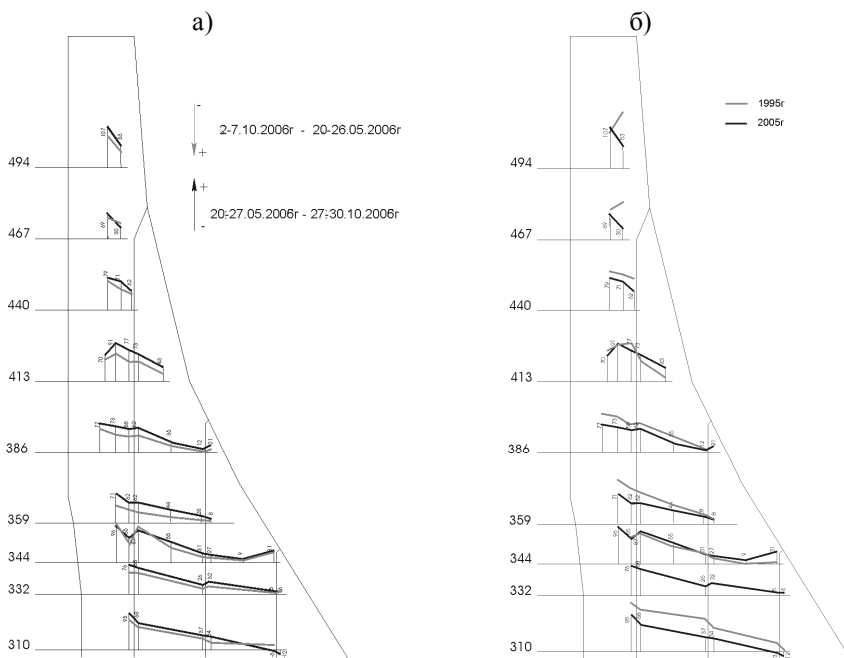


Рис. 3. Приращения консольных деформаций ($E \cdot 10^6$) стенок потерн ключевой секции плотины:

- а – при сработке водохранилища в 2005 г. и наполнении в 2006 г.;
- б – при наполнении водохранилища в 1996 и 2006 гг.

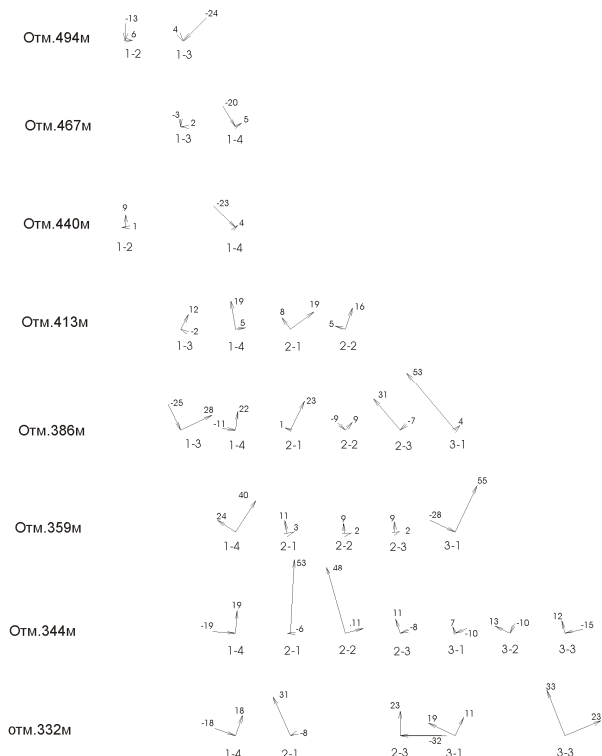


Рис. 4. Остаточные деформации ($E \cdot 10^6$) стенок потерн ключевой секции плотины за период 1996-2006 гг.

За десятилетний период наблюдений произошли значительные изменения в характере деформирования верхней (выше отм.+440,000 и нижней (отм.+310,000) частях плотины. Изменения (уменьшения консольных растягивающих деформаций) можно объяснить снижением отметки НПУ на 1 м, а также уменьшением противодавления на контакте нижней части плотины со скальным основанием. При этом отмечается увеличение консольных деформаций во втором столбе на отм.+413,000 и в 3-м столбе от отм.+344,000 до отм.+386,000. Такая особенность деформирования плотины может быть вызвана повышением отпора со стороны низовой грани плотины, испытывающей дополнительную пригрузку за счет накопления прогибов плотины в нижний бьеф. Остаточные деформации стенок потерн ключевой секции существенно различаются как по высоте плотины, так и их удалении от наружных граней (напорной и низовой). Наибольшие остаточные деформации наблюдаются в нижней час-

Предотвращение аварий зданий и сооружений

ти плотины, в конце первого столба; во втором столбе и на участках реперных станциях вблизи низовой грани. В потернах ниже отм.+440,000 остаточные деформации носят сдвиговый или растягивающий характер. На отм.+440,000 и выше отмечается дополнительное обжатие.

На рис. 5 приведены приращения напряжений на низовой грани плотины вблизи скального основания за период с 1995 по 2005 г. Следует отметить хорошую сходимость между циклами наполнения в различные годы. В то же время отмечается неравномерная пригрузка секций по створу плотины. Особо следует отметить накопление остаточных деформаций за период наблюдений (рис. 6), что свидетельствует о росте абсолютных величин деформаций в низовом клине.

