

## ВЫВОДЫ

Предлагаемый подход на основе способа Б. Н. Жемочкина позволяет рассчитывать балку на упругом основании с распределительными свойствами при действии любого типа внешних динамических нагрузок.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Жемочкин Б. Н., Синицын А. П. Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании. – М.: Стройиздат, 1962. – 240 с.

2. Динамический расчет балки, лежащей на основании Винклера / С. В. Босаков, С. Генфуд, Н. Уелаа, М. Ш. Джамаа // Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2005. – № 1. – С. 52–58.

3. Развитие теории контактных задач в СССР / Под ред. Л. А. Галина. – М.: Наука, 1976. – 496 с.

4. Справочник проектировщика. – М.: Стройиздат, 1972. – Т. 1. – 599 с.

5. Босаков С. В. Статический расчет плит на упругом основании. – Мн.: БНТУ, 2002. – 127 с.

6. Киселев В. А. Строительная механика: Спец. курс. «Динамика и устойчивость сооружений». – М.: Стройиздат, 1980. – 616 с.

УДК 626.823.92

## СОПРЯЖЕНИЕ БЪЕФОВ ЗА НЕПОДТОПЛЕННОЙ ДВУХЪЯРУСНОЙ ВОДОСЛИВНОЙ ПЛОТИНОЙ

*Инж. КОРЕВИЦКИЙ Г. А.*

*Белорусский национальный технический университет*

Двухъярусные плотины обладают преимуществами перед плотинами одноярусной конструкции: улучшаются условия пропуска паводка, сброса льда, а также уменьшаются размеры и вес затворов, расход строительных материалов. Применение двухъярусных сооружений создает предпосылки для снижения объемов строительных работ за счет сокращения длины водосбросного фронта гидроузла, кроме того, донные отверстия могут быть использованы для промыва наносов, увеличения полезных пропусков, опорожнения водохранилища. Двухъярусные плотины эксплуатируются как у нас в стране, так и за рубежом. Благодаря своим преимуществам они, несомненно, получат широкое распространение.

В настоящее время проектируется двухъярусная плотина в составе гидроузла Гродненской ГЭС, однако методика гидравлических расчетов двухъярусных водосливных плотин

разработана недостаточно. Указаний к их расчетам в нормативной литературе нет [1]. Имеющиеся аналитические зависимости громоздки и сложны, поэтому сопряжения бьефов за двухъярусными водосбросами – актуальны. Теоретическая актуальность обусловливается необходимостью познания физической сущности процесса истечения через двухъярусный водосброс. Злободневность с практической точки зрения определяется потребностями проектных организаций в уточнении методики расчета подобных сооружений.

Исследования выявили многие особенности в работе двухъярусных водосливов [2–6, 8–10, 11, 13]. Так, фактический расход при совместной работе верхнего и нижнего ярусов водослива на 5–20 % превышает расход, рассчитанный как сумма фактических расходов независимо работающих донного и поверхностного отверстий. Причины этих особенностей иссле-

дователи видели по-разному. Условно можно выделить три основных этапа развития гидравлики двухъярусных плотин.

К первому этапу относятся исследования И. И. Вейца, А. К. Ананяна, Ван Жуй-пэна, С. М. Слисского [2–4, 10], которые учитывают воздействие поверхностной струи на донную в нижнем бьефе, благодаря чему изменяются сжатая глубина и величина давления в конце донного отверстия. Расчетный напор принимается равным фактическому давлению в выходном сечении донного отверстия, т. е. определяется действующий напор, и находится истинное значение расхода нижнего яруса. Общий расход двухъярусной водосливной плотины рассчитывается как сумма расходов верхнего и нижнего ярусов.

На втором этапе брались во внимание факторы, влияющие на работу двухъярусных сооружений в верхнем бьефе [9, 11], с учетом пространственных условий. Было установлено, что меняется не только давление в выходном сечении донного отверстия, но и кинематика верхнего яруса (изменяется распределение скоростей в верхнем бьефе). Вследствие этого повышается пропускная способность поверхностного водослива. Более глубокие исследования в этой области проводил Н. В. Синицин [9]. Он подверг тщательному анализу факторы, действующие в верхнем бьефе и на входном участке водослива и «трубы». Его методика позволяет учесть влияние толщины стенки водослива, создающей «ярусность», а также соотношение высот водосливной плотины (полки) и донного отверстия.

Третий этап представляют труды И. Ю. Ибрагимова и Б. Г. Поляковой [6, 8]. Выдвинутая ими научная гипотеза двухъярусной плотины как единого целого открывает возможности для создания новой модели явления. Поток, проходящий через двухъярусную плотину, не является лишь арифметической суммой донной и поверхностной струй. Двухъярусная плотина – это тело, обтекаемое бесконечным потоком, поэтому задача может рассматриваться как плоская.

Появляется возможность создания расчетной схемы для определения параметров сопряжения бьефов за двухъярусной плотиной, которая в большей мере отражала бы гидравлику

процесса взаимодействия двухъярусной плотины с обтекающим ее бесконечным потоком (рис. 1).

