

УДК 532.628:614.843

МЕТОДИКА РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНЫ ВЫТЕСНЕНИЯ ПРИ ПЕРЕЛИВЕ ВОДЫ ЧЕРЕЗ ГРЕБЕНЬ ПОДПОРНОГО СООРУЖЕНИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО УЗЛА

Стриганова М.Ю., Шаталов И.М., Махмудов Э.М.о.

Приведена методика расчетной оценки основных параметров волны вытеснения при переливе воды через гребень подпорного сооружения гидротехнического узла, основанная на методе И.И. Агроскина. Изложены основные положения оценки инженерной обстановки, последствий и оперативно-тактического плана ликвидации чрезвычайных ситуаций, связанных с переливом воды через гребень подпорного сооружения.

Ключевые слова: волна вытеснения, сжатая глубина, вторая сопряженная глубина, график движения волны.

(Поступила в редакцию 20 ноября 2017 г.)

Введение. Одной из серьезных и опасных причин возникновения чрезвычайных ситуаций на гидроэнергетических и гидротехнических узлах сооружений является перелив воды через гребень подпорного сооружения (глухих и водосливных плотин). Перелив через гребень плотин связан с рядом причин: аварийным переполнением ложа водохранилища выше форсированного подпорного уровня (ФПУ); ветровым нагоном волны; оползнями и обрушением в водохранилища массивов неустойчивых пород на значительных участках их берегов; возникновением селевых потоков и сходом снежных лавин. Следствием перелива воды через гребень (наивысшую точку) подпорного сооружения является появление волны вытеснения, размеры которой могут превышать в несколько раз пропускную способность водосбросов. Сформировавшаяся волна вытеснения, распространяясь в нижнем бьефе (НБ) гидроузла, может привести к значительным разрушениям зданий и сооружений и созданию чрезвычайной ситуации со значительными человеческими жертвами.

Разработка методики расчетной оценки основных параметров волны вытеснения при переливе воды через гребень подпорного сооружения является весьма актуальной и необходимой для оценки инженерной обстановки и последствий чрезвычайной ситуации в нижнем бьефе гидроузла.

Основная часть. При переливе потока воды через гребень подпорного сооружения формируется волна вытеснения (волна перемещения), которая по своей форме и основным параметрам сходна с волной прорыва. Детерминированная модель возникновения волны вытеснения и методы расчета основных параметров волны прорыва при разрушении подпорных сооружений были рассмотрены в работах [1, 2].

Подробный анализ ранее выполненных работ позволяет создать цельную и единую методику расчетной оценки основных параметров волн вытеснения и прорыва, распространяющихся в нижнем бьефе гидроузлов любого назначения. Суть этой методики заключается в следующем.

При переливе воды через подпорное сооружение образуется сжатая глубина h_c . Далее поток, встречая сопротивление в НБ, опрокидывается, образуя гидравлический прыжок, и распространяется со значительной по величине второй сопряженной глубиной за прыжком h_c'' , принимаемой равной максимальной высоте волны растекающегося потока воды в НБ. Расчетная схема представлена на рисунке 1.

При определении величины h_c'' первоначально оценивается величина сжатой глубины методом последовательного приближения, предложенного И.И. Агроскиным, из уравнений [3]:

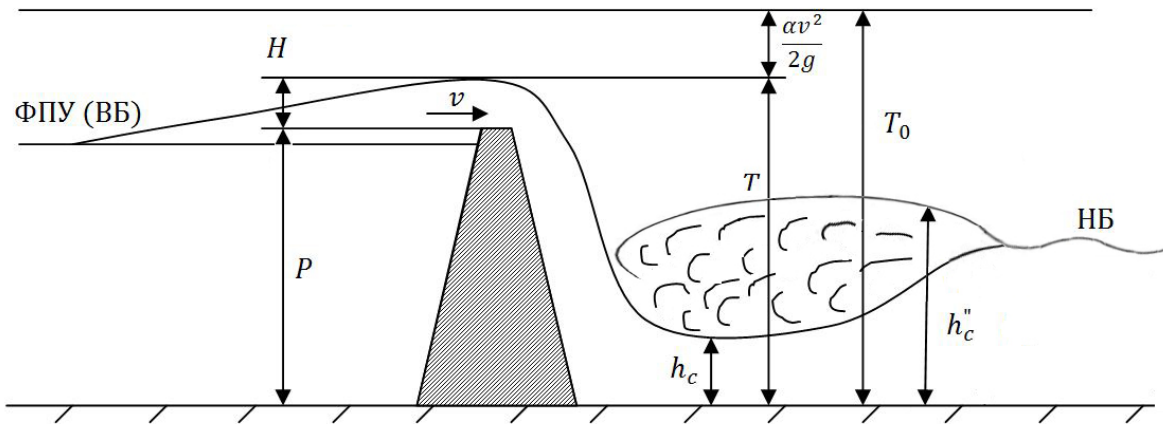
$$T_0 = h_c + \frac{\alpha Q^2}{2g\varphi^2\omega_c^2}, \quad (1)$$

