

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

Э. Г. ГАЗИЕВ

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КРЕПЛЕНИЯ РУСЛА  
 В НИЖНИХ БЬЕФАХ ВОДОСБРОСНЫХ СООРУЖЕНИЙ

О неравномерности скоростей за гидравлическим прыжком

Как известно, при вычислении энергии всего потока по средней скорости  $\frac{v^3}{2g}$  необходимо учитывать корректив неравномерного распределения скоростей по сечению

$$\alpha = \frac{\int u^3 du}{v^3} \quad (1)$$

предложенный Корнолисом.

Аналогичный корректив для выражения количества движения дан Буссинеском

$$\alpha_0 = \frac{\int u^2 du}{v^2} \quad (2)$$

Оба корректива связаны между собой зависимостью

$$\alpha = 3\alpha_0 - 2. \quad (3)$$

В конце прыжка поток обладает значительным запасом избыточной кинетической энергии по сравнению с бытовым потоком. Эта избыточная кинетическая энергия определится по выражению:

$$\Delta \mathcal{E}_2 = (z_2 - z_0) \cdot \frac{v_2^2}{2g} \quad (4)$$

где корректив  $\alpha_2$  соответствует бытовому распределению скоростей и потоку.

Величина избыточной энергии  $\Delta \mathcal{E}_2 \rightarrow \min$  при  $\alpha'_2 \rightarrow \alpha_2$ : следовательно, стремится к нулю и потенциальная возможность опасных размывов в нижнем бьефе. Таким образом, зная распределение коррективов  $\alpha$  и  $\alpha_0$  вдоль потока, можно определить размывающую способность потока в любом сечении за гидравлическим прыжком.

По экспериментальным исследованиям и определению величины корректива количества движения  $\alpha_0$  для гидравлического прыжка в литературе известны работы [1, 2].

В работе [2] изучалось изменение коэффициента  $\alpha_0$  вдоль по длине рисбермы, но, к сожалению, не дано аналитической зависимости для определения величины  $\alpha_0$  в любом сечении.

Исходя из условия, что трение по дну мало, давление в сечениях основного потока прыжка подчиняется гидростатическому закону и аэрация потока по всей длине прыжка постоянна, в [1] приводится следующее выражение:

$$\alpha_2^2 = \alpha_1^2 \cdot \frac{\xi_2}{\xi_1} - (1-k)\xi_2 \cdot \frac{(\xi_2^2 - \xi_1^2)}{2} - k\xi_2 (\xi_2 - \xi_1) \frac{y\xi_2 + \xi_1}{y+1}, \quad (5)$$

где

$$\xi_1 = \frac{h_1}{h_{кр}}; \quad \xi_2 = \frac{h_2}{h_{кр}}; \quad y \approx 0,43; \quad k = 1,57 \xi_1 + 0,044.$$

Зависимость (5) хорошо согласуется с опытными данными, но громоздка и крайне неудобна в практических расчетах.

Выражение (5) нами было упрощено за счет введения, вместо принятых параметров  $\xi_1$  и  $\xi_2$ , величин

$$\eta = \frac{h_2}{h_1}$$

и

$$Fr = \left( \frac{h_{кр}}{h_1} \right)^3 = \frac{1}{2} \eta (\eta + 1)^*.$$

В результате было получено:

$$\alpha_2^2 = \alpha_1 \cdot \eta - (\eta - 1) \left[ (1-k) + \frac{2ky}{y+1} \cdot \xi \cdot \eta + \frac{1}{\eta+1} \right],$$

$$\alpha_2 = \alpha_1 \cdot \eta - A (\eta - 1), \quad (6)$$

где

$$A = 0,956 - \frac{1,57}{Fr} + \left( \frac{0,945}{Fr} + 0,0264 \right) \cdot \frac{\eta + 2,32}{\eta + 1}. \quad (7)$$

Подсчеты показывают, что при изменении  $\eta$  в пределах  $4 \leq \eta \leq 12$  величина коэффициента  $A$  изменяется в пределах от 0,814 до 0,860.