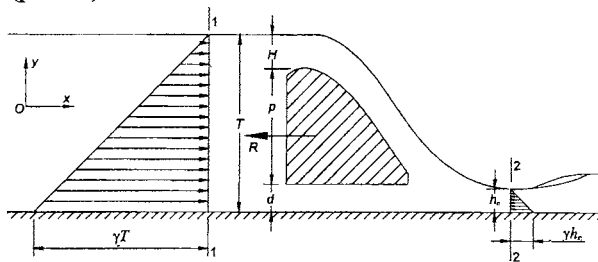


Рис. 1. Расчетная схема

Для этого воспользуемся законом сохранения импульса, который исключает из анализа внутренние силы и характеризует действие внешних сил для расчетного участка потока. Для того чтобы определить сжатую глубину, необходимо знать характеристики потока на границах выделенного отсека.

Уравнение закона сохранения импульса в проекции на горизонтальную ось составлено для сечений 1–1 – наиболее близкое к сооружению со стороны верхнего бьефа, но в нем сохраняется равномерное движение потока, и 2–2 – сжатое сечение (рис. 1) при следующих допущениях:

- 1) режим работы нижнего бьефа – отогнанный прыжок;
- 2) давление в сжатом сечении распределяется по гидростатическому закону от нуля на свободной поверхности до  $\gamma h_c$  у дна;
- 3) силы трения пренебрежимо малы.

При этих допущениях уравнение принимает вид

$$\alpha_0 Q \rho (v_{1x} - v_{2x}) = -F_x + P_{1x} - P_{2x} - R_x, \quad (1)$$

где  $Q$  – расход;  $v_{1x}$ ,  $v_{2x}$  – проекция на ось  $Ox$  осредненных скоростей в соответствующих сечениях;  $\alpha_0$  – корректив количества движения;  $\rho$  – плотность жидкости;  $F_x$ ,  $P_{1x}$ ,  $P_{2x}$ ,  $R_x$  – проекция на ось  $Ox$  трения потока по дну канала, давления в сечении 1–1, давления в сечении 2–2, суммарной силы сопротивлений конструкции соответственно.

Выше отмечалось, что сила внешнего трения по дну приравнивается к нулю  $F_x = 0$ , а распределение давления в сечениях 1–1 и 2–2 подчиняется гидростатическому закону. Таким

образом, для плоской задачи получится следующее выражение:

$$\alpha_0 \frac{\gamma}{g} q \left( \frac{q}{h_c} - \frac{q}{T} \right) = \frac{\gamma}{2} (T^2 - h_c^2) - R_x, \quad (2)$$

где  $q$  – удельный расход;  $T$  – глубина потока перед водосливом в сечении 1–1;  $h_c$  – глубина в сжатом сечении 2–2;  $\gamma$  – удельный вес единицы объема жидкости,  $\gamma = \rho g$ .

Неизвестной остается сила сопротивления  $R_x$ , которая в общем случае состоит из суммы сил

$$R_x = P_b + P_n + F_{тр} + R, \quad (3)$$

где  $P_b$ ,  $P_n$ ,  $F_{тр}$ ,  $R$  – силы сопротивления волнового, инерционного, трения, формы соответственно.

Волновое сопротивление возникает при обтекании неполностью погруженного в поток тела. Если тело погружено полностью в поток, то воздействия волн нет:  $P_b = 0$ .

Инерционное сопротивление является следствием изменения относительной скорости обтекания. При работе гидротехнических сооружений сила инерционного сопротивления появляется в процессе перехода от одного режима к другому в неустановившемся режиме. Поскольку сопряжение бьефов рассчитывается только для установившихся режимов, когда скорость обтекания постоянна, указанная составляющая сила сопротивления отсутствует.

Как показано многочисленными исследованиями, истечение через отверстие характеризуется сосредоточенными местными сопротивлениями. Поэтому, можно записать  $F_{тр} \ll R_x$  или  $F_{тр} \approx 0$ .

Суммарное, или полное, сопротивление (часто его называют лобовым) определяется по формуле, структура которой предложена Ньютоном:

$$R = c_x \rho \omega \frac{v^2}{2}, \quad (4)$$

где  $c_x$  – безразмерный эмпирический коэффициент лобового сопротивления твердого тела, обтекаемого безграничным потоком;  $\omega$  – площадь сечения обтекаемого тела по миделю

(площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную векторам скорости набегающего потока);  $v$  – скорость невозмущенного потока.

Если представить (4) для двумерной задачи, а скорость выразить через удельный расход  $v = q/T$ , то получим

$$R = c_x p \gamma \frac{q^2}{2gT^2}, \quad (5)$$

где  $p$  – характерный линейный размер.

