

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ  
НА ТРАНЗИТНОЙ ЧАСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО ВОДОСБРОСА  
КУРПСАЙСКОЙ ГЭС**

*Курпсай гидроэлектростанциясынын үстүнкү суу тааштагычтан (ҮСТ) агып өтүү процесси көрсөтүлдү. Курпсай ГЭСинин ҮСТнын параметрлерин тура тандалышы негизделет.*

*Рассматривается процесс истечения через поверхностный водосброс (ПВС) Курпсайской гидроэлектростанции. Обосновывается правильность выбора параметров ПВС Курпсайской ГЭС.*

*Expiration process through a superficial spillway (SS) Kurpsajsky hydroelectric power station is considered. Correctness of a choice of parameters SS of Kurpsajsky HYDROELECTRIC POWER STATION is proved.*

Критическая ситуация на Курпсайской ГЭС летом 2004 г. стала причиной подписания Договора Д-3-102-9/369 от 30.06.2004 г. (ХС-06-2004) между Каскадом Токтогульских ГЭС (ТГЭС) и Кыргызско-Российским Славянским университетом (КРСУ) о проведении научных исследований водосбросных сооружений Токтогульской и Курпсайской ГЭС /1/.

В соответствии с Договором Д-3-102-9/369 комиссия в составе представителей Каскада ТГЭС, ОАО «Электрические станции» и КРСУ провела визуальное обследование гидротехнических сооружений и гидромеханического оборудования поверхностного водосброса (ПВС) Курпсайской ГЭС (КГЭС).

При натурном обследовании отводящего тракта ПВС КГЭС, выполненного в виде туннеля корытообразного профиля с шириной по дну 10 м, переменной высотой на начальном участке 11 м и на основном отводящем – 8,5 м, было обнаружено достаточное количество местных очагов кавитации. Наиболее глубокие кавитационные каверны располагались вблизи колена, соединяющего верхний (начальный) и нижний (основной) участки водосброса. Самая глубокая каверна достигала 0,5 м и располагалась по правой стенке водосбросного сооружения.

Каверны на нижнем участке ПВС имели большую площадь, чем глубокие каверны в колене, но были несколько мельче по глубине (0,1...0,2 м).

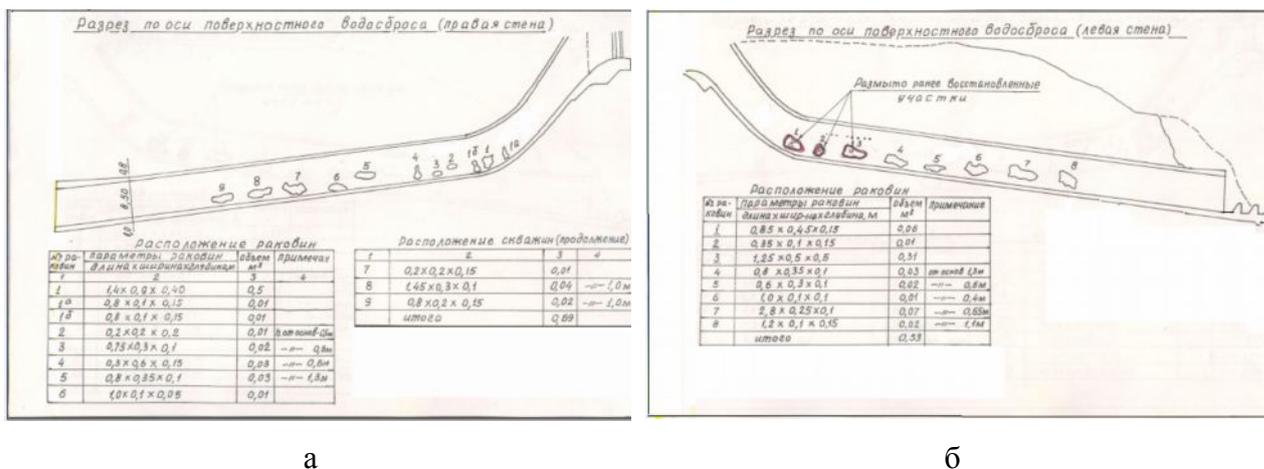


Рис. 1. Схема расположения кавитационных каверн на стенках ПВС КГЭС

Для того, чтобы обосновать наличие очагов кавитации на поверхностях ПВС, необходимо было провести теоретические исследования и расчеты гидравлических явлений на транзитной части поверхностного водосброса.

Состав теоретических исследований включал:

- 1) теоретическое обоснование достаточности габаритных размеров ПВС для пропуска максимальных расходов;
- 2) установление наличия аэрации на водосбросе и определение створа начала аэрации потока;
- 3) определение допустимых технологических неровностей на внутренних поверхностях ПВС КГЭС.