или

$$Q = \varphi\omega_c\sqrt{2g(T_0 - h_c)}, \quad (2)$$

где T_0 – полная удельная энергия волны вытеснения при подходе к гидротехническому сооружению в сечении по урезу воды (принимается отметка форсированного подпорного

уровня (ФПУ), м; α – коэффициент Кориолиса, для открытых потоков принимается $\alpha = 1,1$; Q – расход потока воды в набегающей волне вытеснения через плотину, м³/с; φ – коэффициент скорости, принимается в зависимости от вида подпорного сооружения [3]; ω_c – площадь в сжатом сечении падающего потока, м².



P – высота гидротехнического сооружения; *H* – напор на гребне водослива; *h_c* – сжатая глубина; *T* – удельная энергия волны вытеснения при подходе к гидротехническому сооружению; *T₀* – полная удельная энергия волны вытеснения при подходе к гидротехническому сооружению; ФПУ – отметка форсированного подпорного уровня; НБ – нижний бьеф; *h_c''* – вторая сопряженная глубина за прыжком

Рисунок 1. – Расчетная схема переливной волны

Для широкого русла, имеющего форму поперечного сечения, близкого к прямоугольной, уравнения (1) и (2) принимают вид:

$$T_0 = h_c + \frac{\alpha q^2}{2g\varphi^2 h_c^2}, \quad (3)$$

$$q = \varphi h_c \sqrt{2g(T_0 - h_c)}, \quad (4)$$

где $q = Q/B$ – удельный расход, м²/с; B – ширина водосливного фронта (длина плотины по гребню или ширина прорана), м.

Для решения уравнений (1) и (2) воспользуемся методом И.И. Агроскина [3], который для рассматриваемого случая перелива через плотину волны вытеснения, заключается в следующем. Вначале вычисляется полная удельная энергия волны прорыва при подходе к гидротехническому сооружению по формуле, полученной путем решения уравнения Д. Бернулли [3],

$$T_0 = P + H + \frac{\alpha v^2}{2g}, \quad (5)$$

где P – высота гидротехнического сооружения; H – напор на гребне подпорного сооружения (в рассматриваемом случае – превышение волны вытеснения над гребнем плотины); v – скорость распространения потока волны вытеснения. Данную скорость v можно рассчитать, используя формулу [1]:

$$v = k \cdot \sqrt{H_B}, \quad (6)$$

где k – коэффициент с размерностью м^{1/2}/с, в расчетах можно принять $k = 3$ [1, 2]; H_B – высота волны вытеснения при подходе ее к плотине [2]. В расчетах можно принять равной напору на гребне подпорного сооружения.

Далее по методу И.И. Агроскина для определения величины h_c'' используется понятие относительной сжатой глубины $h_c/T_0 = \tau_c$. При этом уравнение (4) приобретает вид:

$$q = \varphi \tau_c T_0 \sqrt{2g(T_0 - \tau_c T_0)}. \quad (7)$$

Отделив известные по исходным данным рассчитываемого сооружения величины (q , φ , T_0) и введя понятие вспомогательной функции $\Phi(\tau_c)$, найдем ее величину при $g = 9,81$ м/с²:

$$\frac{q}{\varphi T_0^{3/2}} = 4,43\tau_c \sqrt{1-\tau_c} = \Phi(\tau_c), \quad (8)$$

где $\Phi(\tau_c)$ – вспомогательная функция, позволяющая определить с использованием специальных таблиц [3] величину τ_c'' , которая в свою очередь представляет собой относительную вторую сопряженную глубину $\tau_c'' = h_c'' / T_0$.