Характерный линейный размер – толщина плотины и глубина потока в верхнем бьефе – величины одного порядка, поэтому можно предположить, что методически целесообразно в (5) вместо безразмерного коэффициента  $c_x$  подставить  $k_x$

$$k_x = c_x \frac{p}{T}. \quad (6)$$

Здесь  $k_x$  – безразмерный коэффициент сопротивления конструкции с учетом степени стеснения потока.

Тогда

$$R_x = R = k_x \frac{\gamma}{g} \frac{q^2}{2T}. \quad (7)$$

Если полученное значение  $R_x$  подставить в выражение (2) и преобразовать, то получим

$$q = \sqrt{\frac{gTh_c(T^2 - h_c^2)}{2\alpha_0(T - h_c) + k_x h_c}}. \quad (8)$$

В инженерных расчетах (8) целесообразно преобразовать. Для этого нужно ввести еще одну безразмерную величину  $a = h_c/T$ . После цепочки преобразований получим

$$q = h_c \sqrt{2g(T - h_c)} \sqrt{\frac{1 + a}{4\alpha_0(a - a^2) + 2k_x a^2}}. \quad (9)$$

Из (9) следует, что приведенный расход  $q$  пропорционален скорости истечения  $\sqrt{2g(T - h_c)}$ . Есть все основания предполагать, что безразмерный коэффициент пропорциональности  $\sqrt{\frac{1 + a}{4\alpha_0(a - a^2) + 2k_x a^2}}$  – коэффициент, учитывающий потери напора, или коэффициент скорости. Значит, можно записать:

$$\sqrt{\frac{1+a}{4\alpha_0(a-a^2)+2k_x a^2}} = \varphi; \quad (10)$$

$$h_c = \frac{q}{\varphi \sqrt{2g(T-h_c)}}. \quad (11)$$

Выражение (9) и его видоизменение (11) представляют формулу расчета сжатой глубины при донном режиме за двухъярусным водосбросом. Коэффициент сопротивления  $k_x$ , входящий в выражение (10), определяется экспериментально.

### ВЫВОДЫ

1. Для определения сжатой глубины предлагается гидравлическая схема, в которой двухъярусная плотина – горизонтальная вставка конечных размеров, обтекаемая бесконечным потоком. На пути потока она является единственным препятствием, создающим местные сосредоточенные потери напора потока.

2. Из закона сохранения импульса выведена зависимость для нахождения сжатой глубины при донном режиме за неподтопленной двухъярусной водосливной плотинной (11). Незвестный параметр – коэффициент сопротивления  $k_x$ , входящий в выражение (10), – определяется экспериментально.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **СНиП 2.06.06–85.** Плотины бетонные и железобетонные. Нормы проектирования. – М.: Стройиздат, 1986. – 37 с.  
 2. **Ананян А. К.** О пропускной способности двухъярусных водосбросов // Изв. АН Армянской ССР. Сер. физ.-мат., ест. и техн. наук. – Ереван: Изд-во АН АССР, 1950. – Т. 3.

3. **Ван Жуй-пэн.** Двухъярусные плотины и их гидравлический расчет: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1957. – 35 с.

4. **Вейц И. И.** Основные задачи соединения двух потоков // Изв. ВНИИГ им. Веденеева. – М.;Л.: Госэнергоиздат, 1947. – Т. 32. – С. 57.

5. **Ибрагимова Гюляра Халил кызы.** Исследование пропускной способности и сжатой глубины в нижнем бьефе двухъярусных водосбросов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Баку, 1976. – 21 с.

6. **Ибрагимов И. Ю.** Натурные исследования пропускной способности перегораживающего сооружения // Развитие исследований в области русловой гидротехники в Средней Азии. – Ташкент, 1984. – С. 72–76.

7. **Проведение исследований по выбору параметров гидротехнических сооружений гидроузла на р. Неман в районе г. Гродно:** Отчет по НИР. № 2000858. – Мн.: БГПА, 2000. – 153 с.

8. **Полякова Б. Г.** Метод определения пропускной способности двухъярусных водопропускных отверстий: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Ташкент, 1969. – 23 с.

9. **Синицын Н. В.** О совместной работе водослива с широким порогом и донного водосброса // Тезисы докладов XV Республ. межвузовской науч.-техн. конф. УНИВХ. – Ровно, 1965. – С. 22.

10. **Слиссский С. М.** Расчет форм сопряжения бьефов двухъярусных плотин при донном режиме: Плотины // Сборник трудов МИСИ им. Куйбышева. – М., 1964. – № 46. – С. 44.

11. **Татаров И. Я.** Пропускная способность донных труб и водосливных пролетов при совместной и одновременной их работе: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 1963. – 22 с.

12. **Типовые проектные решения 820-04–12.84.** Водосбросы открытого типа на расход воды от 50 до 700 м<sup>3</sup>/с с напором 4–12 м для прудов и малых водохранилищ. – Мн.: Белгипроводхоз, 1991. – 35 с.

13. **Факторович М. Э.** Методика приближенного гидравлического расчета сопряжения бьефов водосбросных сооружений с использованием соударения потоков для гашения энергии. – М.;Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 216 с.