Журнал
«Энергетическое строительство»,
1993, № 10. С. 44-47

10. **Фундаменты** машин тепловых электростанций / А. И. Абашидзе, Ф. В. Сапожникоз, А. Т. Казаджян. М.: Энергия, 1975.
11. **Вибрационная** надежность мощных турбогенераторов / Л. Я. Станиславский, Л. Г. Гаврило, Э. С. Остерник. М.: Энергия, 1975.
12. **Рунов Б. Т.** Исследование и устранение вибрации паровых турбоагрегатов.—Дисс. на соиск. учен. степени д-ра техн. наук. М., ВТИ, 1975.
13. **Maschienenfundamente** / Redaktion H. Klotz // Jahrbuch Bautechnik in Kraftwerksbau. Essen. 1982. P. 275—302.
14. **Костюк А. Г.** Динамика и прочность турбомашин. М.: Машиностроение. 1982.
15. **Винокуров И. В.** Виброхарактеристики мощных турбоагрегатов в условиях эксплуатации // Промышленные исследования и отработка оборудования турбоустановок. Труды ЦКТИ. Вып. 257. Л., 1989. С. 61—67.
16. **Тонд А.** Динамика роторов турбогенераторов / Под. ред. В. И. Олимпиева. Л.: Энергия, 1971.

Вибрация основных сооружений Саяно-Шушенской ГЭС при небольших расходах через водосбросы

Инженеры В. В. БУХАНОВ, Т. В. ГАВРИЛЕНКО, В. А. УЛЯШИНСКИЙ, В. Н. ШАБАНОВ (СибВНИИГ)

Оценке динамических характеристик работы сооружений Саяно-Шушенской ГЭС всегда уделялось большое внимание. Натурные исследования вибраций секций плотины, крепления дна водобойного колодца, секций раздельного устоя, правобережной подпорной стенки и других сооружений проводились на различных этапах возведения гидроузла [1]. Аналогичные исследования выполнены и в 1991 г.— впервые при УВБ, достигавшем НПУ и даже несколько превосходившем его. Хотя пропускаемые расходы через водосбросы были сравнительно невелики (наибольший сбросной расход составлял всего 7 % расчетного максимального расхода), результаты исследований, несомненно, представляют интерес для прогнозирования надежности гидроузла, поскольку именно такие расходы скорее всего будут характерны во время его эксплуатации.

Режимы работы водосбросов в период исследований 1991 г. представлены в табл. 1. Уровень верхнего бьефа в это время изменялся в пределах отметок 540,10—540,25 м, а расходы через агрегаты ГЭС — в пределах 1950—2100 м^3/с. Степень открытия затворов на водосбросах составляла 20 %.

Особое внимание было уделено исследованиям динамических характеристик работы крепления дна водобойного колодца. Разрушенная в 1988 г. зона крепления была забетонирована блоками с принятыми ранее [1, 2] плановыми размерами 6,25×7,5 м. В остальном конструкция восстановленного крепления существенно отличалась от предшествующей — в межблочных швах установлены уплотнительные шпонки на расстоянии 0,4 м от свободной горизонтальной грани блока, проведена цементация межблочных швов с использованием закладной цементационной арматуры. Кроме этого были выполнены: анкеровка всех блоков стальными пассивными анкерами, а в районе падения струи на дно колодца — преднапряженными анкерами с усилием напряжения 1000—1100 кН в количестве до 15 шт. на блок (анкеры заглублены в скальное основание на 20—25 м); установка в межблочных швах низовой части крепления так называемых опорных шпонок (забетонированные вертикальные скважины диаметром 105 мм и глубиной 3 м).

Таблица 1. **Режимы работы водосбросов**

Номер режима	Работают водосбросные секции	Общий расход через водосбросы, м^3/с
1	43	200
2	39, 43, 47	600
3	39, 44, 47	600
4	39, 43, 44, 45, 47	1000

При бетонировании блоков крепления использовалось трубное охлаждение бетона.

