Журнал «Энергетическое строительство»
1992. № 5. С. 55-58

противлении усталости исследуемых сварных соединений.

При аттестации технологии сварки и новой сварочной проволоки были определены также теплофизические свойства металла шва при различных температурах (табл. 4).

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что в целом свойства металла шва и сварных соединений плакированных труб $D_у$=850 мм из стали марки 10ГН2МФА, выполненных автоматической аргонодуговой сваркой с применением проволоки марки Св-08Г1СН1МА, аналогичны свойствам сварных соединений, выполненных автоматической сваркой под флюсом и ручной сваркой покрытыми металлическими электродами марки ПТ-30 и отвечают требованиям ОСТ 108.300.02—86. На применение новых технологии сварки и сварочной проволоки получено разрешение Госпроматомнадзора.

Список литературы

1. **Автоматическая** сварка трубопровода главного циркуляционного контура на АЭС с аппаратами ВВЭР-440/ М. И. Лоскутов, С. А. Белкин, В. В. Шефель, И. Соловьев// Энергетическое строительство. 1976. № 7. С. 7—10.

2. **Борисенко М. М., Петин М. М., Новожилов Н. М.** Свойства металла швов при сварке в CO_2 стали 10ГН2МФА// Сварочное производство. 1986. № 12. С. 15—17.

3. **Борисенко М. М., Петин М. М., Стасюк Г. Ф.** Стойкость металла шва против образования кристаллизационных трещин при сварке стали 10ГН2МФА в смеси аргона и углекислого газа// Сварочное производство. 1989. № 5. С. 16—18.

УДК 627.838

Динамика перемещений блоков крепления дна водобойного колодца Саяно-Шушенской ГЭС

Инженеры В. В. БУХАНОВ, Т. В. ГАВРИЛЕНКО, В. А. УЛЯШИНСКИЙ, В. Н. ШАБАНОВ (Сибирский филиал ВНИИГ)

Восстановленное крепление дна водобойного колодца Саяно-Шушенской ГЭС выполнено из бетонных блоков с плановыми размерами в основном 6,25×7,5 м при максимальной высоте блоков около 9 м [1]. Блоки разделены вертикальными швами. Натурные исследования динамики перемещений блоков проводились в период пропусков паводковых расходов в 1986 и 1988 гг. В то время конструкция крепления дна водобойного колодца не имела устройств, препятствующих прониканию пульсации давления в вертикальные межблочные швы. Блоки были связаны между собой и гидродинамически, и механически. Гидродинамическая связь между ними осуществлялась через заполненные водой полости межблочных швов, механическая — через основание, а также локально по вертикальным граням (зацепление на штрабах, выступах шероховатости и т. п.). Совместно со скальным основанием блоки крепления представляли собой сложную систему со случайными, изменяющимися во времени параметрами напряженно-деформированного состояния.

Допустимые растягивающие напряжения на контакте «блок крепления — основание», вызванные вибрациями блока, были определены расчетным путем в предположении, что блок представляет собой упругое тело, упруго заделанное в основание. Они составили 60 кПа. 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 в некоторых блоках еще в период их укладки растягивающие напряжения могли превысить допустимое значение.

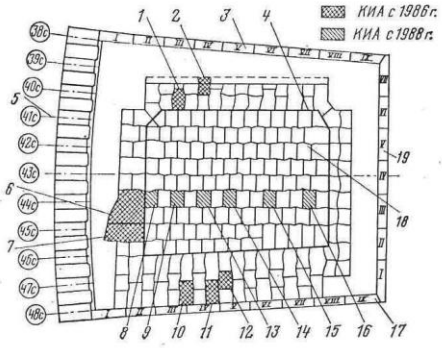

Рис. 1. Схема расположения блоков крепления, оснащенных КИА, в исследованиях 1986 и 1988 гг.:

1, 2 — блоки Ж8-5 и Ж7-1; *3* — секции раздельного устоя; *4* — граница крепления дна колодца (1986 г.); *5* — продольная ось водосброса; *6* — блок ВГ-10; *7* — блоки В10-4 и В10-5; *8* — блок Г9-4; *9* — блок Г8-4; *10* — блок А8-2; *11* — блок А7-2; *12* — блок А6-1; *13* — блок Г7-4; *14* — блок Г6-4; *15* — блок Г5-3; *16* — блок Г3-3; *17* — секции правобережной подпорной стенки; *18* — блоки крепления, не оснащенные КИА; *19* — секции водобойной стенки

На рис. 1 приведена схема крепления дна водобойного колодца и показаны опытные блоки, в которых была установлена контрольно-измерительная аппаратура (КИА). К началу исследований по различным причинам значительная часть КИА вышла из строя, что несколько снизило объем и качество полученной информации. Размещение в блоках КИА, оставшейся в работоспособном состоянии, приведено в табл. 1.

Ввиду повреждения кабеля во время строительных работ КИА, установленная в 1986 г., вышла из строя и ее показания в исследованиях 1988 г. отсутствовали.

Режимы работы водосбросов, при которых проводились измерения, приведены в табл. 2.

При исследованиях в 1986 г. отметка уровня верхнего бьефа находилась в пределах значений 520,1—520,7 м, высота водобойной стенки была на 3 м ниже проектной. В 1988 г. уровень верхнего бьефа был на отм. 530—532,5 м, а водобойная стенка была достроена до проектной отметки.

Результаты натурных исследований динамики перемещения блоков крепления дна водобойного колодца показали, что горизонтальные и вертикальные виброперемещения блоков и основания под ними при работе водобойного колодца являются вынужденными. Они обусловлены пульсацией давления на горизонтальную грань блока, а также пульсацией давления в межблочных швах. Это подтверждают сопоставления спектральных плотностей пульсации давления и вибраций (рис. 2, 3). На частотах, соответствующих максимумам в спектрах пульсации давления и вибраций,имеет место достаточно высокая связь (когерентность) этих процессов (рис. 4).

Стандарты вертикальных и горизонтальных вибраций блоков крепления, измеренные при пропуске паводковых расходов в 1986 и 1988 гг., приведены в табл. 3 и 4.

Исследования вибраций в 1986 г. показали, что с ростом расходов вертикальные виброперемещения блоков возрастают, а при переходе на режим работы водосбросов с меньшим сбросным расходом снова уменьшаются. На протяжении исследуемого периода пропуска расходов контакт (сцепление) опытных блоков с основанием нарушен не был. Функции когерентности колебаний блоков и основания под ними близки к единице (см. рис. 4), а функции разности фаз — к нулевым значениям.

Из результатов исследований 1988 г. такого однозначного вывода о зависимости уровня вибраций от расхода сделать нельзя. Уровень горизонтальных вибраций в начале пропуска паводка 1988 г. был минимальным за весь период пропуска расходов. Через 45 ч работы водосбросов

Таблица 1. **Оснащение КИА опытных блоков крепления**

Год измерений	Блок	Вид измерений	Тип КИА	Место установки КИА
1986	ВГ-10	*Пульсация давления потока*	ДД-10	Верхняя грань блока
		Вертикальные перемещения:	СВ-5	
		блока		То же
		основания		Основание под блоком
	В10-5	»		То же
	А7-2	»		»
		блока		Верхняя грань блока
	Ж8-5	»		То же
		основания		Основание под блоком
	Ж7-1	»		То же
		блока		Верхняя грань блока
1988	Г9-4	»		Центр блока
		Пульсация давления	ДД-10	Схема размещения датчиков показана на рис. 5
		Горизонтальные перемещения блока		
		вдоль потока	ОСП-2М	Верхняя грань блока
	Г8-4	то же	ОСП-2М	Центр блока
		поперек потока	ОСПГ-10	Верхняя грань блока
	Г7-4	вдоль потока	ОСП-2М	То же
	Г6-4	то же	ОСП-2М	»
		поперек потока	ОСПГ-10	»
	Г5-3	вдоль потока	ОСП-2М	»
	Г3-3	то же	ОСП-2М	»