Используя уравнение гидравлического прыжка [5], величину τ_c'' определяем расчетным путем по формуле сопряженных глубин

$$\tau_c'' = 0,5\tau_c \left[\sqrt{1 + 16\varphi^2 \frac{1-\tau_c}{\tau_c}} - 1 \right]. \quad (9)$$

Определив величину τ_c'' , далее найдем вторую сопряженную глубину из соотношения:

$$\tau_c'' = \frac{h_c''}{T_0}, \quad h_c'' = \tau_c'' \cdot T_0. \quad (10)$$

Данные по определению h_c'' , приведенные в [3, 5], были функционально обработаны многомерным методом В.В. Веремеюка, в результате чего получена прямая зависимость для определения второй сопряженной глубины, принимаемой равной максимальной высоте волны за подпорным сооружением

$$h_c'' = \frac{0,7 \cdot \left(\frac{\sqrt{\alpha \cdot g}}{T_0^{3/2}} \right)^{0,47} \cdot T_0}{0,8 - \ln \varphi}. \quad (11)$$

Далее расчет параметров перелившейся волны вытеснения можно проводить по методике расчета волны прорыва, изложенной в [2].

Скорость перелившейся волны вытеснения по территории нижнего бьефа определяется по формуле [2]

$$v_{\max} = \frac{0,6\sqrt{H^{1,33} \cdot i}}{n \left(\frac{l \cdot i}{3,5H} \right)^{0,37}}, \quad (12)$$

где H – напор на сооружении; i – средний уклон отводящего русла; n – коэффициент шероховатости русла; l – расстояние до расчетного створа.

Высота распространяющейся по нижнему бьефу перелившейся волны вытеснения в зависимости от расстояния от плотины может быть определена по формуле

$$h_{\max} = \frac{2H^2}{l \cdot i + 3,3H}. \quad (13)$$

Разработка оперативно-тактического плана ликвидации чрезвычайной ситуации, связанной с переливом волны вытеснения через гребень подпорного сооружения, в первую очередь основана на построении графика движения перелившейся волны вытеснения. Ситуационное построение графика движения перелившейся волны вытеснения осуществляется в следующей последовательности [2]:

1. Водоток (река) разбивается на участки расчетными створами.
2. Определяются параметры перелившейся волны и вытеснения в нулевом створе:
 - 2.1. Высота волны прорыва в нулевом створе.
 - 2.2. Время прохождения волны через створ разрушенного гидроузла.
3. Рассчитываются параметры движения, характеризующие волну прорыва на первом участке и в 1-м створе:
 - 3.1. Максимальная высота волны в 1-м створе.

- 3.2. Максимальная скорость тела волны для определения степени разрушения зданий и сооружений в зависимости от динамического напора волны прорыва.
- 3.3. Средняя скорость волны на 1-м участке (скорость гребня волны).
- 3.4. Скорость распространения волны на 1-м участке с учетом скорости течения реки.
- 3.5. Время добегания волны до 1-го створа.
- 3.6. Скорость фронта волны в первом створе.
- 3.7. Скорость хвоста волны.
- 3.8. Время прохождения волны через 1-й створ.
- 3.9. Время добегания фронта волны.
- 3.10. Время добегания гребня волны.
- 3.11. Время добегания хвоста волны до 1-го створа. Это время определяет начало восстановительных работ по ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

Аналогично рассчитываются параметры волны вытеснения во всех створах.

По данным, полученным на основе расчета, строится график прохождения волны вытеснения, который используется для оценки возможных последствий затопления и подготовки исходных данных для планирования мероприятий по защите населения и объектов.

