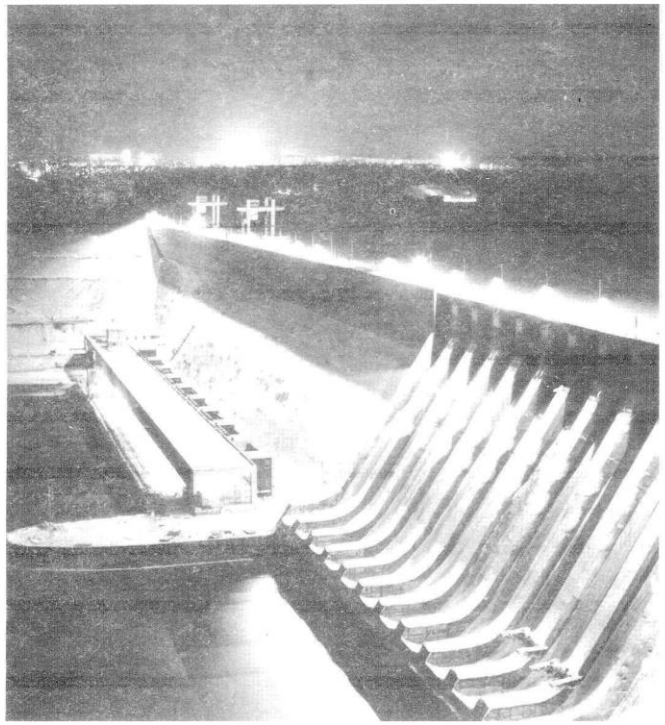
Журнал «Гидротехническое строительство». 1992. № 1. С. 5-10

ISSN 0016-9714

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО



1 · 1992

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ

УДК 627.83

Натурные исследования динамики массивных бетонных и железобетонных сооружений Саяно-Шушенской ГЭС

УЛЯШИНСКИЙ В. А., БУХАНОВ В. В., ГАВРИЛЕНКО Т. В., ШАБАНОВ В. Н., инженеры

Эксплуатационные водосбросы плотины Саяно-Шушенской ГЭС рассчитаны на расход 13 600 м³/с при перепаде бьефов 220 м. Гашение энергии потока, средняя скорость которого при сходе с носка водосброса составляет около 60 м/с, производится в водобойном колодце. Удельная мощность сбросного потока в нем достигает 200 МВт/м и является одной из наиболее высоких в отечественной и зарубежной гидротехнической практике. Агрегаты ГЭС при расчетных напорах развивают мощность по 640 МВт.

Работающие водосбросы, водобойный колодец и агрегаты являются источниками мощных динамических воздействий на сооружение. Поведение сооружения под этими воздействиями было предметом постоянного внимания и изучения. На различных этапах возведения сооружения были выполнены исследования динамики бетонного крепления дна водобойного колодца, вибрационного состояния водосбросных и станционных секций плотины, секций раздельного устоя (рис. 1), правобережной подпорной стенки, агрегатных блоков, прилегающей к гидроузлу территории. Сведения о числе работающих водосбросов, расходах через них, отметках УВБ в период проведения динамических исследований приведены в табл. 1. Измерение вибраций сооружений, за исключением крепления дна водобойного колодца, осуществлялось с помощью вибропреобразователей СМ-3.

Таблица 1

Отметки УВБ, число секций с работающими водосбросами и максимальные расходы через них

Годы	Отметки УВБ, при которых измерялись вибрации сооружений, м	Число секций с работающими эксплуатационными водосбросами, шт.	Максимальный суммарный расход через водосбросы, м³/с
1980	414,2	4*	4350
1984	463,7	3*	4000
1986	520,7	3; 5	4880
1988	531,5—532,5	1; 3; 4; 5	5450

* Строительные водосбросы.

Плотина. На ранних этапах возведения сооружения исследование вибрационного состояния секций плотины ставило своей целью оценку монолитности наращиваемых бетонных массивов. В связи с этим в период пропуска паводковых расходов изучались формы колебаний отдельных столбов и характер виброперемещений рядом расположенных секций. На плотине, возведенной на высоту 130 м, было отмечено плавное изменение виброперемещений по всей высоте столба с четким проявлением второй формы колебаний в ее классическом представлении. Разность размахов колебаний рядом стоящих водосбросных секций в направлении как вдоль потока, так и поперек его не превышала 4 мкм [1]. Причем прослеживалась явная зависимость значений размахов колебаний от степени омоноличивания межстолбчатых и межсекционных радиальных швов. Схожие результаты получены и при проведении вибрационных исследований на последующем этапе возведения сооружения, когда 91 % секций плотины по первым столбам был возведен практически на проектную отметку, а отметка цементации межсекционных швов в пределах первого столба составила 518.0 м [2].