В результате внесенных изменений в конструкцию крепления удалось повысить его монолитность на отремонтированном после разрушений 1988 г. участке. И все же, как показали натурные наблюдения, получить цельную монолитную систему блоков не удалось: раскрылись отдельные межблочные швы между блоками и скальным основанием; в ряде блоков до натяжения преднапряженных анкеров образовались температурные трещины с раскрытием до 0,3 мм. Однако раскрытия межблочных и контактных швов были существенно меньшие, чем в предшествующие годы.

Вследствие разрушения дна колодца в 1988 г. вся контрольно-измерительная аппаратура (КИА), использовавшаяся в предыдущих исследованиях [2], вышла из строя. Новая КИА устанавливалась лишь в новые бетонируемые блоки. Аппаратура размещена, главным образом, по оси секции 44, а также в створе секции 43 (рис. 1). Вертикальные и горизонтальные вибрации блоков измерялись вибропреобразователями ОСП-2М, пульсации давления — преобразователями ДД-10

Результаты натурных исследований показали, что, как и в предшествующие годы [1, 2], горизонтальные и вертикальные виброперемещения блоков крепления вынужденные. Источником вибраций является в основном пульсация давления потока. Ведущие частоты колебаний совпадают с ведущими (преобладающими) частотами пульсационного воздействия. Характер пульсационного воздействия на опытных блоках практически не изменялся при смене режимов работы водосбросов: стандарты пульсаций давления в точках измерения были в пределах 10—30 кПа и имели узкополосный спектр. Пример такого спектра показан на рис. 2. В спектрах вибрации некоторых блоков также присут-

ствуют гармоники на частоте, соответствующей оборотной частоте гидроагрегата (2,38 Гц).

Стандарты вертикальных и горизонтальных вибраций блоков крепления приведены в табл. 2.

Виброперемещения блоков имели нестационарный характер, что дало большой разброс их значений для гидравлически схожих режимов; не было замечено тенденции к росту вибраций с увеличением времени пропуска паводка, как это было, например, в 1988 г. [1, 2].

Обращает на себя внимание следующее обстоятельство: несмотря на меньшие удельные и общие сбрасываемые в 1991 г. расходы, уровень вибраций блоков по всем направлениям значительно (в 3—7 раз) превышел уровень, характерный для вибраций блоков в предшествующие годы [2]. Этот факт может быть объяснен возросшей взаимосвязью деформационных процессов, происходящих на разных участках крепления, и снижением сопротивления колебаниям блоков в воде, вызванным омоноличиванием межблочных швов и устройством уплотнительных шпонок в швах. Каковы бы ни были причины увеличения вибрации блоков, следует еще раз подчеркнуть, что выполненные мероприятия — анкеровка блоков, цементация швов (увеличившие жесткость крепления), устройство уплотнительных шпонок — существенно повлияли на динамические характеристики работы блоков крепления. Об этом отчасти свидетельствуют и данные рис. 3, на котором изображены графики функций спектральной плотности вибраций блоков поперек потока, умноженных на частоту (приведенные зависимости характеризуют вклад в дисперсию на различных частотах). На рис. 3 хорошо видно, что график, построенный по данным измерения вибраций в 1991 г., сместил-

Таблица 2. **Стандарты вибраций блоков крепления**

Направление перемещений	Номер блока	Стандарты вибраций, мкм, при режимах работы водосбросов по табл. 1		
		2	3	4
Вертикальное	Г9-34	8,5*	3	6,5
	Г9-33	2,5	1,3	2,1
	Г8-34	21*	5	11*
	Г8-33	7	13*	5
	Г7-34	18	4—3,8	3
	Г7-31	1,5	4	4
	Д7-34	17	6	7
	Д7-33	13,5	6	3,5
Горизонтальное вдоль потока	Г10-33	8,5	—	3
	Г9-33	3,5	—	3,5
	Г8-34	1—3	5	1,5
	Г8-33	5	5,4	2,2
	Г7-31	—	3,8	4
	Д7-34	4	4,5	3,6
	Д6-34	18	—	2,4
Горизонтальное поперек потока	Г10-33	7*	3,8	6
	Г9-34	2,2—2,5	4	8
	Г9-33	6	—	1,8
	Г8-33	7,5	—	3,3
	Г7-34	3,8—2,4	4,1	2,2
	Г7-31	3,6—6,8	3,2	3,5
	Д7-34	1,7—3,6	3,4	16*
	Д7-33	4,7—6,4	—	1,6
	Д6-34	1,9	2,8	3,5