Таблица 2. **Режимы работы водосбросов**

Год измерений	Режим	Работа водосбросов в секциях	Степень открытия затворов	Общий расход через водосбросы плотины, м³/с
1986	1-1	39+44+47	1	2880
	1-2	39+40+43+44+47	0,35	1440
	1-3	39+40+43+44+47	0,72	2900
	1-4	39+40+43+44+47	1	4880
1988	2-1	44	1	1090
	2-2	39+44+47	1	3270
	2-3	39+43+44+47	1	4360
	2-4	39+40+43+44+47	1	5450
	2-5	40+44+47	1	3270
	2-6	40+43+44+47	1	4360

вибрации блоков начали увеличиваться. Это явление можно объяснить вымыванием мусора из межблочных швов, в результате чего облегчалось проникание пульсации давления в швы (рис. 5). Здесь необходимо отметить, что в начальный период работы водосбросов на показаниях датчиков ДД-10 могло сказаться заметное влияние попавшего на мембрану датчика тонкого слоя растворной составляющей бетона. По мере развития пульсационного течения в швах мембраны датчиков очищались, создавалось также больше возможностей для нестесненных горизонтальных смещений блоков. Усилившаяся раскачка блоков вызывала «малоцик-

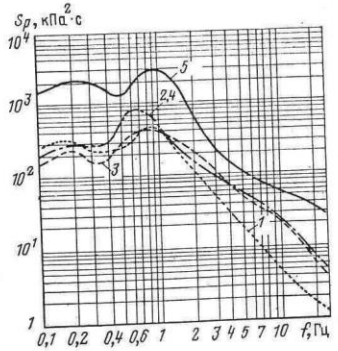

Рис. 2. Функции спектральной плотности пульсации давления в межблочных швах (датчик ДВ):

1 — при режиме работы водосбросов 2—2, наблюдавшемся 19/VII 1988 г.; *2* — то же 24/VII 1988 г.; *3* — при режиме 2-3; *4* — при режиме 2-4; *5* — при режиме 2-5

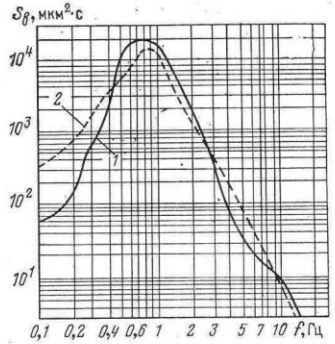

Рис. 3. Функции спектральной плотности вибрации блока Г9-4 при режиме работы водосбросов 2-5:

1 — вертикальные вибрации; *2* — горизонтальные

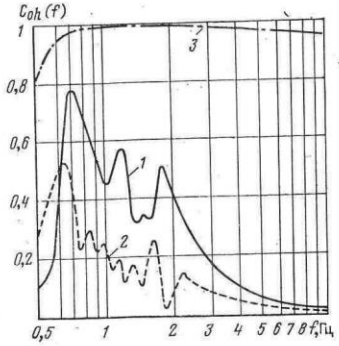

Рис. 4. Взаимосвязь между пульсацией давления пото и вертикальными колебаниями блока ВГ-10 и основан под ним (функция когерентности):

1 — поток — основание (при режиме 1-1); *2* — поток-блок (при жиме 1-4); *3* — блок-основание (при режиме 1-4)

