

МОНИТОРИНГ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОКТОГУЛЬСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В СТВОРЕ КУРПСАЙСКОЙ ГЭС

В.А. Трофименцева – аспирант

Приводятся результаты мониторинга уровней, расходов и объемов воды Курпсайского водохранилища. Проводится водно-балансовый расчет. Обосновывается пропускная способность поверхностного водосброса Курпсайской ГЭС.

Изменение водно-энергетического баланса на каскаде Нарынских ГЭС за последние годы, связанное с природно-климатическими и, в большей мере, с повышением энергопотребления и режима эксплуатации Токтогульского каскада, потребовали интенсивного аккумулярования стока в Токтогульском и Курпсайском водохранилищах [1]. В наиболее напряженные 2004, 2006 гг. впервые за весь период эксплуатации наблюдалось наполнение этих водохрани-

лищ выше уровня НПУ, и производился сброс излишков воды не только через поверхностный водосброс (ПВС) Токтогульской плотины, но и через ПВС и глубинный водосброс (ГВС) Курпсайской плотины [2].

Проведенные учеными Кыргызско-Российского Славянского университета натурные испытания [3], изучение проектно-конструкторской документации, эксплуатационных материалов и выполненные гидравлические расчеты выяви-

ли серьезные гидротехнические проблемы на водосборных сооружениях Курпсайской ГЭС (КГЭС).

На Курпсайском гидроузле проблема эвакуации излишков воды из водохранилища связана с явлением интенсивной кавитации бетонного покрытия боковых стенок глубинного водосброса, вызванной отклонением при строительстве ГВС КГЭС от проектного варианта аэрирования потока и некачественным выполнением бетонной облицовки. По результатам проведенных работ и замеров [2], размеры кавитационных каверн за два-три месяца эксплуатации этого водосброса достигали угрожающей величины. Так, максимальная каверна на бетонной боковой стенке ГВС, граничащей с машинным залом Курпсайской ГЭС, была длиной 14,3 м, шириной до 1,2 м и глубиной до 1,43 м при толщине этой боковой стенки в 2,0 м.

Концевая часть поверхностного водосброса Курпсайской ГЭС проектировалась без надлежащего экспериментального обоснования и, как было выявлено в результате натурных экспериментов, струя, отбрасываемая с концевой части, создает опасное обводнение склонов речной поймы и энергетических сооружений. В частности, проектный расход ПВС при отметке НПУ=724,0 м равен $Q=1500$ м³/с и при отметке ФПУ=725,0 м расход воды составляет $Q=1680$ м³/с. Однако фактически пропускаемый расход воды через поверхностный водосброс Курпсайской ГЭС по результатам выполненных в 2004 г. натурных исследований не превышает 450 м³/с. Это связано с тем, что длина распространения выходного потока и водяной пыли превышает проектные характеристики и приводит к водонасыщению левого склона р. Нарын, способствуя образованию оползневых явлений в нижнем бьефе сооружения. Кроме того, при пропуске расходов более 450 м³/с начинается подмыв опоры ЛЭП-220 и проникновение отброшенной струи в траншею силового кабеля, что создает аварийную ситуацию на энергетическом объекте.

С целью ликвидации негативной ситуации на Курпсайской ГЭС было намечено проведение мониторинга водно-балансовых характеристик в створе плотины. Необходимо было выполнить расчет баланса воды в створе Курпсайской ГЭС с учетом расходов воды, поступающей из Токтогульского в Курпсайское водохранилище.

Имеющаяся на электростанциях информация позволила провести помесечные расчеты баланса воды с 1996 г. по 2007 г. в створе Курпсайской ГЭС. Расчет проводили на максималь-

ные расходы притока воды. Для составления уравнения баланса расходов в створе Курпсайской плотины использовали следующие данные: полезный бытовой приток в Курпсайское водохранилище Q_6 ; расход, пропускаемый через гидроагрегаты турбин Курпсайской ГЭС $Q_{г. агр.}$; расход, пропускаемый через КПВС $Q_{ПВС}$; расход КГВС $Q_{ГВС}$; суммарный фильтрационный расход через тело плотины, скальное основание и боковые примыкания $Q_ф$; величины протечек $Q_п$; расход воды из Курпсайского водохранилища, теряемый на льдообразование $Q_л$; расход воды на испарение из водохранилища $Q_и$.