Выводы. Движение потока, переливающегося через гребень подпорного сооружения, рассмотрено как форма резко изменяющегося неравномерного движения жидкости, называемая гидравлическим прыжком. Определена методика последовательного расчета параметров и построения графика прохождения сформировавшейся волны вытеснения (волны перемещения), что даст возможность составления оперативно-тактического плана ликвидации чрезвычайной ситуации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карпенчук, И.В. Детерминированная модель возникновения волны вытеснения и методы оценки ее поражающего воздействия на гидротехнические сооружения / И.В. Карпенчук, М.Ю. Стриганова, Э.М.о. Махмудов // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация, 2012. – № 2 (32). – С. 99–103.
2. Карпенчук, И.В. Определение параметров волны прорыва с учетом зарегулированности водотока, пойменных участков и программа построения в ГИС МЧС Республики Беларусь зон затопления при чрезвычайных ситуациях на гидротехнических сооружениях напорного фронта / И.В. Карпенчук, М.Ю. Стриганова // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация, 2010. – № 2 (28). – С. 73–82.
3. Агроскин, И.И. Гидравлика / И.И. Агроскин, Г.Т. Дмитриев, Ф.И. Пикалов. – М.: Энергия, 1964. – 351 с.
4. Агроскин, И.И. Гидравлика каналов / И.И. Агроскин. – М.: Госэнергоиздат, 1940. – 328 с.
5. Агроскин, И.И. Таблицы для гидравлических расчетов / И.И. Агроскин. – М.: Госэнергоиздат, 1946. – 197 с.

METHODOLOGY OF ESTIMATION OF THE MAIN PARAMETERS OF DISPLACEMENT WAVE FLOWING OVER THE CREST OF THE SUPPORTING CONSTRUCTION OF THE HYDROTECHNICAL UNIT

Marina Striganova, PhD in Technical Sciences, Associate Professor

The state educational establishment «University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus», Minsk, Belarus

Ihar Shatalau

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Eltin Makhmudov

The state educational establishment «Academy of the Ministry for Emergency Situations of the Azerbaijan Republic», Baku, Azerbaijan

Purpose. The estimation of the main parameters of breakthrough wave flowing over the crest of supporting construction of hydro technical unit.

Methods. The main provisions of the evaluation are based on the method of I.I. Agroskin. The movement of the stream flowing over the crest of the supporting structure is considered as a form of sharply changing uneven fluid motion, called hydraulic jumping.

Findings. The compressed and first conjugate depths are determined, and a direct relationship is obtained to determine the second conjugate depth, assumed equal to the maximum wave height behind the supporting structure.

Application field of research. The method of sequential calculation of parameters and plotting the flow of the generated dislocation wave (displacement wave) will make it possible to assess the possible consequences of flooding and the preparation of initial data for planning measures to protect the population and objects.

Conclusions. The obtained research results can be used in the design of hydraulic structures, taking into account the possibility of the generation of displacement waves.

Keywords: displacement wave, compressed depth, second conjugate depth, wave motion plot.

(The date of submitting: November 20, 2017)

REFERENCES

1. Karpenchuk I.V., Striganova M.Yu., Makhmudov E.M. Determinirovannaya model' vzniknoveniya volny vytesneniya i metody ocenki ee porazhayushchego vozdejstviya na gidrotekhnicheskie sooruzheniya [Deterministic model of the emergence of the displacement wave and methods for assessing its damaging effect on hydraulic structures]. *Chrezvychaynye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya*. Gomel: NII PB and ES, 2012. No. 2 (32). Pp. 99–103. (rus)
2. Karpenchuk I.V., Striganova M.Yu. Opredelenie parametrov volny proryva s uchetom zaregulirovannosti vodotoka, pojmennyh uchastkov i programma postroeniya v GIS MCHS Respubliki Belarus' zon zatopeniya pri chrezvychajnyh situatsiyah na gidrotekhnicheskikh sooruzheniyah napornogo fronta [Determination of the breakthrough wave parameters taking into account the regulation of the watercourse, flood plots and the program for constructing flood zones in the GIS of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus in emergency situations at hydraulic structures of the pressure front] *Chrezvychaynye situatsii: preduprezhdenie i likvidatsiya*, 2010. No. 2 (28). Pp. 73–82. (rus)
3. Agroskin I.I., Dmitriev G.T., Pikalov F.I. *Gidravlika* [Hydrolics]. Moscow: Energiya, 1964. 351 p. (rus)
4. Agroskin I.I. *Gidravlika kanalov* [Hydraulics of channels] Moscow: Gosenergoizdat, 1940. 328 p. (rus)
5. Agroskin I.I. *Tablicy dlya gidravlicheskih raschetov* [Tables for hydraulic calculations]. Moscow: Gosehnergoizdat, 1946. 197 p. (rus)