В среднем можно принять  $A = 0,835$ . Получаемая погрешность при этом не превышает 3%, но зато существенно упрощается формула, которая теперь запишется следующим образом:

$$\alpha_2 = \alpha_1 \cdot \eta - 0,835 (\eta - 1) \quad (8)$$

и соответственно:

$$\alpha_0 = \alpha_0 \cdot \eta - 0,945 (\eta - 1). \quad (9)$$

Автором была проведена серия опытов по изучению корректива количества движения  $\alpha_0$  за совершенным гидравлическим прыжком. Было проведено 14 опытов при различных числах  $Fr$ , в интервале  $8,9 \leq Fr \leq 37,4$ .

\* Из уравнения сопряженных глубин  $\eta = \frac{1}{2} (V 1 + 8Fr - 1)$ .

Величина коррективы  $\alpha_0$  в любом сечении определялась следующим образом.

Рассматривая взятое нами сечение в потоке  $x-x$  и сечение в удалении, соответствующее бытовому потоку (рис. 1), можно составить уравнение количества движения для отсека жидкости в следующем виде:

$$\gamma \frac{h}{2} + \gamma \frac{\alpha_0 \cdot q^2}{gh} = \gamma \frac{h_2}{2} + \gamma \frac{\alpha_{02} \cdot q^2}{gh_2}.$$

Силами трения по дну пренебрегаем в силу их малости. Величину  $\alpha_{02}$  можно принять  $\alpha_{02} \approx 1.03$ , что соответствует нормальному турбулентному потоку, тогда выражение для  $\alpha_0$  запишется:

$$\alpha_0 = \frac{h}{h_2} \left[ \frac{(h_2^2 - h^2) h_2}{2h_{кр}^3} + 1.03 \right], \quad (10)$$

где

$$h_{кр} = \frac{q^2}{g}$$

Таким образом, зная в каждом сечении глубину  $h$ , мы находим коррективу  $\alpha_0$  в этом сечении.

В результате проведенной экспериментальной работы нами было получено выражение для определения коррективы количества движения  $\alpha_0$  в любом сечении по длине рисбермы за совершенным гидравлическим прыжком:

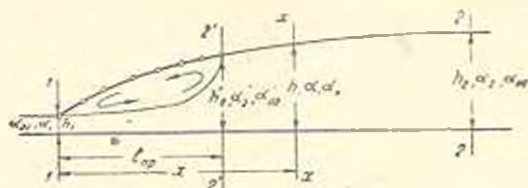


Рис. 1.

$$\alpha_0 = \alpha_{01} \cdot \eta - \left[ \alpha_{02} - \frac{0.085}{\left( \frac{x}{l_{пр}} \right)^4} \right] \cdot (\eta - 1). \quad (11)$$

Для конечного сечения совершенного прыжка  $\left( \frac{x}{l_{пр}} = 1.0 \right)$  получим:

$$\alpha_0 = \alpha_{01} \cdot \eta - (\alpha_{02} - 0.085) \cdot (\eta - 1),$$

или, полагая  $\alpha_{02} = 1.03$ ,

$$\alpha_0 = \alpha_{01} \cdot \eta - 0.945 (\eta - 1).$$

т. е. то же выражение что и (9).

Согласно зависимости (3), запишем:

$$\alpha = \alpha_1 \cdot \eta - \left[ \alpha_2 - \frac{0.255}{\left( \frac{x}{l_{пр}} \right)^4} \right] \cdot (\eta - 1). \quad (12)$$

## Размывающая способность потока за гидравлическим прыжком

При полной погашенности избыточной кинетической энергии потока, его размывающая способность определяется удельным расходом, глубиной потока и диаметром частиц размываемого материала. Д. И. Кумин рекомендует следующую зависимость для определения размывающей скорости в условиях равномерного движения потока (Л. 3).

$$\frac{v_0}{\sqrt{gd}} = 1,25 \left( \frac{H}{d} \right)^{0,2}, \quad (13)$$

где  $v_0$  — размывающая скорость потока при равномерном движении,

$g$  — ускорение силы тяжести ( $9,81 \text{ м/сек}^2$ ),

$d$  — диаметр зерен руслового материала,

$H$  — глубина потока.

Но этой формулой можно пользоваться лишь в случае полной погашенности избыточной энергии потока.

За гидравлическим прыжком при сходе с крепления поток обычно обладает избыточным запасом кинетической энергии. Совершенно очевидно, что такой поток будет обладать большей размывающей способностью, т. е. при равных глубине и диаметре зерен материала русла, размыв начнется при скоростях  $v < v_0$ .

Отношение скоростей:

$$K_p = \frac{v_0}{v}, \quad (14)$$

называют коррективом размывающей способности потока.