Исследования вибрационного состояния плотины при пропуске паводковых расходов в 1986 г. выявили зависимость уровня вибраций секций от степени открытия затворов. Исследования проводились при двух схемах включения водосбросов (3 водосброса и 5). По каждой из них сброс воды производился при частичном и полном открытии затворов. Частичное открытие составляло 35 и 72 % от полного. Наиболее сильные вибрации сооружения в случае работы 5 водосбросов имели место при частичном

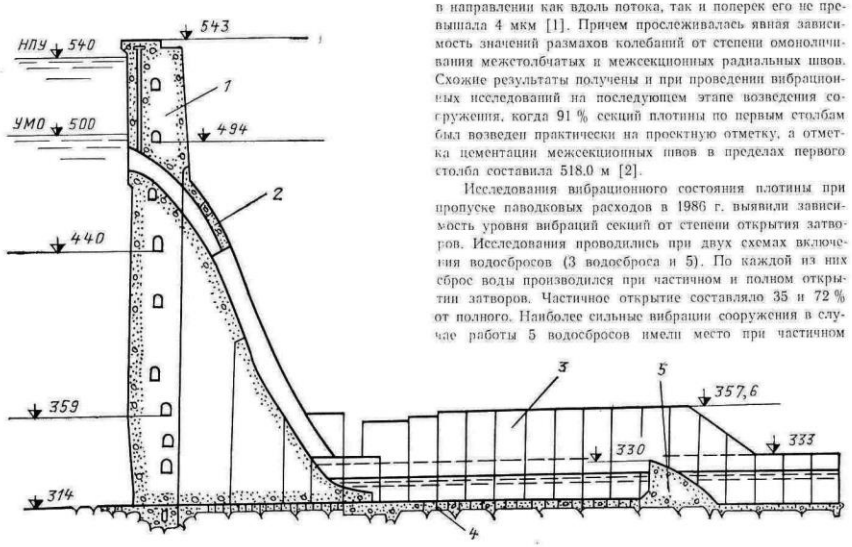


Рис. 1. Поперечное сечение плотины по оси водосбросной секции и продольное сечение водобойного колодца:
1 — тело плотины; 2 — закрытые участки водосбросов; 3 — секции раздельного устоя; 4 — блоки крепления дна водобойного колодца; 5 — водобойная стенка

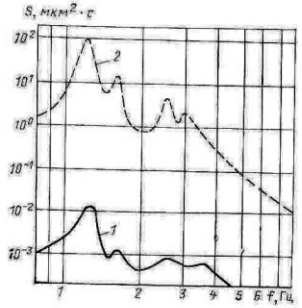


Рис. 2. Функции спектральной плотности вибраций 44 секции плотины (работают три водосброса):
1 — отметка 359 м; 2 — отметка 542 м

открытии затворов, равном 72 % [2]. Причину этого следует рассматривать в особенности гидродинамического режима в закрытых участках водосбросов и взаимодействии потока с конструкцией.

Исследования вибрационного состояния плотины на завершающем этапе возведения сооружения проводились в 1988 г. К этому времени плотина была возведена до проектных отметок и в основном омоноличена.

Места для измерения вибраций плотины были выбраны с таким расчетом, чтобы получить информацию о вибрационном состоянии ее наиболее характерных зон. Вибрации сооружения измерялись в двух вертикальных створах, один из которых располагался в секциях 33—35, а второй — в секции 44. Секция 33 расположена в ключевом сечении арки. В этом сечении отмечены наиболее высокие значения горизонтальных перемещений плотины, вызванные действиями гидростатической нагрузки и температуры наружного воздуха. Секция 44 расположена практически в центре водосбросной части плотины, т. е. находится в области наиболее высоких динамических воздействий на сооружение. В секции 33 измерение вибраций производилось на отметке 542 м, в секции 35 — на отметке 359 м, в секции 44 — на отметках 359, 440, 494 и 542 м. При изучении вибрационного состояния плотины проводились синхронные записи колебаний во всех измерительных точках.

Дополнительно к указанным был устроен ориентированный по радиусу арки измерительный створ, который начинался в продольной галерее секции 37 и заканчивался в секции IX раздельного устоя отм. 333 м. Длина его достигала почти 250 м. В пределах этого створа были измерены синхронные вертикальные перемещения секций плотины и раздельного устоя при пяти работающих водосбросах.

