

Исабеков Т.А., Атаманова О.В.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КАНАЛАХ СИСТЕМ КАСКАДНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ МЕЖГОСУДАРСТВЕННОГО ЗНАЧЕНИЯ

Isabekov T.A., Atamanova O.V.

HYDRAULIC PROCESSES IN THE INTERSTATE CANALS CASCADE OF REGULATION

УДК 626.824: 626.822

В работе рассматриваются особенности гидравлических процессов в открытых каналах, разделенных на бьефы перегородивающими сооружениями. Предлагается математический аппарат, позволяющий рассчитать глубины в открытом канале при неустановившемся движении потока в нем.

The paper discusses the features of hydraulic processes in open channels, divided into pools of baffle structures. The mathematical apparatus, which can calculate the depth of open channel flow with the transient motion in it.

Различные режимы течения воды в открытых каналах приводят к изменению характеристик потока, что необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации линейных и локальных гидротехнических сооружений. Особенно это важно для водораспределительных систем межгосударственного пользования, где непредусмотренные потери воды могут привести к международному конфликту. Поэтому необходимо рассмотреть особенности гидравлических процессов в бьефах каналов водораспределительных систем межгосударственного пользования, изучить и проанализировать изменения таких гидравлических характеристик, как глубины, скорости и расходы в этих каналах.

Для получения выражений, характеризующих изменения параметров потока в канале долиненной зоны примем уравнения Э.Э. Маковского, полученные им в общем виде в операторной форме [1].

Изменение глубины в канале водораспределительной системы, разделенном на бьефы перегородивающими сооружениями с авторегуляторами уровня нижнего бьефа с защитой от переполнения канала [1], будет зависеть, прежде всего, от длины бьефа каскада канала. Для длинного бьефа каскада, характеризующегося таким расстоянием S_1 между перегородивающими сооружениями, что отраженные волны не приходят в створ возмущения, изменение глубины в канале можно записать уравнением в изображениях:

$$Z = -\frac{\gamma_1}{x_2} W_1(p) \exp(-\tau_1 p) \cdot N_1 \dot{A}_1 - \frac{\gamma_2}{x_1} W_4(p) \exp(-\tau_2 p) \cdot N_2 \dot{A}_2, \quad (1)$$

где W_1, W_4 – передаточные функции;

A_n, A_k – изображения приращений открытий

α_n, α_k авторегуляторов УНБ;

$$\alpha_k = \frac{\Delta a_1}{a_1}, \alpha_n = \frac{\Delta a_2}{a_2}, \Delta a_1 \text{ и } \Delta a_2 - \text{ абсолютные}$$

приращения открытий, отсчитываемых от значения при начальном режиме; a_1 и a_2 – открытия авторегуляторов УНБ перегородивающих сооружений в створах I и II соответственно (рис. 1);

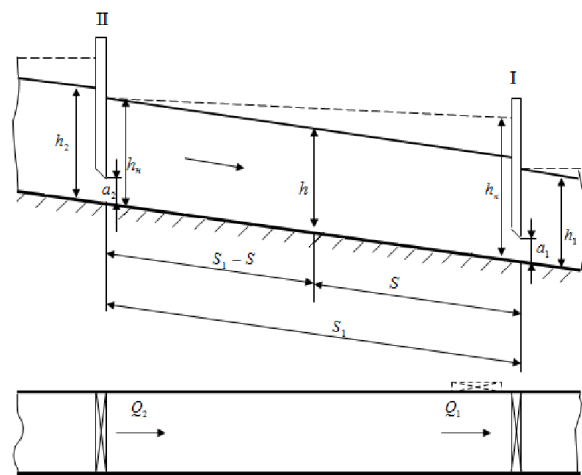


Рис. 1. Расчетная схема звена каскада канала, разделенного на длинные бьефы

$$N_n = \frac{\partial Q_2}{\partial a_2} \frac{a_2}{Q_2}; N_k = \frac{\partial Q_1}{\partial a_1} \frac{a_1}{Q_1}, Q_1 - \text{ расход воды в}$$

