

ПРИЧИНА РАЗМЫВА В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ВОДОСЛИВНОЙ ПЛОТИНЫ ЖИГУЛЕВСКОЙ ГЭС

В 1998 и 2003 годах фирма «Аверс» выполнила гидроакустические съёмки дна в нижнем бьефе (НБ) водосливной плотины Жигулевской ГЭС. На снимках обнаружены большие размывы русла за креплением, несмотря на то, что сбрасываемые расходы были значительно меньше расчетных. Чтобы объяснить причины размывов были проанализированы материалы фактического графика маневрирования затворами за годы. В результате анализа открытий затворов, выявлена предполагаемая причина размывов – резкая неравномерность открытий отверстий по ширине водосливного фронта. Для обоснования предполагаемой причины размывов выполнены расчеты растекания потока в нижнем бьефе с привлечением теории струйных течений. В работе использована физически наглядная методика расчета, позволяющая в первом приближении получить кинематическую структуру потока, возникающую при неравномерном открытии пролетов водосливных плотин.

Движение на участке нижнего бьефа при неравномерном распределении расхода по ширине водосливного фронта обладает характерными особенностями турбулентных затопленных струй. В нем наблюдается развитие зон интенсивного турбулентного перемешивания (пограничный слой) (рис. 1), характерных для свободной струи с расходящейся внешней границей, на которой составляющая скорости течения вдоль оси X равна нулю или скорости спутного потока U_n . Наблюдается и внутренняя граница зоны интенсивного турбулентного перемешивания, сопрягающая с ядром струи ($U = U_n = \text{const}$) на начальном участке ($b_0 = 0$) турбулентной струи.

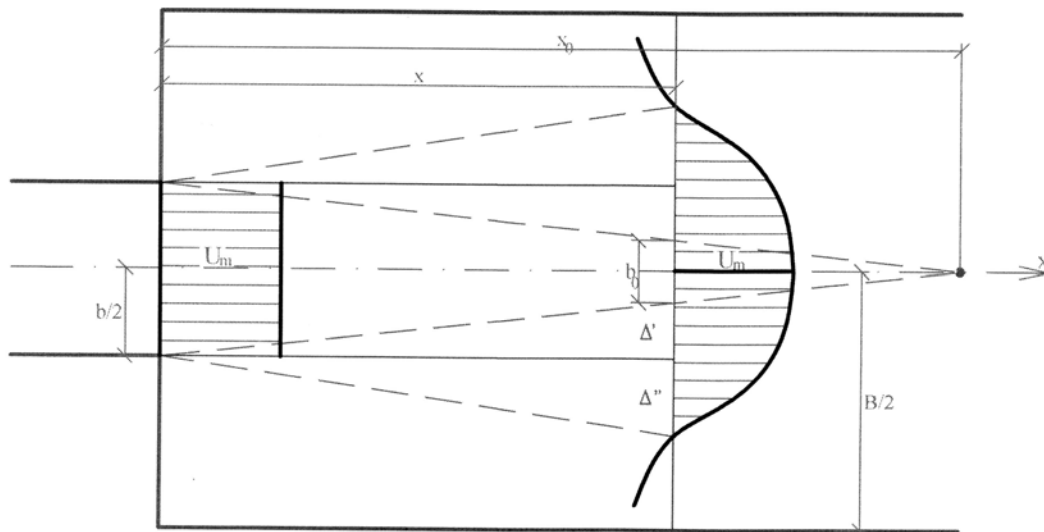


Рис. 1. Развитие зоны интенсивного турбулентного перемешивания

Главными особенностями выбранной расчетной модели являются универсальный характер профиля продольной составляющей средней скорости и универсальная эжектирующая способность турбулентных струй – гипотеза О.В.Яковлевского, заключающаяся в том, что по мере удаления от начального сечения (в нашем случае от сжатой глубины) масса струи растет за счет сил турбулентного трения, которые втягивают в струю из боковых областей дополнительный объем воды.