Примечание. Звездочками отмечены оценки стандартов, которые могли быть завышены при цифровой фильтрации процессов вследствие попадания энергии из области шума в полосу частот полезного сигнала.

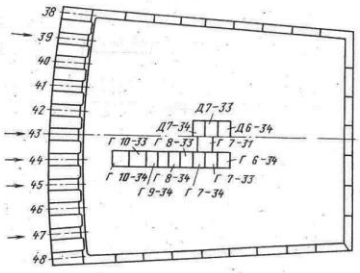

Рис. 1. Схема расположения блоков крепления дна водобойного колодца, оснащенных контрольно-измерительной аппаратурой

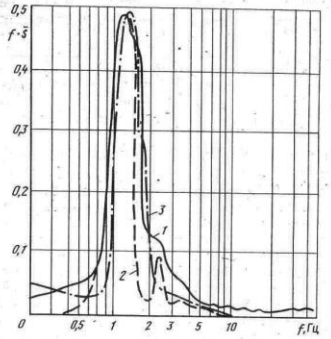

Рис. 2. Нормированные функции спектральной плотности, умноженные на частоту:

1 — пульсация давления (блок Г10-34); *2* — вертикальные вибрации (блок Г7-33); *3* — горизонтальные вибрации (блок Г7-33)

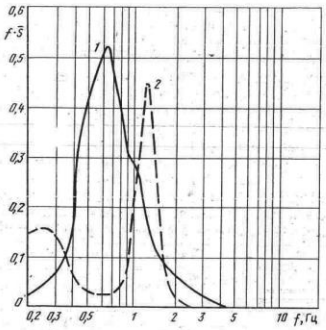

Рис. 3. Нормированные функции спектральной плотности горизонтальных вибраций блоков поперек потока, умноженные на частоту:

1 — блок Г8-4; 1988 г. (блок Г8-34, 1991 г.); *2* — блок Г8-33, 1991 г.

Таблица 3. **Стандарты (числитель) и максимальные размахи (знаменатель) вибраций секций плотины**

Номер режима	Вибрация, мкм, секции 33 на отметках, м					Вибрация, мкм, секции 43 на отметках, м				
	344		467	542		344		467	542	
	вдоль потока	вертикальная	вдоль потока	вдоль потока	вертикальная	вдоль потока	вертикальная	вдоль потока	вдоль потока	вертикальная
1	—/2	—/3	2/10	6/41	1/4	1/8	—/2	2/13	3/26	—/3
2	1/5	1/5	4/27	8/63	2/12	1/8	—/3	3/23	9/52	2/10

ся в область более высоких частот по сравнению с графиком, построенным по данным измерения вибраций в 1988 г.

Вибрации плотины измерялись в станционной секции 33 и водосбросной секции 43. Выбор этих секций объясняется тем, что секция 33 расположена в ключевом сечении арки, где отмечены наиболее высокие горизонтальные смещения плотины, а секция 43 — почти в центре водосбросной ее части, т. е. в области наиболее высоких динамических воздействий на сооружение.Вибрации измерялись вибропреобразователями СМ-3 на отметках 344, 467 и 542 м. Результаты измерения вибраций плотины приведены в табл. 3 и на рис. 4.

Отметим, что при расходах через водосбросы 5450 $м^3/с$ стандарт горизонтальной вибрации вдоль потока секции 33 на отметке 542 м составлял 16 мкм, а максимальный размах — 109 мкм [1].