Из табл. 2, в которой приведены основные результаты измерений видно, что вибрации секции 44 проходят более интенсивно, чем вибрации секций 33 и 35, особенно на отметке 542 м. Стандарты и размахи колебаний этой секции как в направлении вдоль потока, так и вертикальном имеют в большинстве случаев максимальные значения из измеренных. Значение первой частоты собственных колебаний плотины, найденное из натурных данных, составило около 1,2 Гц, что близко к значению первой частоты, полученной на модели во ВНИИГе (1,1 Гц).

Результаты исследования вибрации сооружения показывают, что основными ее источниками являются динамические процессы в водобойном колодце и закрытых участках водосбросов [2]. Механизм передачи динамических возмущений от дна водобойного колодца к плотине определен из рассмотрения синхронных вертикальных перемещений ее 37 секции и секций раздельного устоя. Он представляется в следующем виде. Под действием пульсаций давления происходит прогиб скального массива, на котором расположен колодец. Одновременно в деформационный процесс вовлекается и прилегающий к колодцу участок основания, на котором расположена плотина. Этот участок совершает перемещения и наклоны в вертикальной плоскости, которые являются причиной вертикальных и одной из причин горизонтальных вибраций сооружения. Другой причиной горизонтальных вибраций являются вызванные теми же пульсациями давления горизонтальные перемещения скального массива. На рис. 2 приведены функции спектральной плотности вибраций плотины на отметках 359 и 542 м.

Вибрации вызывают дополнительные динамические напряжения в теле плотины. Оценка этих напряжений показала, что они невелики. Так, стандарты дополнительных напряжений, действовавших в прочном направлении на отм. 440,0—494,0 м (наибольшие из оцененных дополнительных напряжений в плотине), не превышали 0,001 МПа [3].

Впервые в практике гидротехнического строительства был выполнен принципиально новый безнапорный водосброс с течением по криволинейному потолку. В таком водосбросе поток, оторвавшись от конструкций паза основного затвора, некоторое время находится в режиме свободного полета, после чего присоединяется к криволинейному потолку и на всем протяжении закрытого водовода удерживается в этом положении центробежными силами.

В 1985 г. были проведены натурные исследования водосброса (секция 40) для УВБ 503 м и УВБ 512 м [4]. Они показали, что режимы работы водосброса на натурном объекте удовлетворительно совпадают с данными моделей различного масштаба. Натурные исследования были продолжены в 1986 г. и при УВБ 520,6 м, в ходе которых измерялись пьезометрические давления на потолке и дне

Таблица 2

Максимальные размахи ($2A_{макс}$) и стандарты (σ) вибраций плотины, мкм

Число работающих водосбросов, шт.	Номера секций с работающими водосбросами	Расход через водосбросы, м³/с	Направление вибраций вдоль потока на отметках, м								Вертикальное направление вибраций			
			359(35)*		359(44)*		542(33)*		542(44)*		359(35)*		359(44)*	
			$2A_{макс}$	σ	$2A_{макс}$	σ	$2A_{макс}$	σ	$2A_{макс}$	σ	$2A_{макс}$	σ	$2A_{макс}$	σ
3	39, 44, 47	3270	10	1	6	1	76	13	85	17	—	—	7	1
4	39, 43, 44, 47	4360	11	2	12	2	99	16	143	23	8	1	9	1
5	39, 40, 43, 44, 47	5450	11	2	15	2	109	16	165	19	7	1	7	2

* Номера секций.

водосброса для полного и пяти частичных открытий затвора. Исследования показали, что характер распределения осредненных давлений на потолке закрытого участка соответствует принципиальной идее, заложенной в конструкции водосброса (рис. 3). Максимум осредненного давления на потолке, соответствующий месту удара струи, уменьшается по величине и перемещается вниз по течению по мере снижения степени открытия затвора. Вследствие этого изменяется значение результирующей динамической силы, действующей на потолок закрытого участка водосброса. Максимальное значение горизонтальной составляющей этой силы имеет место при степени открытия затвора около 72 %, что и объясняет наиболее сильные горизонтальные вибрации плотины именно при этом открытии затворов.