Д. И. Кумин в результате своих экспериментальных исследований получил график зависимости  $K_p = f\left(\frac{x}{h_2} : \tau\right)$ , который и был им рекомендован для практических расчетов.

При горизонтальном креплении величина корректива размывающей способности потока  $K_p$  в любом сечении зависит от распределения скоростей по сечению и от пульсации скорости. Таким образом, должна существовать тесная зависимость между коррективом живой силы и коррективом размывающей способности потока в данном сечении.

Зависимость для определения корректива живой силы потока в любом сечении нам известна (см. формулу 12).

Предполагая  $\alpha_1 \approx \alpha_2 \approx 1,1$ , запишем

$$\alpha = 1,1 + \frac{0,255}{\left(\frac{x}{l_{np}}\right)^4} \cdot (\tau - 1).$$

Сооставление величин коррективов  $\alpha$ , полученных по данной зависимости, с коррективами  $K_p$ , снятыми по графику Д. И. Кумина для тех же условий  $\left(\frac{x}{h_2} \text{ или } \frac{x}{l_{np}} \text{ и } \tau\right)$  подтвердили существование

тесной зависимости между ними (рис. 2). Эта зависимость хорошо описывается уравнениями:

$$\alpha = 1,1 + \frac{1}{2} (K_p - 1)^2 \quad (15)$$

или

$$K_p = 1 + 1,41 \sqrt{\alpha - 1,1}. \quad (15')$$

Уравнения (15) и (15') прекрасно отвечают и граничным условиям.

При равномерном движении потока, т. е. при  $\alpha = 1,1$ ,  $K_p = 1$  и наоборот.

Таким образом, можно записать:

$$K_p = 1 + \frac{0,715}{\left(\frac{x}{l_{np}}\right)^2} \sqrt{\eta - 1}. \quad (16)$$

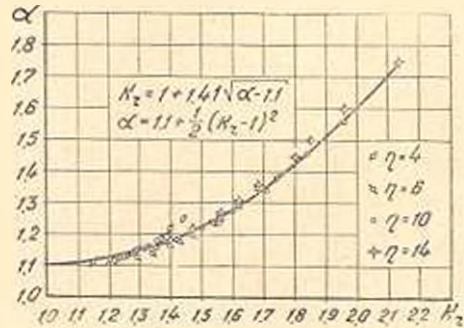


Рис. 2.

Полученная аналитическая зависимость  $K_p = \psi\left(\frac{x}{l_{np}}; \eta\right)$  позволяет определить корректив размывающей способности потока в любом сечении за гидравлическим прыжком, а следовательно, и возможную глубину размыва за горизонтальным креплением любой выбранной длины.

При изменении  $v$  в м/сек,  $d$  и  $H$  в м, можно записать:

$$K_p \cdot v = 3,92 \cdot d^{0,3} \cdot H^{0,2}.$$

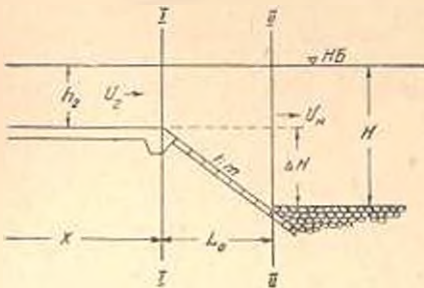


Рис. 3.

Отсюда:

$$d^{0,3} = \frac{K_p \cdot v}{3,92 \cdot H^{0,2}} = \frac{K_p \cdot q}{3,92 \cdot H^{1,2}}$$

или

$$H^{1,2} = \frac{K_p \cdot q}{3,92 \cdot d^{0,3}},$$

где  $q$  — удельный расход на крепление.

Выше мы рассмотрели лишь горизонтальное крепление и русло.

Обычно горизонтальная часть крепления заканчивается концевым креплением в виде коныша с каменной отсыпкой (рис. 3). В этом случае для расчета устойчивости каменной отсыпки необходимо знать корректив размывающей способности потока в сечении II—II ( $K_{pII}$ ).