Согласно получаемой ежедневной информации о режиме работы станций, были составлены водно-балансовые характеристики по расходам воды в створе Курпсайской ГЭС за 1996–2007 гг. (см. таблицу).

При составлении таблицы полезный бытовой приток в Курпсайское водохранилище Q_6 складывался: попусков с Токтогульской ГЭС и бокового притока р.Кара-Су левая. Данные по расходам получены путем обработки ежедневных замеров наполнений верхнего бьефа, которые обрабатывали на компьютере с помощью программного обеспечения, разработанного ПКТИ “Водавтоматика и метрология” Департамента водного хозяйства Минсельхоза Кыргызской Республики.

Анализировали также расходы воды, пропускаемой через гидроагрегаты Курпсайской ГЭС, и сбрасываемой через ПВС и ГВС Курпсайской ГЭС, фильтрационный расход через тело плотины, скальное основание и боковые примыкания $Q_{фил}$ [1]. Величины протечек через гидроагрегаты ГЭС в режиме холостого хода (0,2%) были учтены в общей сумме сброса воды.

Расчет испарения с поверхности Курпсайского водохранилища проводили по известной методике [3].

Среднемноголетнее испарение с поверхности водоема определяли по формуле:

$$E_{0,6} = \bar{E}_{20} k_h k_3 k_w, \quad (1)$$

где \bar{E}_{20} – среднемноголетнее испарение с бассейна площадью 20 м², k_h – поправочный коэффициент на глубину водоема; k_3 – поправочный коэффициент на защищенность водоема от ветра древесной растительностью, строениями, крутыми берегами и другими препятствиями; k_w – поправочный коэффициент на площадь водоема.

Значения $\bar{E}_{20} = 110$ мм; $k_h = 0,97$; $k_3 = 0,96$; $k_w = 1,26$ принимали по таблицам 2.17, 2.18, 2.19 [3].

Изменение уровня, объема и расходов воды Курпсайского водохранилища за 1996–2007 гг.

Месяц	Отметка и объем на начало месяца											
	1996 г.				1997 г.				1998 г.			
	Отметка, м.	Объем, м ³	Приток, м ³ /с	Расход, м ³ /с	Отметка, м.	Объем, м ³	Приток, м ³ /с	Расход, м ³ /с	Отметка, м.	Объем, м ³	Приток, м ³ /с	Расход, м ³ /с
Январь	723,48	366	606	658	723,15	362	660	688	723,2	363	598	623
Февраль	722,93	359	602	627	723,28	364	623	643	723,07	361	549	550
Март	723,34	365	532	561	722,72	357	514	541	723,33	364	455	474
Апрель	722,74	357	341	358	722,35	353	294	318	723,5	367	240	264
Май	722,6	357	244	276	722,81	358	284	305	722,81	356	180	220
Июнь	722,59	355	611	621	723,67	368	484	485	723,26	363	185	216
Июль	723,3	364	549	548	722,84	358	652	607	722,99	360	325	338
Август	722,96	360	506	513	722,97	360	502	486	723,15	352	253	319
Сентябрь	722,56	354	245	251	723,18	362	173	180	723	360	263	279
Октябрь	722,72	357	382	382	723,42	365	178	179	723,46	366	339	358
Ноябрь	723,57	367	486	496	723,36	364	464	447	723,12	362	420	428
Декабрь	723,79	369	633	646	722,98	360	540	557	723,12	362	562	569
Год. хол. сброс млн.м ³	2,73				34,3				97,1			
	1999 г.				2000 г.				2001 г.			
Январь	723,05	361	642	645	723,26	363	681	689	723,04	361	625	624
Февраль	723,14	362	581	586	723,64	368	707	721	723,48	366	688	698
Март	722,87	359	555	579	723,56	367	561	569	722,84	358	509	504
Апрель	723,65	368	438	465	723,44	365	331	360	723,24	363	359	365
Май	722,9	359	247	273	723,24	363	380	380	723,42	365	269	279
Июнь	722,95	360	275	292	723,18	362	469	456	723,18	362	411	408
Июль	722,9	359	455	459	723,34	364	577	600	722,56	355	545	547
Август	721,94	348	433	431	723,1	361	522	514	723,27	363	456	456
Сентябрь	722,36	353	221	223	723,24	363	243	242	723,62	368	284	285
Октябрь	723,7	368	306	319	723,38	364	396	407	723,62	368	325	332
Ноябрь	723,48	366	553	553	723,2	361	480	481	723,47	366	392	401
Декабрь	723,56	367	622	633	723,92	370	556	554	723,37	365	624	623
Год.хол. сброс млн.м ³	7,9											
	2002 г.				2003 г.				2004 г.			
Январь	722,74	357	583	589	723,56	367	701	638	723,52	366	611	619
Февраль	722,91	359	533	535	723,49	366	648	717	721,05	337	536	541
Март	723,57	367	485	474	723,76	369	608	602	723,35	364	511	537
Апрель	723,57	367	331	350	723,77	369	417	441	723,56	367	362	388
Май	723,49	366	155	215	723,68	368	243	269	723,62	368	305	339
Июнь	723,42	365	176	195	723,39	365	147	173	723,9	371	487	492
Июль	722,77	358	294	286	723,47	366	275	284	723,09	361	458	467
Август	722,74	357	375	318	723,27	363	461	482	723,94	371	487	500
Сентябрь	722,75	357	217	168	723,46	366	457	494	723,3	364	441	445