### Обоснование достаточности габаритных размеров ПВС для пропуска максимальных расходов

Перечисленные теоретические исследования, прежде всего, предполагали установление наполнений на водосбросе при максимальном расходе истечения  $Q=1680 \text{ м}^3/\text{с}$ . Используя схему ПВС (рис.2), необходимо было найти зависимость для определения глубины потока в сечении 2-2 на выходе из колена.

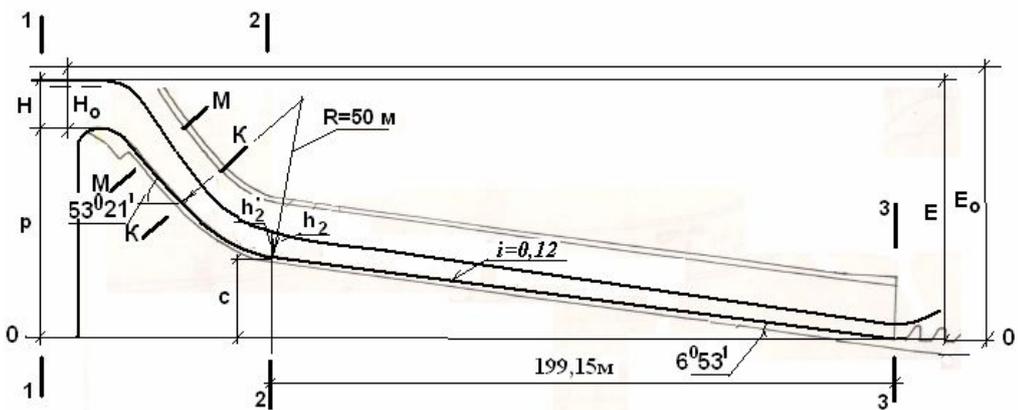


Рис.2. Схема поверхностного водосброса КГЭС

Составим уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 2-2:

$$H_0 + p = c + h_2^1 + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{mp}; \Rightarrow$$

$$E_0 = c + 1,005h_2 + \left(\alpha_2 + \sum \xi\right) \frac{v_2^2}{2g},$$

(1)

где  $h_2, v_2, \alpha_2$  – глубина, скорость, коэффициент кинематической энергии потока в сечении 2-2;  $E_0$  – полный напор.

Используя выражение (1), найдем выражение для определения глубины в сечении 2-2. Для этого сначала выразим скорость  $v_2$  через другие параметры уравнения Бернулли. Преобразуем уравнение (1):

$$\left(\alpha_2 + \sum \xi\right) \frac{v_2^2}{2g} = E_0 - c - 1,005h_2; \Rightarrow$$

$$v_2 = \varphi_{1-2} \sqrt{2g(E_0 - c - 1,005h_2)},$$

(2)

где  $\varphi_{1-2}$  – коэффициент скорости потока в сечении 2-2.

Выражение (2) может служить для определения скорости потока в сечении 2-2.

Расход воды в сечении 2-2 можно определить по формуле:

$$Q = v_2 \cdot B \cdot h_2; \Rightarrow v_2 = Q / (B \cdot h_2),$$

(3)

где  $B$  – ширина водосброса.

Приравняем выражения (2) и (3):

$$\frac{Q}{B \cdot h_2} = \varphi_{1-2} \sqrt{2g(E_0 - c - 1,005h_2)}.$$

(4)

Преобразуем выражение (4) к виду:

$$1,005h_2^3 - (E_0 - c)h_2^2 + \frac{Q^2}{\varphi_{1-2}^2 B^2 \cdot 2g} = 0.$$

(5)

Кубическое уравнение (5) позволяет найти глубину потока в сечении 2-2.

Подставляя числовые значения параметров КПВС в уравнение (5), приводим его к виду:

$$1,005h_2^3 - 69,65h_2^2 + 1906,1 = 0.$$

(6)

Решая уравнение (6), определяем глубину в сечении 2-2:  $h_2 = 5,45 м$ .

Из расчета безвакуумного водослива практического профиля, расположенного на входе в КПВС, определяем глубину  $h_1$  потока в сечении К-К перед поворотом на водоскате.

При расходе  $Q = 1680 м^3 / с$  глубина  $h_1 = 5,5 м$ .

Координаты глубин на водоскате КПВС определены по таблицам Кригера и Офицерова /2/.

Таким образом, в колене КПВС происходит изменение глубины от  $h_1 = 5,5 м$  до  $h_2 = 5,45 м$ . Это происходит из-за изменения уклона дна водосброса.