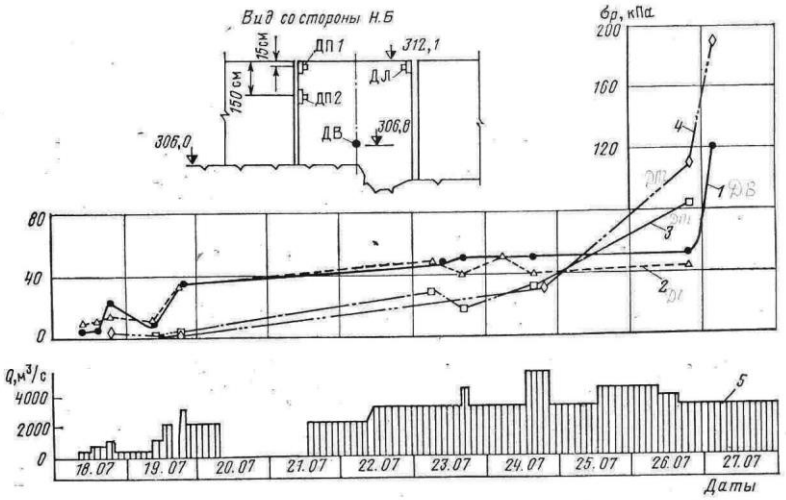

Рис. 5. Изменение во времени стандартов пульсации давления в межблочных швах блока Г9-4:

1 — межблочный шов с верховой стороны блока (датчик ДВ); *2* — межблочный шов с левой стороны блока по транзитному потоку (датчик ДЛ); *3* — межблочный шов с правой стороны по транзитному потоку (датчик ДП-1); *4* — межблочный шов с правой стороны по транзитному потоку (датчик ДП-2); *5* — расход

ловую усталость» контакта «блок — основание», что способствовало возникновению разрушений контакта и дальнейшему увеличению горизонтальных вибраций. Уровень наблюдаемых вертикальных вибраций блока Г9-4, наоборот, снижался по мере увеличения продолжительности работы водосбросов, но 27/VII 1988 г. значения стандарта и размах виброперемещений блоков резко возросли.

Стандарты горизонтальных вибраций блоков в направлении транзитного потока в целом уменьшаются. Одной из основных причин этого является изменение гидродинамического воздействия на крепление; стандарты пульсации давления потока уменьшаются в направлении концевой части водобойного колодца [2].

Представляет интерес сравнение данных исследований 1986 и 1988 гг. по вертикальным вибрациям блоков, близко расположенных друг к другу. Такими являются блоки Г9-4 и ВГ-10 (см. рис. 1). В отличие от исследований 1986 г. в 1988 г. не наблюдается зависимости уровня виб-

Таблица 3. Максимальные размахи и стандарты вертикальных колебаний блоков и основания при пропуске паводка 1986 г.

Опытный блок	Место установки датчика	Максимальные размахи (2А) и стандарты (σ) вертикальных колебаний, мкм, при режимах работы водосбросов							
		1-1		1-2		1-3		1-4	
		σ	2А	σ	2А	σ	2А	σ	2А
ВГ-10	Основание	5,3	—	3,4	—	6,6	—	7,1	—
	Блок	5,5	48	4,3	46	7,3	26	8,7	23
В10-5	Основание	3,8	19	4,3	34	3,9	17	3,9	14
А8-2	Блок	3,7	70	3,8	35	4,6	14	7,9	17
А7-2	Основание	5,3	—	3,4	—	5,3	—	8,9	—
	Блок	—	42	3,4	25	3,9	26	6,6	14
Ж8-5	Основание	7,1	—	3,2	—	7,8	10	—	—
	Блок	—	49	2,8	30	6,3	22	10,2	41
Ж7-1	Основание	7,1	—	3,3	—	—	—	14	—
	Блок	13	50	4,8	21	—	22	—	19

Таблица 4. Максимальные размахи и стандарты виброперемещений блоков при пропуске паводка 1988 г.