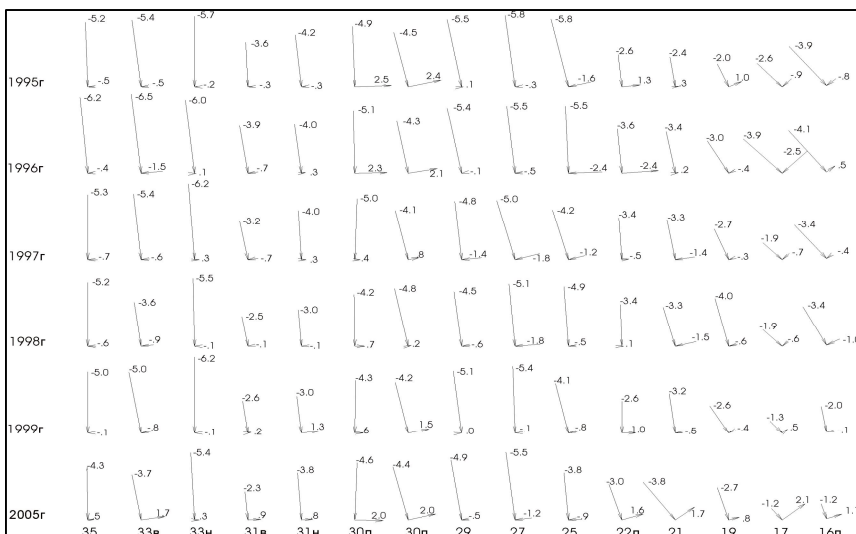


Рис. 5. Приращения напряжений (МПа) в секциях низовой грани плотины (отм.+310,000) при наполнении водохранилища от УМО до НПУ за циклы наблюдений 1995-2005 гг.

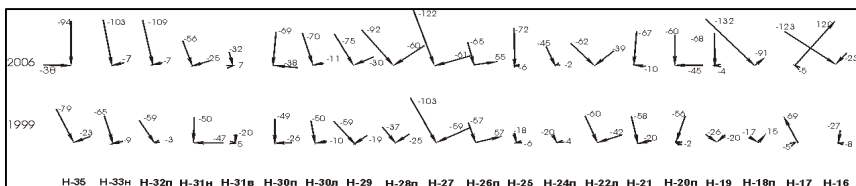


Рис. 6. Накопление остаточных деформаций ($E \cdot 10^6$) в низовой грани плотины (отм.+310,000) относительно начального цикла измерений (УМО 1996 г.) на УМО 1999, 2005 гг.

Опыт оценки особенностей НДС конструктивных элементов плотины СШ ГЭС свидетельствуют об удовлетворительных результатах применения деформационного метода контроля состояния сооружения в эксплуатационный период. Результаты апробации предложенного метода контроля НДС плотины позволяют сформулировать следующие этапы его реализации:

- оценка коэффициентов концентрации напряжений на контурах галерей и потерн;
- определение приращений напряжений в процессе наполнения водохранилища и эксплуатации сооружения (остаточные напряжения);
- определение абсолютных величин напряжений в бетоне плотины;
- определение деформационных и прочностных свойств бетона непосредственно на замерных станциях;
- автоматизация процесса измерений деформаций сооружения.

Заключительный этап организации системы деформационного мониторинга связан с выбором наиболее ответственных участков сооружения, где величины напряжений по результатам предварительных этапов наблюдений имеют наибольшие значения, либо имеет место рост остаточных деформаций.

Таким образом, полученный опыт и методические принципы организации системы контроля НДС бетонных плотин с использованием комплекса методов экспериментальной оценки напряжений и деформаций контуров галерей, совершенствование и автоматизация системы сбора и обработки информации позволят осуществлять контроль НДС плотины в эксплуатационный период при невозможности использования закладной КИА.

Библиографический список

1. Марчук А.Н., Марчук Н.А. Плотины и геодинамика: Опыт натурных наблюдений. – М.: ИФЗ РАН, 2006. – 145 с.
2. Бразгалов В.И. Двадцатилетний опыт эксплуатации Саяно-Шушенского гидроузла // ГТС. – 1998. – №9.
3. Кузьмин К.К. Некоторые вопросы напряженного состояния и надежности плотины Саяно-Шушенской ГЭС // ГТС. – 1998. – №9.
4. Курленя М.В., Барышников В.Д., Гахова Л.Н. Об одном подходе к организации и проведению контроля напряженно-деформированного состояния гидротехнических сооружений // ГТС. – 1998. – №2.
5. Курленя М.В., Барышников В.Д., Гахова Л.Н. Опыт применения метода параллельных скважин для оценки действующих напряжений в бетонном массиве // ГТС. – 1998 – №9.

6. А.с. №877005 СССР. Способ определения напряженно-деформированного состояния в массиве горных пород / М.В. Курленя, В.Д. Барышников, Г.Ф. Бобров, С.Н. Попов, В.К. Федоренко // БИ. – 1981. – №40.
7. Иванов В.С., Барышников В.Д. Развитие на метода за частично разто-варване за *in situ* геомеханични изследвания / Материалы IV Между-народной конференции по геомеханике. – Варна, Болгария. – 2010.
8. Барышников В.Д., Гахова Л.Н. Некоторые особенности развития де-формационных процессов при эксплуатации гидросооружения СШ ГЭС, установленные нетрадиционными методами наблюдений // ГТС. –1999. – №3.
9. Контроль напряженно-деформированного состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС / В.Д. Барышников, В.И. Брызгалов, В.А. Булатов, Л.Н. Гахова // ГТС. – 2000. – №10.
10. Барышников В.Д., Гахова Л.Н. К вопросу диагностики и контроля НДС конструктивных элементов плотины СШ ГЭС / Материалы V Всероссийской конференции «Механика микронеоднородных мате-риалов и разрушение» (Электронный ресурс). – Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2008.