Проведем исследование кривой свободной поверхности потока на участке водосброса между сечениями 2-2 и 3-3. Участок имеет уклон дна  $i = 0,12$ .

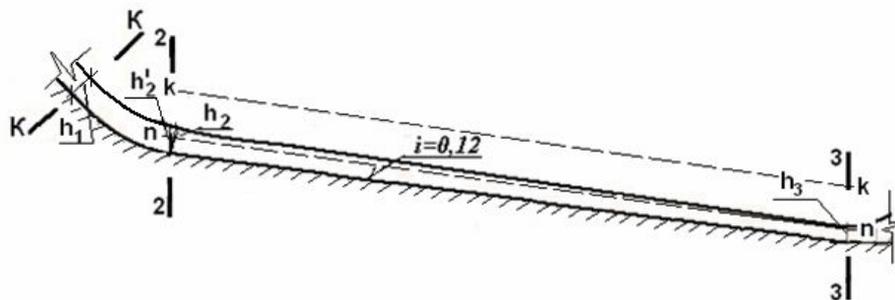


Рис. 3. Схема кривой свободной поверхности на низовом участке водоската КПВС

Определим критическую глубину на участке ПВС между сечениями 2-2 и 3-3:

$$h_{кр} = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gB^2}} = \sqrt[3]{\frac{1680^2}{9,81 \cdot 100}} = 14,2 м,$$

где  $\alpha \approx 1,0$ .

Определим критический уклон участка ПВС между сечениями 2-2 и 3-3:

$$i_{кр} = \frac{g\chi_{кр}}{\alpha C_{кр}^2 B_{кр}} = \frac{9,81 \cdot 38,4}{88,93 \cdot 10} = 0,0048.$$

(7)

В нашем случае  $i = 0,12 > i_{кр} = 0,0048$ . Следовательно, на рассматриваемом участке водосброса имеет место бурный режим движения потока.

Расчетом по зависимости Шези устанавливаем, что для расхода  $Q = 1680 м^3 / с$  нормальное наполнение  $h_0 = 3,9 м$ . Поскольку  $h_0 = 3,9 м < h_{кр} = 14,2 м$ ;  $П_{кр} > 1,0$ .

В нашем случае  $h_{кр} > h > h_0$ .

В сечении 2-2 глубина  $h = 5,45 м > h_0 = 3,9 м$ . Однако  $h = 5,45 м < h_{кр} = 14,2 м$ .

Расходные характеристики:  $K > K_0$ ;  $K_0 / K < 1,0$ .

Таким образом, на участке КПВС между сечениями 2-2 и 3-3 присутствует кривая спада. При  $h \rightarrow h_0$  эта кривая асимптотически стремится к линии нормальных глубин n-n (рис.3). Поэтому в сечении 3-3 глубина  $h_3 \approx h_0$ .

Вблизи сечения 2-2 в верхней части кривой спада движение может считаться плавно изменяющимся только условно.

Кривая свободной поверхности потока на участке КПВС между сечениями 2-2 и 3-3 имеет вогнутую форму.

### **Установление наличия аэрации на водосбросе и определение створа начала аэрации потока**

Створом возникновения аэрации потока на КПВС при максимальном расходе водосброса  $Q = 1680 м^3 / с$  можно считать створ, в котором скорость потока становится равной /3/:

$$\overline{v_{на}} = 6,63 \sqrt{gR \cos \theta} \left( 1 + \frac{150\delta}{g\rho R^2} \right) \cdot \left( 1 + \frac{2,76\sqrt{g}}{C_u} \right)^{-1},$$

(8)

где  $\sigma = 0,074 \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2$  – постоянная поверхностного натяжения;  $\rho = 1000 \text{ кг} / \text{м}^3$  – плотность воды;  $C_{ш}$  – коэффициент Шези;  $\theta$  – угол наклона дна водопропускного тракта к горизонту.

Проверим на возможность образования аэрации, прежде всего, створ М-М, наиболее близко расположенный к входу КПВС.

В створе М-М начинается прямой участок в верхней части водосброса.