В отличие от модельных данных [4], по которым вдоль всего дна закрытого участка водосброса сохраняются близкие к атмосферному положительные давления, по дну нижней половины закрытого участка водосброса зарегистрирован вакуум. Его величина достигает в створе, близком к выходному сечению, при полном открытии затвора значения 40 кПа. Такое разряжение не представляется опасным, так как у дна водосброса поток сильно аэрирован [4]. При визуальном осмотре обтекаемых поверхностей закрытого участка водосброса 40 секции после пропуска паводка не было обнаружено никаких следов эрозии.

Результаты натурных исследований подтверждают работоспособность новой конструкции водосброса, в том числе и при частичных открытиях затвора.

Блоки крепления дна водобойного колодца. Натурные исследования крепления дна водобойного колодца проводились в период пропуска паводковых расходов в 1986 и 1988 гг. Результаты исследований 1986 г. носили предварительный характер, так как на большей части дна водобойного колодца крепление не было восстановлено. На протяжении всего периода пропуска паводка наблюдалась сохранность сцепления на контакте блоков со скальным основанием.

В 1988 г. проводились исследования восстановленного крепления дна водобойного колодца. Крепление выполнено бетонными блоками с плановыми размерами в основном 6,25×7,5 м при максимальной высоте блоков около 9 м. Блоки разделены вертикальными швами; устройств, препятствующих проникновению пульсации давления в вертикальный межблочный шов, конструкция крепления в то время не имела. Совместно со скальным основанием блоки крепления представляют собой сложную систему со случайными, изменяющимися во времени характеристиками. Расчетным путем были определены растягивающие напряжения на контакте блок крепления — основание, вызванные вибрациями блока [5]. Условия формирования термонапряженного состояния блоков в процессе твердения бетона и набора им прочности, с учетом влияния штраб, расположенных на вертикальных гранях блоков, были таковы, что у некоторых блоков еще в период их укладки растягивающие напряжения могли превысить допустимые значения.

Опытные блоки, в которых была установлена контрольно-измерительная аппаратура (КИА), располагались во всех 44 секции, работавшей при всех схемах пропуска расходов. Всего было оснащено КИА шесть блоков, располагавшихся практически по всей длине водобойного колодца на различных расстояниях от носка водосброса.

В ходе натурных исследований измерялись вибрации в трех направлениях: вертикальные (с помощью вибропреобразователей СВ-5), горизонтальные вдоль потока (ОСП-2МГ) и горизонтальные поперек потока (СГ-10),

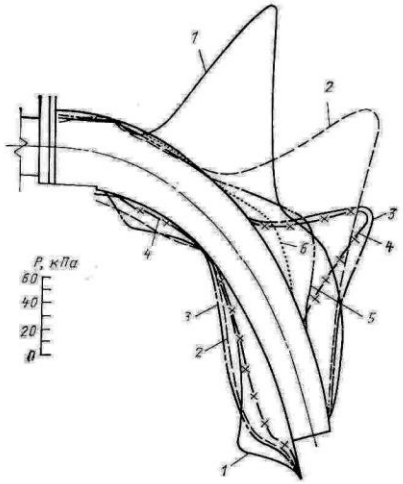


Рис. 3. Осредненные давления на потолке и дне закрытого участка водосброса 40 секции плотины при различных степенях открытия затвора в процентах:
1 — 100%; 2 — 85 %; 3 — 72 %; 4 — 50 %; 5 — 35 %; 6 — 20%

а также пульсация давления (с помощью соответствующих преобразователей ДД-10).

Результаты натурных исследований динамики крепления показали, что горизонтальные и вертикальные виброперемещения блоков при работе водобойного колодца являются вынужденными. Виброперемещения обусловлены пульсацией давления на горизонтальную грань блока, а также пульсацией давления в межблочных швах. Это подтверждают сопоставления спектральных плотностей пульсации давления и вибраций. На рис. 4 представлены спектры вибраций опытных блоков и спектр пульсации давления в межблочном шве, полученные при одном и том же режиме сброса расходов. На частотах, соответствующих максимумам в спектрах пульсации давления и вибраций, имеет место достаточно высокая связь (когерентность) этих процессов.

Стандарты и максимальные размахи вертикальных и горизонтальных вибраций блоков крепления приведены в таблице 3. Уровень горизонтальных вибраций в начале пропуска паводка был минимальным за весь период пропуска. Через 45 ч работы водосбросов вибрации блоков начали увеличиваться. Это явление можно объяснить вымыванием мусора из межблочных швов, в результате чего облегчалось проникновение пульсации давления в швы. По мере развития пульсационного течения в швах создавалось больше возможностей для нестесненных горизонтальных перемещений блоков. Усиливавшаяся раскачка блоков вызывала «малоцикловую усталость» контакта блок — скала, что способствовало возникновению разрушений контакта и дальнейшему увеличению горизонтальных вибраций.