створе нижнего перегородивающего сооружения, Q_2 – расход воды в нижнем бьефе верхнего перегородивающего сооружения;

$$\gamma_1 = \exp(-\tau_1 \sqrt{ab}), \tau_1 = \frac{S_1 - S}{\frac{g\omega}{g\omega - v^2} \sqrt{\frac{g\omega}{B}}}, \sqrt{ab} = \frac{Ix}{2h} \sqrt{\frac{g\omega}{B}}$$

S – расстояние вдоль канала от рассматриваемого створа до нижнего перегородивающего сооружения, S_1 – расстояние между нижним и верхним перегородивающими сооружениями, ω – живое сечение потока воды в канале, B – ширина потока по верху, v – средняя скорость воды в канале, g – ускорение силы тяжести, x – гидравлический показатель русла, I – уклон канала;

$$\gamma_2 = \exp(-\tau_2 \sqrt{ab}), \tau_2 = \frac{S}{\frac{g\omega}{g\omega - v^2} \sqrt{\frac{g\omega}{B}}}; x_1 = \left(\frac{h}{Q_1} \frac{\partial Q_1}{\partial h_1} - \frac{Bh}{\omega} \right) \frac{v}{g}$$

$$x_2 = \left(\frac{h}{Q_2} \frac{\partial Q_2}{\partial h_1} - \frac{Bh}{\omega} \right) \frac{v}{g};$$

h – глубина наполнения воды в канале, h_n и h_k – наполнения в начальном (верхнем) и конечном (нижнем) створах звена каскада;

$$\tau_1^1 = \frac{S_1 - S}{\sqrt{\frac{g\omega}{B} + v}}; \tau_2^1 = \frac{S}{\sqrt{\frac{g\omega}{B} - v}};$$

$$\tau_{10}^1 = \frac{S_1}{\sqrt{\frac{g\omega}{B} + v}}; \tau_{20}^1 = \frac{S_1}{\sqrt{\frac{g\omega}{B} - v}}.$$

Авторегуляторы УНБ с защитой от переполнения канала обеспечивают постоянство глубины в нижних бьефах обоих сооружений, поэтому примем допущение $\frac{\partial Q}{\partial h_n} = \frac{\partial Q}{\partial h_k} = 0$. Кроме того, будем считать, что открытие затворов изменяется мгновенно, а возмущающее воздействие α представляет собой сигнал в виде единичного скачка.

Решая методом операционного исчисления уравнение (1), получим выражение для определения изменений глубины при наличии возмущений в начальном и конечном створах звена при $\tau_1^1 < t \leq \tau_{10}^1 + \tau_2^1$ и $\tau_2^1 < t \leq \tau_1^1 + \tau_{20}^1$, т.е. отсутствии отраженных волн в длинном бьефе канала долиненной зоны:

$$\Delta h = \frac{\gamma_1 \omega}{B} \cdot \frac{\Delta Q_n}{Q_n} \left\{ \frac{2Bh}{\gamma_1 x \omega} + \left(\frac{v \exp\left(-\tau_1 \frac{a+b}{2}\right)}{v + \sqrt{\frac{g\omega}{B}}} - \frac{2Bh}{\gamma_1 x \omega} \right) \times \right.$$

$$\times \exp\left[-(t - \tau_1^1) \left. \frac{\frac{\gamma_1 x v \omega}{2Bh \left(v + \sqrt{\frac{g\omega}{B}}\right)} \exp\left(\tau_1 \frac{a+b}{2}\right) - 1}{\frac{v}{2Ig} + \tau_1 \left(1 - \frac{a+b}{2\sqrt{ab}}\right) - \left(v + \frac{h(a+b)}{Ix}\right) \frac{Bh}{Ixg\omega}} \right] - \right.$$

$$\left. - \frac{\gamma_2 \omega}{B} \cdot \frac{\Delta Q_k}{Q_k} \left\{ \frac{2 \cdot \gamma_2 \cdot Ig(t - \tau_2^1)}{v - \frac{h \cdot (a+b)}{Ix}} + \frac{\exp\left(-\frac{a+b}{2} \tau_2\right)}{1 - \frac{1}{v} \sqrt{\frac{g\omega}{B}}} \right\} \right\} \quad (2)$$