Основные параметры КПВС в створе М-М:

$$h = 5,58 \text{ м}; \quad \omega = 55,8 \text{ м}^2; \quad \chi = 21,16 \text{ м}; \quad R = 2,64 \text{ м}; \quad C_{ш} = 86,74 \text{ м}^{0,5} / \text{с}.$$

Используя эти гидравлические параметры, входящие в (8), находим:

$$\overline{v_{на.М}} = 6,63 \sqrt{9,81 \cdot 2,64 \cdot 0,597} \left( \sqrt{1 + \frac{150 \cdot 0,074}{9,81 \cdot 1000 \cdot 2,64^2}} \right) \cdot \left( 1 + \frac{2,76 \sqrt{9,81}}{86,74} \right)^{-1} = 23,73 \text{ м} / \text{с}.$$

Скорость потока в створе М-М:

$$v_M = \frac{Q}{\omega} = \frac{1680}{5,58 \cdot 10} = 30,1 \text{ м} / \text{с}.$$

(9)

Таким образом, в створе М-М имеет место:  $v_M = 30,1 \text{ м} / \text{с} > \overline{v_{на.М}} = 23,73 \text{ м} / \text{с}$ .

Следовательно, уже в створе М-М происходит аэрация потока на водоскате КПВС.

Процесс аэрации потока распространяется в большей или меньшей степени и на участки водосброса, расположенные ниже по течению /3/.

Проведенный расчет показывает, что, не смотря на наличие аэрации потока, в сечении М-М, а, следовательно, и во всей нижерасположенной части КПВС, скорости потока так велики (достигают 30,1 м/с и более), что существует большая вероятность возникновения кавитационной эрозии. Это подтверждается наблюдениями эксплуатационного персонала станции и нашло отражение в акте осмотра КПВС.

Далее необходимо рассмотреть возможность предотвращения и борьбы с кавитационной эрозией на КПВС.

### **Определение допустимых технологических неровностей на поверхности КПВС**

Поскольку из всех мер борьбы с кавитационной эрозией на водоскате КПВС мы на сегодня можем рекомендовать только один – это создание достаточно гидравлически гладких поверхностей стенок водосброса, определим допустимую высоту выступов  $Z_{н доп}$

облицовки бетона /4/. Для определения величины  $Z_{\text{дон}}$  используем графики на рис. 4.12 /4/.

1. Расчет по определению допустимой высоты технологических неровностей проведем для двух створов: 1) створа начала аэрации и 2) створа с максимальной скоростью потока.

Сначала определим допустимую высоту выступов в створе начала аэрации.

Скорость потока при расходе воды  $Q = 1680 \text{ м}^3 / \text{с}$  в створе начала аэрации  $v_M = 30,1 \text{ м/с}$ , гидравлический радиус  $R = 2,64 \text{ м}$ .

Относительная гладкость поверхности стенок КПВС /4/:

$$R/\Delta = 2,64/0,001 = 2640.$$

(12)

По графикам на рис. 4.12 /4/ определим относительный параметр:  $Z_{\text{дон}}/\Delta = 13,0$ .

Допустимая высота выступа в створе начала аэрации потока составляет:

$$Z_{\text{дон}} = 13,0 \cdot 0,001 = 0,013 \text{ м} = 1,3 \text{ см}.$$

2. Повторим расчет определения допустимой высоты выступов для створа 3-3. Проведя аналогичные расчеты с использованием графиков /4/, находим допустимую высоту выступов:  $Z_{\text{дон}} = 2 \text{ мм}$ .

Для обеспечения гарантированной профилактики кавитационной эрозии принимаем допустимое значение высоты технологических неровностей стенок Курпсайского поверхностного водосброса  $Z_{\text{дон}} = 2 \text{ мм}$ .

Достичь требуемого показателя можно при проведении текущей реабилитации применением кавитационно-стойких материалов, а также использованием тщательной затирки и железнения бетонных стенок водосброса.

В результате проведенных теоретических исследований и расчетов были сделаны основные **выводы**:

1. Принятая строительная высота транзитной части КПВС обеспечивает проектный безнапорный режим эксплуатации на рассматриваемом участке водосброса.
2. Аэрация потока на КПВС начинается сразу за входным оголовком КПВС. Однако скорости потока так велики (достигают 30,1 м/с), что существует большая вероятность возникновения кавитационной эрозии. Это подтверждается наблюдениями эксплуатационного персонала станции и нашло отражение в акте осмотра КПВС.
3. Для исключения кавитационной эрозии на поверхностях КПВС необходимо обеспечить высоту технологических неровностей поверхностей водосброса, не превышающую 2 мм.

## Список литературы

1. Отчет о НИР по теме ХС-06-04 «Оценка состояния и разработка программы исследований водосбросных сооружений Токтогульской и Курпсайской ГЭС» (итоговый). Книга 3. – Бишкек: КРСУ, 2004. – 47 с.
2. Штеренлихт Д.В. Гидравлика: Учебник для вузов. – М.: КолосС, 2004. – 656 с.
3. Рекомендации по гидравлическому расчету водопропускных трактов безнапорных водосбросов на аэрацию и волнообразование. –Л .: ВНИИГ. -52 с.
4. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений: Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 624с.