Окончание таблицы

Октябрь	723,41	365	358	318	723,52	366	487	462	722,79	358	468	477
Ноябрь	723,26	363	534	472	723,49	366	578	577	722,51	355	580	578
Декабрь	722,1	350	730	652	723,40	365	642	647	723,29	365	667	664
Год.хол. сброс млн.м ³									1454,76			
	2005 г.				2006 г.				2007 г.			
Январь	723,66	368	680	683	723,37	365	708	709	723,58	367	717	711
Февраль	723,2	363	692	710	723,34	364	643	647	723,32	364	666	660
Март	723,49	366	448	476	723,73	369	505	505	723,59	367	638	637
Апрель	723,31	364	406	408	723,67	368	404	414	723,33	364	331	338
Май	723,74	369	325	314	723,43	364	262	266	723,53	366	277	277
Июнь	723,55	367	278	276	723,26	363	278	276	723,27	363	425	421
Июль	723,26	363	392	392	723,36	364	411	408	723,22	359	524	520
Август	723,39	365	413	411	723,68	368	415	415	723,18	362	465	464
Сентябрь	723,43	365	385	390	723,52	367	368	398	723,34	364	308	308
Октябрь	723,04	361	467	468	723,32	364	407	411	723,14	362	403	398
Ноябрь	723,23	363	581	576	723,18	363	559	548	723,04	361	520	506
Декабрь	723,37	365	632	638	723,52	367	698	685				

Значение среднемноголетнего испарения с поверхности Курпсайского водохранилища составило: $E_{0,в} = 110 \cdot 0,97 \cdot 0,96 \cdot 1,26 = 129$ мм.

Используя полученное значение среднемноголетнего испарения с поверхности Курпсайского водохранилища, был установлен среднегодовой объем испарения:

$$V_{исп.} = E_{0,в} \cdot S_{вхр.} = 129 \cdot 10^6 \cdot 12 = 1,5 \cdot 10^6 \text{ м}^3. \quad (2)$$

Полученное значение среднегодового объема испарения (2) с поверхности водохранилища Курпсайской ГЭС позволило определить расход воды на испарение из водохранилища $Q_{исп.}$, который учитывали в таблице.