Для его определения Д. И. Кумин предлагает следующую ориентировочную зависимость [3].

$$K_{pr} = \beta \cdot K_p, \quad (17)$$

где  $K_p$  — корректив размывающей способности потока в сечении I—I, который мы можем определить расчетом.

$$\beta = 1 + 1,5 \left( \frac{\Delta H}{H} \right)^{1,5} \cdot f \left( \frac{L_0}{\Delta H} \right) \quad (18)$$

$f \left( \frac{L_0}{\Delta H} \right)$  задается таблицей:

| $\frac{L_0}{\Delta H}$                  | 0 | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9 |
|-----------------------------------------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|---|
| $f \left( \frac{L_0}{\Delta H} \right)$ | 1 | 0,96 | 0,90 | 0,79 | 0,60 | 0,40 | 0,21 | 0,10 | 0,01 | 0 |

Таким образом, при наличии в конце крепления ковша с каменной отсыпкой расчет необходимой крупности камня следует вести по формуле:

$$d^{0,3} = \frac{\beta \cdot K_p \cdot q}{3,92 \cdot H^{1,2}}. \quad (19)$$

С помощью приведенных зависимостей Д. И. Кумина и полученной нами взаимосвязи между длиной крепления русла и коррективом размывающей способности за ним можно решать всевозможные задачи, связанные с проектированием крепления русла в нижнем бьефе.

Так, при выбранной крупности каменной отсыпки ( $d$ ) и конфигурации концевого крепления ( $\beta, H$ ) можно определить необходимую длину крепления русла (водобой + рисберма).

По заданным параметрам определяем величину корректива размывающей способности потока

$$K_p = \frac{3,92 \cdot d^{0,3} \cdot H^{1,2}}{\beta \cdot q} \quad (19')$$

и согласно зависимости (16):

$$x = 0,845 l_{пр} \frac{\sqrt{\eta - 1}}{\sqrt{K_p - 1}}. \quad (16')$$

Таким образом, длина крепления русла в нижнем бьефе является функцией гидравлических параметров потока, крупности каменной отсыпки и очертания концевого крепления.

Է. Դ. ԴԱԶԻՑԱՆ

# ՀԻԴՐՈՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ԿԱԽՈՒՅՑՆԵՐԻ ՍՏՈՐԱՋՐԻ ՀՈՒՆԵՐԻ ԱՄՐԱՅՄԱՆ ՀԻԴՐԱՎԼԻԿԱԿԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿԸ

Ա մ փ ո ֆ ո լ ո

Ստորին ջրամասում հունի ամրացման լրիվ երկարությունը, ամրացման վերջում քարային լիցքի խոշորությունը, կամ ընտրված խոշորության դեպքում քարային լիցքի վրա հոսքի խորությունը որոշելու համար անհրաժեշտ է հաշվի առնել հոսքի ողողող ընդունակությունը՝ հիդրավլիկ ցատկից հետո ցանկացած հատվածքում:

Մեր կողմից հայտնաբերված է տվյալ հատվածքում հոսքի ողողման ընդունակության սերտ կապը հոսքի անհավասարաչափության կորեկտիվներից (5'), (նկ. 2):

Հիդրավլիկ ցատկումից ներքև կամայական հատվածքում շարժման քանակի կորեկտիվը կարելի է որոշել ըստ տողաչարկված (11) առնչության, իսկ կենդանի ուժի կորեկտիվը՝ ըստ (12) առնչության:

Օգտագործելով նշված առնչությունները կարելի է անալիտիկորեն որոշել հիդրավլիկ ցատկումից ներքև որևէ հատվածքում հոսքի ողողող ընդունակության կորեկտիվը (16) և հաշվարկ կատարել քարային լիցքի խոշորության, հորիզոնական ամրացման, ընտրված երկարության և ծալրային ամրացման կոնֆիգուրացիայի գեպքում (19):

Կարելի է լուծել նաև հակադարձ խնդիրը. քարային լիցքի խոշորության ընտրումը, ծալրային ամրացման չափերը ընտրելով որոշել հորիզոնական ամրացման անհրաժեշտ երկարությունը (19'), (16'):

## ЛИТЕРАТУРА

1. Воднич-Сяноженцкий Т. Г. „Основные вопросы теории совершенного гидравлического прыжка“. Диссертация. Тбилиси, 1956.
2. Кумин Д. И. „О рассеивании энергии в нижнем бьефе и его влияния на выбор длины крепления“. Известия ВНИИГ, т. 46, 1951.
3. Кумин Д. И. „Гидравлический расчет крепления в нижнем бьефе водосбросов“. Техническая информация ВНИИГ, М.—Л., 1956.