Универсальный профиль распределения скорости в зоне интенсивного турбулентного перемешивания подчиняется формуле Г.Шлихтинга, Г.А.Абрамовича:

$$\frac{U - U_m}{U_m - U_n} = (1 - \eta^{1.5})^2, \quad \eta = \frac{y}{0,5a}, \quad (1)$$

где a – ширина зоны интенсивного турбулентного перемешивания. Формулу (1) можно представить в виде:

$$U = (U_m - U_n) \cdot (1 - \eta^{1.5})^2 + U_n.$$

Доказано, что с достаточной степенью точности можно считать, что для начального участка струи увеличение расхода происходит линейно:

$$Q_x = Q_1(1 + C\bar{x}), \quad (2)$$

где: Q_x – расход в сечении струи удаленной на относительное расстояние x от начального сечения; Q_1 – расход в начальном сечении; $\bar{x} = x/0,5b$ – относительное удаление сечения струи; C – коэффициент удельного присоединения расхода.

Коэффициент C известен как для свободных затопленных струй с большой шириной нижнего бьефа, так и для струй, двигающихся в стесненных условиях. Для того чтобы определить скорость U_m , используется уравнение неразрывности в виде:

$$Q_x = (2 \int_0^{a/2} U dy) \cdot h = 0,45 \cdot U_m \cdot a \cdot h, \quad (3)$$

где h – глубина потока в рассматриваемом сечении.

Высказанные предположения и принятые угловые коэффициенты относятся к свободным струям, у которых развитие зоны интенсивного турбулентного перемешивания не ограничено боковыми стенками, действительными или условными, от сечения, где внешняя граница зоны интенсивного перемешивания достигает боковой стенки ($x = x_c$), течение следует рассматривать как переходное от струйного к обычному плавно изменяющемуся. У потока в этом случае на некоторой длине скорости выравниваются, и расчетный фрагмент НБ состоит из двух участков. На первом имеет место струйное течение, для которого можно использовать приведенные выше зависимости. На втором (переходном) участке силы турбулентного трения резко уменьшаются. Поток с чертами струйного течения переходит в обычное плавно изменяющееся движение в открытом русле. Связь максимальной скорости на длине переходного участка с максимальной скоростью по оси струйного течения из исследований М.А. Михалева:

$$U_{mg} = U \left[\frac{\frac{U_m}{U} - 1}{2,72 \left(\frac{U_m}{U} - 1 \right) \left(\frac{x - x_c}{B} \right) + 1} + 1 \right]; \quad (4)$$

где U – средняя скорость на переходном участке; U_m – максимальная скорость в конце струйного течения; U_{mg} – максимальная скорость на переходном участке в сечении удаленном, на расстояние x от сжатого сечения.

Зная расход в сжатом сечении ($Q_1 = q_1 b$) и угловые коэффициенты, можно определить границу струи и размеры зоны интенсивного турбулентного перемешивания, найти длину начального участка x_0 . Применяя гипотезу О.В. Яковлевского, найти расход в сечении на участке крепления, удаленном от сжатого сечения на расстоянии x . По расходу, зная глубину в конце участка со струйным течением, можно вычислить максимальную скорость по оси струи U_m и среднюю скорость U в сечении на границе с переходным участком. После чего по зависимости (4) определяется максимальная скорость U_{mg} в расчетном сечении, удаленном на расстояние x от начального сечения и интересующий максимальный удельный расход.

Для анализа размывов после паводка 1999 года была принята модель с тремя открытыми рядом отверстиями, как было на ГЭС. Вычислены максимальные скорости за креплением,

которые равнялись $U_{\max} = 1,5$ м/с. При заданной крупности песка, расчетная величина размыва $h_p = 45$ м; фактический размыв $h_p = 47$ м. Для сравнения пропускался тот же расход через три отверстия, открытые через одно. Вычисленная глубина размывов при $U_{\max} = 1,1$ м/с равна $h_p = 20$ м на расстоянии 273 м от плотины. Фактические и расчетные размывы хорошо согласуются.

Вывод: бороться с размывом следует, открывая отверстия плотины равномерно распределяя расход. В рассматриваемых случаях следовало бы открывать три отверстия по водосливному фронту чередуя через одно, а не располагая все открытые отверстия рядом.