Уравнение баланса расходов воды, положенное в основу проведенного водно-балансового расчета, можно записать в форме:

$$Q_{г} = Q_{гс} + Q_{пвс} + Q_{гвс} + Q_{физ.} + Q_{исп.} + Q_{п} + Q_{пр}. \quad (3)$$

Зависимость (3) положена в основу табличного расчета (см. таблицу).

Было отмечено [2], что одним из наиболее напряженных для водосбросных сооружений КГЭС явился 2004 г. Попуски холостых расходов через поверхностный водосброс начались 26 мая и продолжались по 1 июня включительно. За этот период через ПВС ежедневно пропускались расходы от 400 м³/с до 600 м³/с, порой по 24 часа в сутки. Далее после двухнедельного перерыва пропуск холостых расходов через ПВС

продолжили с 14 июня по 6 июля расходами от 300 м³/с до 600 м³/с. Время работы водосброса в этот период составляло от 1 часа (1 день – 14 июня) до 24 часов (16 дней) в сутки.

Следующий этап пропуска холостых расходов через ПВС начался 28 июля и осуществлялся по 19 августа включительно. За это время сбрасываемые через ПВС расходы воды изменялись от 150 м³/с до 500 м³/с, а продолжительность их составляла в большинстве случаев 24 часа в сутки, т.е. ПВС достаточно длительное время работал круглосуточно без перерыва.

С 7 августа 2004 г. параллельно с ПВС в работу включился ГВС, пропуск расходов по которому продолжался до 19 августа расходами от 300 м³/с до 500 м³/с. Причем работал ГВС от 3 до 24 часов в сутки параллельно с ПВС (рис. 1). Такой напряженный график работы водосбросных сооружений Курпсайского гидроузла был вызван производственной необходимостью с целью избежать переполнения водохранилища.

Однако в 2006 г. опять возникла острая необходимость в эксплуатации как ПВС, так и ГВС Курпсайской ГЭС. Поверхностный водосброс КГЭС включился в работу 26 августа и продолжал работать ежедневно до 27 ноября, пропуская от 100 м³/с до 350 м³/с по 23...24 часа в сутки. С 9 по 23 сентября параллельно с ПВС к работе подключился ГВС, стабильно сбрасывая расходы 200 м³/с по 24 часа в сутки. Таким



Рис. 1. Распространение компактной струи и водяной пыли при совместном пропуске по глубинному и поверхностному водосбросам расходов воды $Q_{ПВС} = Q_{ГВС} = 450 \text{ м}^3/\text{с}$.

образом, с 9 по 23 сентября 2006 г. суммарный сбросной расход воды достигал $550 \text{ м}^3/\text{с}$.

Опыт эксплуатации водосбросных сооружений Курпсайской ГЭС за последние пять лет (начиная с 2003 г.), а также исследования, проведенные в рамках Договора ХС-06-04 КРСУ с каскадом Токтогульских ГЭС [3], позволили в значительной мере снизить риски при работе этих сооружений. Персонал Курпсайской ГЭС неукоснительно выполнял рекомендации, разработанные по проекту ХС-06-04.

Величины суммарных сбросных расходов через ПВС и ГВС не должны были превышать $600 \text{ м}^3/\text{с}$, что меньше максимально допустимых $Q_{\max} = 750 \text{ м}^3/\text{с}$ и соответствует рекомендациям по временной эксплуатации и реабилитации водосбросных сооружений Курпсайской ГЭС, разработанным в рамках проекта ХС-06-04 [3]. Кроме того, максимальные расходы воды, пропускаемые через ПВС, составляли $Q_{ПВС} = 500 \text{ м}^3/\text{с}$, что также в пределах допустимых значений $Q_{ПВС\max} = 650 \text{ м}^3/\text{с}$. Расходы воды через ГВС не превышали $Q_{ГВС} = 500 \text{ м}^3/\text{с}$, что допускается рекомендациями [3].

Для обоснования максимального расхода воды, который необходимо пропустить через ПВС КГЭС, необходимо было определить расход воды в р.Нарын 0,01% обеспеченности. Для этого следует провести расчеты по определению нормы стока, коэффициента вариации и построить интегральную кривую обеспеченности.