Стандарты горизонтальных вибраций блоков в направлении транзитного потока, в целом, уменьшаются. Одной из основных причин такого снижения является изменение гидродинамического воздействия на крепление: по мере продвижения к концевой части водобойного колодца стандарты пульсации давления потока уменьшаются [6].

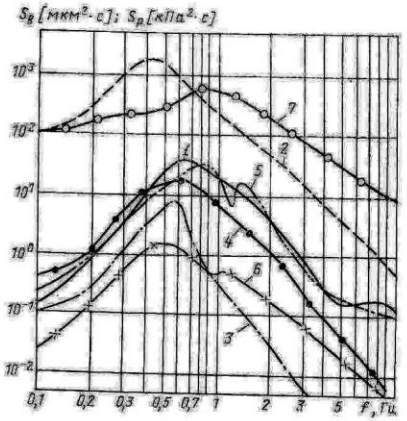


Рис. 4. Функции спектральной плотности пульсации давления в межблочном шве и вибрации блоков крепления работают три водосброса:

1 — вертикальные вибрации блока, расположенного на расстоянии l=31,2 м от носка водосброса до центра блока; 2 — горизонтальные вибрации вдоль потока (l=31,2 м); 3 — горизонтальные вибрации вдоль потока (l=43,7 м); 4 — горизонтальные вибрации поперек потока (l=43,7 м); 5 — горизонтальные вибрации вдоль потока (l=68,7 м); 6 — горизонтальные вибрации поперек потока (l=68,7 м); 7 — пульсация давления в межблочном шве (l=31,2 м)

Агрегатные блоки. Исследовано вибрационное состояние первых четырех агрегатных блоков ГЭС. Исследования проводились на разных режимах работы агрегатов. При этом максимальная нагрузка агрегата составляла 280 МВт при напоре 91,5 м. В процессе изучения вибрационного состояния агрегатного блока изменение вибраций осуществлялось на кожухе генератора, на опоре подпятника генератора, на верхней отметке железобетонного массива спиральной камеры и в центре его, в помещении лаза в отсасывающую трубу. Наиболее сильные вибрации отмечены на кожухе генератора. При работе агрегата в режиме холостого хода при напоре 100,4 м максимальные размахи горизонтальных колебаний кожуха достигали 125 мкм.

Вибрации агрегатных блоков в ближней к скальному основанию зоне (помещение лазов в отсасывающие трубы) невелики как в вертикальном, так и горизонтальном направлениях. Размахи колебаний здесь составляли 1—4 мкм. Можно предположить, что на контакте агрегатного блока со скальным основанием размахи колебаний близки к приведенным выше значениям (1—4 мкм). Анализ результатов измерений вибраций показал, что в вертикальном направлении агрегатный блок колеблется на скальном основании практически как жесткое тело. В то же время отмечаются слабые крутильные колебания блока относительно вертикальной оси.

Основная частота горизонтальных колебаний агрегатных блоков — оборотная, равная 2,38 Гц, или кратная ей. Вертикальные колебания агрегатных блоков преимущественно носят непериодический характер.

Секции раздельного устоя. Вибрации секций раздельного устоя характеризуются данными, приведенными в табл. 4.

Наиболее сильные вибрации имели место на верхних отметках секций устоя (отм. 367 м). При этом максимальные значения стандартов вибраций отмечены у секций II, III и IV. На отм. 333 м наиболее интенсивные вибрации как в направлении поперек потока, так и в вертикальном наблюдались у секции VI. Обращает на себя внимание следующее обстоятельство: максимальные значения стандартов как вертикальных вибраций, так и вибраций в направлении поперек потока имели место при пяти работающих водосбросах, а максимальные значения размахов колебаний — при трех. Такая особенность динамического поведения сооружения объясняется большей однородностью потока в колодце при пяти работающих водосбросах, чем при меньшем их числе.

Инструментальные данные подтверждаются и результатами визуальных наблюдений за потоком в колодце. Эти наблюдения показали, что при работе трех водосбросов с полным открытием затворов появляются характерные водоворотные течения на участках за закрытыми водосбросами. При работе пяти водосбросов водоворотные области сужаются, сбойность уменьшается, распределение расходов перед водобойной стенкой выравнивается. Однако возмущенность свободной поверхности потока увеличивается.