Опытный блок	Направление виброперемещений	Максимальные размахи (2А) и стандарты (σ) виброперемещений, мкм, при режимах работы водосбросов														
		2-1		2-2		2-2		2-3		2-4		2-5		2-5		2-6
		σ	2А	σ	2А	σ	2А	σ	2А	σ	2А	σ	2А	σ	2А	2А
Г9-4	Вертикальные	24	—	28	230	16	—	9,4	—	7	56	7,8	60	206	1300	235
	Горизонтальные:															
Г9-4	вдоль потока	1,8	—	1,3	10	17,6	110	13—25	—	21,5	160	45	330	203	2600	540
Г8-4	поперек потока	2,8	—	5	40	4,3	35	4,4	33	5,4	36	5,1	35	9,1	140	550
	вдоль потока	0,2	—	0,3	1,7	0,9	7	1,8	—	0,6	4,3	2,2	12	9,7	110	75
Г7-4	то же	—	—	0,25	1,5	1,2	—	—	—	—	—	1,5	11	3,3	36	0
Г6-4	поперек потока	—	—	—	—	1,9	14	1,9	15	2,4	20	1,6	13	2,1	23	Более 1 мм
	вдоль потока	—	—	—	—	6,7	46	7,2	47	9,7	75	7,2	50	—	—	210
Г5-3	то же	0,05	—	0,1	—	2,7	—	—	—	4	27	3,3	27	—	—	0
Г3-3	»	2	—	0,1	—	2,3	—	—	—	3,4	28	—	—	—	—	0

раций от значения сбросного расхода. Более того, при максимальном сбросном расходе (режим 2—4) зафиксированы минимальные значения стандартов вертикальных вибраций блока Г9-4 (см. табл. 4). По абсолютным значениям стандарты вертикальных вибраций блока были выше в 1988 г. Одна из причин этого — значительно большие пульсации давления потока на крепление дна колодца, чем в 1986 г. [2], вызванные изменением конфигурации дна колодца (см. рис. 1), повышением уровня верхнего бьефа и гребня водобойной стенки.

ВЫВОДЫ

1. В ходе динамических исследований перемещений блоков крепления дна водобойного колодца Саяно-Шушенской ГЭС, выполненных в 1986 и 1988 гг., наблюдалась зависимость уровня вибрации блоков крепления от значений сбросных расходов и состояния вертикальных межблочных швов.

2. Исследованиями 1988 г. установлено, что стандарты пульсаций давления в швах возрастали с увеличением продолжительности работы водосбросов. Это обстоятельство свидетельствует о возникновении течений в полостях швов, в результате чего швы были промыты (из этих полостей вынесло посторонние предметы, строительный мусор). Это обусловило свободу горизонтальных колебаний блоков.

3. Стандарты горизонтальных виброперемещений блоков достигли 203 мкм. Такое их значение превышает предельно допустимое, найденное из условий сохранения ненарушенного сцепления блока с основанием.

4. Крепление дна водобойного колодца с открытыми межблочными швами недолговечно. Результаты выполненных натурных исследований подтверждают необходимость омоноличивания крепления (для усиления механической связи блоков между собой) и устройства шпонок, препятствующих прониканию пульсации давления в межблочные швы.

Список литературы

1. **Разрушение** крепления дна водобойного колодца и его ремонт/ А. И. Ефименко, Г. Л. Рубинштейн, В. Н. Зайцев, Г. К. Дерюгин: Сб. научн. трудов/ Гидропроект. М., 1988. Вып. 125. С. 88—105.

2. **Рубинштейн Г. Л., Дерюгин Г. К., Буханов В. В.** Лабораторные и натурные исследования восстанавливаемого крепления водобойного колодца Саяно-Шушенской ГЭС: Сб. научн. трудов/ Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. М., 1988. Т. 208. С. 7—15.

УДК 624.196:532.11:628.16.067:001.2

Об учете разгружающего эффекта давления профильтровавшей из напорного туннеля воды

Канд. техн. наук Г. К. ЧУМБУРИДЗЕ, инж. Н. В. АМИРИДЗЕ (ГрузНИИЭГС)

Статический расчет трещиностойкой обделки напорного туннеля на внутреннее давление воды производится в соответствии с [1] исходя из предположения о совместной работе обделки и вмещающих горных пород и предусматривает использование упругого отпора породы, возникающего благодаря образованию между породой и обделкой плотного непрерывного контакта. Расчеты основываются на равенстве радиальных перемещений обделки и породы в любой точке их контакта.