Для расчетов по определению нормы стока воспользуемся среднегодовыми значениями расходов воды в р. Нарын за последние 33 года, для которых в достаточном объеме имеется фактологический материал по расходам воды:

средний максимальный многолетний расход, по нашему расчету, составил за период наблюдения $Q_{cp} = 1452,2 \text{ м}^3/\text{с}$.

Коэффициент вариации C_v , характеризующий колебания годовых значений стока относительно их средней величины, определяли по формуле [5]:

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - 1)^2}{n-1}} = \quad (4)$$

$$= \sqrt{2,3 / (33 - 1)} = 0,27$$

где n – количество лет вариационного ряда; $K_i = Q_i / Q_{0n}$ – безразмерный модульный коэффициент [2]; Q_i – максимальный расход данного года; Q_{0n} – средний максимальный многолетний расход.

Для установления эмпирической обеспеченности членов ограниченного ряда используем формулу С.Н. Крицкого [3]:

$$P = \frac{m}{n+1} 100\%, \quad (5)$$

где m – номер года в вариационном ряду.

Для построения теоретической кривой обеспеченности необходимо по данным наблюдений вычислить значения параметров ее дифференциального уравнения и произвести его интегрирование.

Практически достаточно было установить три основных параметра теоретической кривой распределения – среднюю многолетнюю величину (норму) Q , которая, будучи выражена в относительных единицах – модульных коэффициентах K , равна единице; коэффициент изменчивости (вариации) C_v ; коэффициент асимметрии

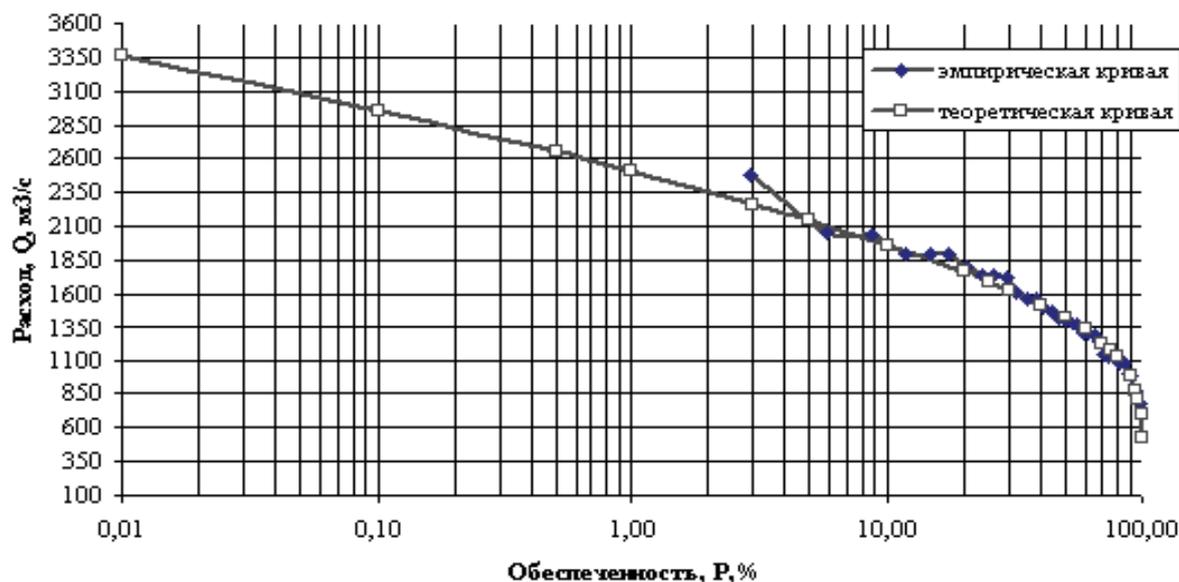


Рис. 2. Аналитическая и эмпирическая кривые обеспеченности годового стока (максимальные многолетние расходы).