По данным измерений вибраций плотины, выполненных в 1991 г., первая частота ее собственных колебаний составила около 1,1 Гц, что несколько ниже, чем в 1988 г. [1]. Такое снижение может быть объяснено тем, что в верхнюю часть плотины после 1988 г. был уложен сравнительно большой объем бетона, в

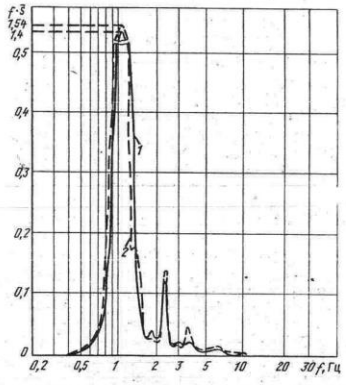

Рис. 4. Нормированные функции спектральной плотности горизонтальных вибраций секций плотины вдоль потока, умноженные на частоту:
1 — секция 43, отм. 542 м; *2* — секция 33, отм. 542 м

то время как жесткость сооружения оставалась практически неизменной. Кроме этого, на снижение первой частоты собственных колебаний повлияло и то обстоятельство, что в 1991 г. отметка УВБ была почти на 8 м выше, чем в 1988 г. Вторая частота собственных колебаний плотины составила около 1,9 Гц.

На графике функции спектральной плотности горизонтальных вибраций секции 33 (см. рис. 4) на частотах 1,45→1,5 Гц хорошо заметна особенность, не наблюдаемая на аналогичном графике секции 43. Эта особенность при рассматриваемых динамических воздействиях на сооружение, по-видимому, связана с процессами, происходящими в турбинных водоводах.

Заметим также, что при сравнительно низком уровне динамического воздействия на дно водобойного колодца при расходах через водосбросы 600 $м^3/с$ (по сравнению с воздействием при расходе 5450 $м^3/с$) на графиках функций спектральной плотности вибраций стала заметна частота, соответствующая оборотной частоте гидроагрегата (2,38 Гц). Это связано с возможностями регистрирующей аппаратуры.

Вибрации раздельного устоя измерялись в секциях II, III и V (табл. 4), а правобережной подпорной стенки — в секции III. При этом также использовались преобразователи вибрации СМ-3.

Уровень вибраций раздельного устоя при пропуске воды через водосбросы невысок: например, стандарт вибрации секции II перпендикулярно потоку (отм. 357 м) при двух работающих водосбросах и полном открытии затворов (расход около 2400 $м^3/с$) составлял 177 мкм [1].

Таблица 4. **Стандарты (числитель) и максимальные размахи (знаменатель) вибраций секций раздельного устоя поперек потока**

Номер режима по табл. 1	Вибрация, мкм, в секциях раздельного устоя		
	II	III	V
	Отметка 357 м		
1	60/378	52/340	50/324
2	23/138	35/214	—
	Отметка 333 м		
1	3/25	4/32	5/38
2	18/111	18/108	14/83

Энергетическое строительство 1993, N10.

Размахи колебаний III секции правобережной подпорной стенки в направлении, перпендикулярном потоку, при работе водосбросной секции 43 составляли 50 мкм, при работе водосбросных секций 39, 43, 47—52 мкм. Они также ниже, чем при более высоких расходах через водосбросы [1].

Выводы

1. Цементация межблочных швов, анкеровка блоков крепления, устройство уплотнительных шпонок в швах изменили динамическую работу крепления. В течение непродолжительной работы водосбросов в 1991 г. тенденции к увеличению вибраций блоков крепления во времени не отмечено.

2. Необходимо продолжать накопление данных о динамической и статической работе блоков крепления в целях определения характеристик воздействия на него, при которых надежная работа крепления будет гарантирована.

3. Уровень вибраций плотины, секций раздельного устоя и правобережной подпорной стенки при расходах через водосбросы до 600 м^3/с невысок и не опасен для сооружения.