Первая частота собственных горизонтальных колебаний секции раздельного устоя, найденная по результатам измерения вибраций, составила 2,5 Гц.

Стандарт дополнительных динамических напряжений в зоне сопряжения пера раздельного устоя с его массивной частью (секция IV РУ) оценен с использованием дан-

Таблица 3

Максимальные размахи ($2A_{макс}$) и стандарты (σ) виброперемещений блоков крепления дна водобойного колодца, мкм

Направление виброперемещений	Расстояние от носка водосброса 44 секции до центра опытного блока, м	Часы работы водосбросов плотины/расход через водосбросы, м³/с													
		11/1090	33/3270		87/3270		97/4360		120/5450		172/3270		196/3270		200/4360
		σ	σ	$2A_{макс}$	σ	$2A_{макс}$	σ	$2A_{макс}$	σ	$2A_{макс}$	σ	$2A_{макс}$	σ	$2A_{макс}$	$2A_{макс}$
Вертикальные	31,2	24	28	230	16	—	9,4	—	7	56	7,8	60	206	1300	235
Горизонтальные вдоль потока	31,2	1,8	1,3	10	17,6	110	13,25	—	21,5	160	45	330	203	2600	540
	43,7	0,2	0,3	1,7	0,9	7,0	1,8	—	0,6	4,3	2,2	12	9,7	110	75
	56,2	—	0,25	1,5	1,2	—	—	—	—	—	1,5	11	3,3	36	0
	68,7	—	—	—	6,7	46	7,2	47	9,7	75	7,2	50	—	—	210
	93,7	0,05	0,1	—	2,7	—	—	—	4	27	3,3	27	—	—	0
	118,7	2	0,1	—	2,3	—	—	—	3,4	28	—	—	—	—	0
Горизонтальные поперек потока	43,7	2,8	5,0	40	4,3	35	4,4	33	5,4	36	5,1	35	9,1	140	550
	68,7	—	—	—	1,9	14	1,9	15	2,4	20	1,6	13	2,1	23	Более 1 мм

Таблица 4

Стандарты (числитель) и максимальные размахи (знаменатель) колебаний секций раздельного устоя, мкм, 1988 г.

Число работающих сбросов, шт.	Номера секций				
	II	III	IV	V	VI
		В направлении поперек потока на отметке 357 м			
2	177/1029	147/928	168/1223	—	55/285
3	—	166/1450	226/1074	29/193	70/403
4	—	169/947	274/1600	39/196	86/471
5	—	181/1179	325/1472	34/193	107/700
		В направлении поперек потока на отметке 333 м			
5	34/201	35/195	48/254	24/185	19/131
		В вертикальном направлении на отметке 333 м			
3	3/17	4/29	4/30	6/48	1/8
5	3/15	3/23	5/29	18/100	2/19

ных табл. 4 при учете колебаний по первой форме. Значение стандарта при расходе через водосбросы 5450 м³/с составило приблизительно 0,1 МПа. Если предположить, что инерционная нагрузка на перо распределена по треугольнику с максимальным значением на его верхней отметке, то значение коэффициента асимметрии цикла изменения напряжений в зоне сопряжения составит 0,7. Согласно СНиП 2.03.01-84 выбор расчетного сопротивления бетона при оценке железобетонной конструкции на выносливость в данном случае должен производиться уже с учетом коэффициента условий работы бетона, меньшим единицы ($m_{b_2}=0{,}95$).

Правобережная подпорная стенка. В период работы водосбросов изучались вибрации секции III подпорной стенки (табл. 5). Обращают на себя внимание сравнительно высокие значения стандартов и максимальных размахов колебаний в вертикальном направлении. Они в несколько раз больше таковых для секции III раздельного устоя, занимающей в продольном створе водобойного колодца такое же положение, как и секция III правобережной подпорной стенки. Сравнительно высокий уровень вертикальных вибраций последней, возможно, вызван большей податливостью скального основания, а также особенностями динамического воздействия на крепление дна колодца в зоне, прилегающей к секции III, а также и на саму секцию III.