C_s , используя которые была построена теоретическая кривая обеспеченности годового стока по формуле:

$$K_{p\%} = \Phi_{p\%} \cdot C_v + 1 \quad (6)$$

где $\Phi_{p\%}$ – функция Фостера, $\Phi_{p\%} = -\Phi_{p\%}(C_s, P_{\%})$.

Используя проведенные расчеты и построенную интегральную кривую обеспеченности (рис. 2), определили расход р. Нарын для 0,01% обеспеченности превышения паводка, который составил $Q_{0,01\%} = 3357,8 \text{ м}^3/\text{с}$.

Максимальная пропускная способность Токтогульской ГЭС принята в соответствии с проектными данными:

$$Q_{ГЭС\max} = Q_{з.азр.} + Q_{ПВС\max} + Q_{ГВС\max} = 245 \cdot 4 + 1300 + 1170 = 3450 \text{ м}^3/\text{с} \quad (7)$$

С учетом потерь на испарение, протечки и фильтрацию необходимая пропускная способность водосбросных сооружений Курпсайской ГЭС при прохождении расхода воды 0,01% обеспеченности рассчитывалась по зависимости:

$$Q_{х.сбр} = Q_{0,01\%} - Q_{ГЭС} - Q_{исп} - Q_{фил} - Q_{пр} + Q_{б.пр} \quad (8)$$

где $Q_{0,01\%}$ – расход 0,01% обеспеченности реки Нарын; $Q_{ГЭС}$ – расход через гидроагрегаты Курпсайской ГЭС; $Q_{исп}$ – испарение с зеркала Курпсайского водохранилища; $Q_{фил}$ – фильтрация через плотину Курпсайской ГЭС и скальное основание; $Q_{пр}$ – протечки через гидроагре-

гаты КГЭС; $Q_{б.пр}$ – боковая приточность в реку Нарын.

Пропускная способность водосбросных сооружений КГЭС составила:

$$Q_{х.сбр} = Q_{0,01\%} - Q_{ГЭС} - Q_{исп} - Q_{фил} - Q_{пр} + Q_{б.пр} = 3357,8 - 972 - 0,048 - 0,078 - 2,65 + 25,69 = 2408,71 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Максимальный расход через гидроагрегаты Курпсайской ГЭС:

$$Q_{ГЭС} = 243 \cdot 4 = 972 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Выполненные расчеты позволили получить уточненное значение пропускной способности поверхностного водосброса Курпсайской ГЭС, которое составило:

$$Q_{ПВС} = Q_{х.сбр} - Q_{ГЭС} = 2408,71 - 1042 = 1366,71 \text{ м}^3/\text{с} \quad (9)$$

Следовательно, проектная пропускная способность ПВС, равная $Q=1500 \text{ м}^3/\text{с}$ при НПУ и $Q=1680 \text{ м}^3/\text{с}$ при ФПУ, достаточна для обеспечения надежного пропуска катастрофических расходов через створ гидроузла.

Проведенный мониторинг гидравлических характеристик Токтогульского водохранилища в створе Курпсайской ГЭС позволяет оценить эксплуатационные показатели гидроэлектростанции, а также подтвердить величину максимального требуемого расхода воды поверхностного водосброса [4, 5].

Литература

1. Худайбердиев А.Р., Лавров Н.П. и др. Оценка состояния и разработка рекомендаций по реабилитации водосбросных сооружений Токтогульской и Курпсайской ГЭС // Гидротехническое строительство. – №1. – С. 30–35.
2. Отчет по хоздоговорной теме НИР ХГ-05-07 “Исследование водосбросных сооружений Курпсайской ГЭС”. – Бишкек: КРСУ, 2008.
3. Отчет по хоздоговорной теме НИР ХС-06-04 “Оценка состояния и разработка программы исследований водосбросных сооружений Токтогульской и Курпсайской ГЭС”: В 4 кн. – Бишкек: КРСУ, 2004.
4. Лучшева А.А. Практическая гидрология. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 440 с.
5. Железняков Г.В., Неговская Т.А., Овчаров Е.Е. Гидрология, гидрометрия и регулирование стока: Учебник. – М.: Колос, 1984.