Список литературы

1. **Натурные** исследования динамики массивных бетонных и железобетонных сооружений Саяно-Шушенской ГЭС / В. А. Уляшинский, В. В. Буханов, Т. В. Гавриленко, В. Н. Шабанов // Гидротехническое строительство. 1992. № 1. С. 5—10.

2. **Уляшинский В. А., Шабанов В. Н., Гавриленко Т. В.** / Вибрации плотины Саяно-Шушенской ГЭС и прилегающей к ней территории при работе водосбросов // Энергетическое строительство. 1991. № 5. С. 67—70.

Экономическая эффективность завершения строительства Крапивинского гидроузла в современных условиях

Д-р техн. наук Б. Л. БАБУРИН (Гидропроект)

Строительство Крапивинского гидроузла с ГЭС на р. Томь в Кемеровской обл. было начато в 1975 г. В «лучших» традициях плановой экономики за 15 лет работ было освоено около 40 % сметной стоимости гидроузла, после чего в 1989 г. распоряжением Совмина СССР «О временном прекращении строительства и консервации Крапивинского гидроузла» возведение его было приостановлено. Одновременно с этим было принято решение о проведении экологической экспертизы проекта.

В соответствии с проектом основные задачи, решаемые с помощью Крапивинского гидроузла, сводятся к следующему:

улучшение экологической обстановки на прилегающих к гидроузлу территориях и в зоне ОЭС Сибири;

повышение водообеспеченности в меженный период;

улучшение энергоснабжения Кемеровской области.

Наряду с этим сооружение регулирующего водохранилища создает более благоприятные условия для развития водного транспорта, а строительный коллектив и строительная база могут быть использованы для развития социальной инфраструктуры в прилегающих районах уже в период возведения гидроузла.

Улучшение экологической обстановки после создания гидроузла, как это представлено в проекте, понимается как улучшение качества воды в нижнем бьефе гидроузла вследствие разбавляющих попусков воды из водохранилища в меженный период в первые годы его эксплуатации, а затем, по мере ввода очистных сооружений на предприятиях, расположенных в бассейне р. Томь, его разбавляющая способность используется лишь в экстремальных ситуациях: при задержках с вводом отдельных очистных сооружений и аварийном выходе их из строя (залповые выбросы).

Выполненное при составлении проекта изучение состояния качества воды в р. Томь на тот период и способов приведения его к экологически допустимому уровню показало, что в альтернативном варианте (без Крапивинского гидроузла) достижение нормативного качества воды возможно лишь при осуществлении мероприятий по глубокой очистке загрязненных сбросов в реку на всех предприятиях рассматриваемого района. Вместе с тем в реальных условиях реализация этих мероприятий к 1966 г. (году ввода гидроузла в эксплуатацию при продолжении его строительства по предложению Гидропроекта) практически невозможна. Более реальным представляется выполнить к 1996 г. мероприятия лишь по дифференцированной очистке стоков и, в лучшем случае, к 2000 г. начать переход к глубокой очистке. Учитывая это, в экономическом выражении экологический эффект от строительства Крапивинского гидроузла (конечно с определенной долей условности) можно оценить путем вычисления снижения затрат по очистным сооружениям на первом этапе (1966—2000 гг.) до уровня затрат по апробированной очистке, а на втором этапе (2001—2005 гг.) — до уровня затрат по дифференцированной очистке (см. рисунок). В дальнейшем, после выполнения мероприятий по глубокой очистке сточных вод, водохранилище Крапивинского гидроузла может выполнять, как было указано выше, роль резерва по поддержанию экологического уровня качества воды ниже гидроузла в случае аварийного выхода из строя очистных сооружений и залповых выбросов загрязненных стоков. В альтернативном варианте (без Крапивинского гидроузла) затраты на создание такого резерва оцениваются ориентировочно в размере 20 % затрат на глубокую очистку.

Улучшение экологической обстановки в зоне ОЭС Сибири в результате строительства Крапивинского гидроузла с ГЭС мощностью 300 МВт