Вибрации прилегающей к гидроузлу территории. Вибрации прилегающей к гидроузлу территории при пяти работающих водосбросах с полным открытием затворов характеризуются следующими данными. Наиболее сильные вибрации отмечены вблизи водобойного колодца. В период пропуска паводка 1988 г. размахи горизонтальных колебаний на поверхности грунта здесь достигали 42 мкм, а вертикальных колебаний — 9 мкм. По мере удаления от водобойного колодца размахи колебаний быстро уменьшались, и уже на расстоянии приблизительно 400 м от него размахи вертикальных колебаний не превышали 2 мкм. В левобережье также наиболее сильные вибрации отмечены в непосредственной близости от сооружения: в зоне примыкания служебно-технологического корпуса к монтажной площадке размахи вертикальных колебаний достигали 2 мкм, а горизонтальных — 3 мкм.

Таблица 5

Стандарты (числитель) и максимальные размахи (знаменатель) колебаний III секции правобережной подпорной стенки на отметке 355 м, мкм, 1988 г.

Число работающих водосбросов, шт.	Направление вибраций поперек потока	Вертикальные направления вибраций
3	23/169	27/156
5	36/286	32/194

На удаленных от плотины участках территории уровень вибрации был невысок. На площадке ОРУ 500, находящейся на расстоянии приблизительно 1 км от плотины, размахи вертикальных колебаний составляли 0,3 мкм, а в районе моста через Енисей (расстояние от плотины около 3,5 км) — всего 0,2 мкм.

Уровень вибраций в зоне примыкания арки к береговым склонам также незначителен. На отм. 540 м размахи вертикальных колебаний скального массива в зоне правобережного примыкания не превышали 0,8 мкм, а в зоне левобережного — 0,3 мкм.

Выводы. 1. Стандарты вибраций водосбросной и станционной секций плотины в направлении вдоль потока на отм. 542 м не превышали 19 мкм при расходах через водосбросы до 5450 м³/с. Вызванные этими вибрациями дополнительные динамические напряжения в бетонных массивах сооружения не представляют для него опасности.

2. Стандарты вибраций раздельного устоя при указанных выше расходах через водосбросы достигали 325 мкм. Вызванные этими вибрациями дополнительные напряжения в конструкции устоя при длительном действии вибрации могут оказать негативное влияние на состояние конструкции. Они должны приниматься во внимание при обеспечении ее надежной работы.

3. Стандарты горизонтальных вибраций блоков крепления дна водобойного колодца достигали 203 мкм. Такое их значение превышает предельно допустимое, найденное из условий сохранения ненарушенного сцепления блока с основанием.

4. Крепление дна водобойного колодца с открытыми швами недолговечно. Результаты выполненных натурных исследований подтверждают необходимость омоноличивания крепления для усиления механической связи блоков друг с другом и устройства шпонок, препятствующих проникновению пульсации давления в межблочные швы.

5. Вибрации прилегающей к плотине территории в нижнем бьефе гидроузла при расходе через водосбросы 5450 м³/с наиболее ощутимы в непосредственной близости от сооружения. На удаленных от сооружения участках территории вибрации незначительны.

6. В целях обеспечения надежной эксплуатации основных сооружений Саяно-Шушенской ГЭС рекомендуется оценить вибрационное состояние сооружений при более

высоких расходах через водосбросы, особенно секций радиального устья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Уляшинский В. А., Шабанов В. Н., Тугужеков С. А.** Измерение вибраций сооружений водосливной части плотины Саяно-Шушенской ГЭС при пропуске паводка 1980 г.// Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1984. Т. 173.

2. **Вибрационное** состояние Саяно-Шушенской плотины при работе водосливов/ В. Н. Шабанов, В. А. Уляшинский, С. А. Тугужеков и др.// Материалы конференций и совещаний по гидротехнике. Повышение надежности энергетических сооружений при динамических воздействиях (ЛЭС-87). Л.: ВНИИГ. 1989.

3. **Уляшинский В. А., Шабанов В. Н., Гавриленко Т. В.** Вибрация плотины Саяно-Шушенской ГЭС и прилегающей к ней территории при работе водосбросов// Энергетическое строительство. 1991. № 5.

4. **Совершенствование** конструкций водосбросов Саяно-Шушенской ГЭС в целях снижения их материалоемкости и улучшения условий эксплуатации/ В. В. Буханов, Г. К. Дерюгин, Г. Л. Рубинштейн и др.// Материалы научно-технической конференции 1986 г. Решение проблем Саяно-Шушенского гидроэнергокомплекса. Л.: Энергоатомиздат. 1987.

5. **Мищенко С. М.** Силовое воздействие потока на дно водобойного колодца// Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1988. Т. 208.

6. **Рубинштейн Г. Л., Дерюгин Г. К., Буханов В. В.** Лабораторные и натурные исследования восстанавливаемого крепления водобойного колодца// Изв. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1988. Т. 208.