Между тем натурные исследования, проводимые ГрузНИИЭГСом в опытных штреках и шурфах, показывают, что при определенных условиях на формирование напряженно-деформированного состояния обделки существенное влияние может оказывать давление воды, профильтровавшей изнутри напорной камеры и аккумулирующейся на контакте обделки с породой и в приконтактной зоне породы. Так, при проведении опытных работ на строительстве Храми ГЭС-I впервые были замечены признаки давления воды (противодавления), проникшей изнутри опытного шурфа в его заобделочное пространство, несмотря на наличие качественно проведенной заполнительной цементации. Это противодавление обусловило замедление роста радиальных деформаций обделки в сторону породы. Аналогичная картина наблюдалась на строительстве Читахеви ГЭС при гидравлическом опробовании опытного шурфа, облицованного бетонной обделкой, которая после завершения опыта оказалась совершенно целой вопреки ожиданиям, согласно расчету, образования в ней сквозных радиальных трещин.

Теоретическое обоснование существования противодавления воды, фильтрующей из занапоренной выработки, и расчетные формулы для определения его значения даны В. М. Насбергом еще в [2]. Однако до последнего времени должного внимания этому вопросу в экспериментальных исследованиях и тем более в расчетах обделок не уделялось. Это следует объяснить появлением нового объекта исследования — обделки с укрепительной цементацией породы, которая, за счет предполагаемого обжатия обделки достигла практической водонепроницаемости системы «обделка — порода». В связи с этим вопрос изучения природы противодавления был отодвинут на задний план.

Вместе с тем участникам экспериментального исследования обделки в опытном штреке Олори Ингури ГЭС известно, что часть заложенных в бетоне обделки тензометров (конструкции и изготовления Оргэнергостроя) зафиксировали отличающиеся от общепринятой теории признаки работы обделки на внутреннее давление: вместо растяжения приборы показали сжатие. Эти данные не увязывались также с общей картиной деформирования обделки по измерениям в диаметральных створах и были расценены как результат неисправности аппаратуры. Однако нельзя сказать, что именно эти данные побудили специалистов обратить внимание на дополнительные нагрузки в породе, создаваемые фильтрующей водой, но тем не менее началом серьезного изучения этого вопроса послужил олорский эксперимент.

Рассматривая обделку как слитно-пористое тело и анализируя возникающее влияние на обделку объемных фильтрационных сил, ухудшающих ее статическую работу, а также противодавление профильтровавшей за обделку воды, П. У. Пониматкин указал на возможность отделения от монолитного породного массива обделки [3] или обделки вместе с зоной пород, подвергнутой трещинообразованию при условии превышения радиальных растягивающих напряжений прочности породы на разрыв или сцепления обделки с породами [4].

Вопрос о роли напорной воды, проникающей в заобделочное пространство, в формировании напряженно-деформированного состояния на контакте «обделка — порода» был включен в программу исследований в опытном штреке на Чарвакской ГЭС. С этой целью напорная камера штрека была совмещена с цилиндрическим гидравлическим штампом [5]. В данном эксперименте помимо установления количественной разности в деформациях пород и обделки при «мокром» и «сухом» нагружении выработки зафиксированы радиальные деформации обделки, направленные навстречу приложенной нагрузке, т. е. повторилась картина необъясненного поведения обделки, имевшего место в опытах на ГАЭС Фестиниог (Англия). В опытном штреке Чарвакской ГЭС было выявлено, что обделка, нагруженная внутренним давлением воды, лишь частично контактирует с контуром выработки, причем она нормально деформируется по направлению наибольшей податливости породы, а по направлению наименьшей податливости отлипает от нее. Образовавшийся вокруг обделки зазор увеличивается по мере возрастания количества циклов нагружения — разгрузки, а при сбросах давления становится периметральным.

Это явление тогда было объяснено исследователями действием давления воды, профильтровавшей за обделку, и его активным взаимодействием с внутренним давлением [6]. Авторы эксперимента не рискнули представить это