УДК 627.825.004.1

Состояние Саяно-Шушенской плотины и ее основания в период первого наполнения водохранилища до НПУ

АЛЕКСАНДРОВСКАЯ Э. К., ВОЛКОВ В. П., МАРГОЛИНА О. Г., ПАВЛОВСКАЯ Л. Н., инженеры, ПОСОВА О. Н., доктор техн. наук

Оценке состояния Саяно-Шушенской плотины на различных этапах ее возведения и заполнения водохранилища по данным натурных наблюдений был посвящен ряд статей [1—6]. Отмечалось, что в течение 1978—1984 гг. состояние арочно-гравитационной плотины было удовлетворительным и в целом отвечало проектным предпосылкам, хотя возведение сооружения неполным профилем определенным образом сказалось на напряженно-деформированном состоянии сооружения, выразившемся в перераспределении между арочными и консольными напряжениями и между напряжениями в четвертых и третьих столбах. Было отмечено также, что подъем уровня верхнего бьефа выше отметки 500 м вызвал разуплотнение в контактной зоне плотины, сопровождавшееся активизацией фильтрационных процессов в скальном основании [4, 5].

Дальнейшие наблюдения показали, что ширина и глубина раскрытия так называемого контактного шва с ростом гидростатической нагрузки увеличиваются. Раскрытие контактного шва в 1989 г. и 1990 г. при минимальных отметках уровня воды в водохранилище, равными 497—499 м, были одинаковыми, также практически одинаково раскрывался шов в указанные годы при отметках уровня, близких к 526 м (526,5 м — максимальная отметка уровня в 1989 г.). Это свидетельствовало об упругой работе плотины и скального основания при изменениях гидростатической нагрузки в интервале отметок 497—526,5 м (рис. 1).

В 1990 г. уровень воды в водохранилище впервые достиг отметки НПУ 540 м, что вызвало дополнительное разуплотнение скального основания. На глубине 20 м под первым столбом были зафиксированы деформации растяжения, достигшие 10 мм. Это позволяет утверждать, что зона разуплотнения скального основания под первым столбом распространяется на глубине не менее 20 м. Наибольшая величина раскрытия контактного шва на расстоянии 0,55 м от напорной грани составила 9,7 мм. Возросла и глубина раскрытия шва, составившая от 21 до 27 м от напорной грани.

Сезонная сработка уровня в 1990/1991 гг. вызвала закономерное уменьшение растягивающих деформаций в контактной зоне. Однако деформация при минимальной отметке 1991 г. не равнялась аналогичной величине предыдущего года, что свидетельствовало о возникновении необратимых деформаций (рис. 1,б). Появление необратимых деформаций, вызванных дополнительной (по отношению к предыдущему году) нагрузкой из-за подъема УВБ впервые до отметки НПУ, было зафиксировано и по данным наблюдений за другими контролируемыми параметрами: радиальными смещениями и наклонами. Следует отметить, что необратимые деформации наблюдались и в предыдущие годы наполнения каждый раз, когда УВБ впервые поднимался до максимальной отметки очередного этапа заполнения [6].

Вызванное подъемом уровня воды в водохранилище впервые до отметки НПУ дополнительное разуплотнение скального основания сказалось на режиме фильтрации в нем. Следует отметить, что подъем в 1990 г. УВБ до отметки НПУ осуществлялся двумя ступенями. Первая ступень наполнения определялась отметками 500—526 м, когда интенсивность подъема постепенно снижалась от 0,4 до 0,2 м/сут; вторая ступень определялась отметками 526—540 м, при этом скорость подъема уровня в начале второй ступени достигла 0,5 м/сут.

Анализируя результаты натурных наблюдений за контролируемыми параметрами фильтрации, следует отметить, что в процессе сработки водохранилища в 1989—1990 гг. в состоянии подземного контура сооружения и его основания не было существенных отличий от состояния рассматриваемого объекта в 1989 г.

Соответственно довольно закономерными можно считать изменения напоров и расходов фильтрационного потока в основании плотины на первом этапе заполнения водохранилища до отметки 526 м. В этот период относительно высокий приток воды в дренаж отмечался в основании станционных секций 19—20 и 24—28, в суммарный расход составил примерно 90 л/с, что несколько ниже значения предыдущего года при том же УВБ.

При подъеме уровня ВБ выше отметки 526 м начался (как и в 1988 г.) неорганизованный излив из основания в цементационно-дренажной галерее (ЦДГ-1), достигший