Выражение (2) позволит рассмотреть изменения глубин в различных створах длинного бьефа звена каскада канала долиненной зоны, при отсутствии в канале отраженных волн. Результаты расчетов приращений глубин, полученные на основе проведенных теоретических исследований приведем ниже.

Помимо (2) были также получены в изображениях уравнения для определения величины отклонения наполнения в произвольном створе длинного бьефа канала, ограниченного перегоражи-

вающими сооружениями с авторегуляторами УНБ и защитой от переполнения канала [2], при наличии в канале отраженных волн:

$$Z = \frac{\gamma_1}{x_2} W_1(p) \{W_3(p) \exp[-(\tau_{10}^1 + \tau_2^1)p] - \exp(-\tau_1^1 p)\} \cdot N_n A_n -$$

$$- \frac{\gamma_2}{x_1} W_4(p) \{W_2(p) \exp[-(\tau_1^1 + \tau_{20}^1)p] - \exp(-\tau_2^1 p)\} \cdot N_k A_k, \quad (3)$$

где W_2, W_3 – передаточные функции, характеризующие наличие отраженных волн;

$$\tau_{10}^1 = \frac{S_1}{\sqrt{\frac{g\omega}{B} + v}}; \tau_{20}^1 = \frac{S_1}{\sqrt{\frac{g\omega}{B} - v}}$$

время добегания отраженных волн.

Преобразование выражения (3) позволяет получить расчетные зависимости для определения величин приращений наполнений в створах звена каскада канала, разграниченного перегораживающими сооружениями с авторегуляторами УНБ и защитой от переполнения канала, при возникновении возмущающего воздействия в начальном створе звена через время $t > \tau_{10}^1 + \tau_2^1$: (наличие влияния на створ обратной волны):

$$\Delta h' = -\frac{\gamma_1 \omega}{B} \cdot \frac{\Delta Q_i}{Q_i} \left\{ \frac{\exp\left(-\tau_1 \frac{a+b}{2}\right)}{1 + \frac{1}{v} \sqrt{\frac{g\omega}{B}}} - \frac{2Bh}{\gamma_1 x \omega} \left(\frac{v + \sqrt{\frac{g\omega}{B}}}{v - \sqrt{\frac{g\omega}{B}}} \exp(-\tau_2(a+b)) - \right. \right.$$

$$\left. \left. - \frac{\frac{xg\omega\gamma_2^2}{Bh\nu} \left(\frac{v}{g} + \tau_1 I \left(2 - \frac{a+b}{\sqrt{ab}} \right) \right) - 2\gamma_2^2 \left(1 + \frac{a+b}{2v\sqrt{ab}} \sqrt{\frac{g\omega}{B}} \right)}{\left(\frac{\gamma_1 x \omega}{Bh \left(1 + \frac{1}{v} \sqrt{\frac{g\omega}{B}} \right)} \exp\left(-\tau_1 \frac{a+b}{2}\right) - 2 \left(1 - \frac{a+b}{2v\sqrt{ab}} \sqrt{\frac{g\omega}{B}} \right) \right)} \exp\left[-(t - \tau_{10}^1 + \tau_2^1) \times \right. \right.$$

$$\left. \left. \times \frac{\frac{\gamma_1 \exp\left(-\tau_1 \frac{a+b}{2}\right) x \omega}{2Bh \cdot \left(1 + \frac{1}{v} \sqrt{\frac{g\omega}{B}} \right)} - 1}{\frac{v}{2Ig} + \tau_1 \left(1 - \frac{a+b}{2\sqrt{ab}} \right) - \left(1 + \frac{a+b}{2v\sqrt{ab}} \sqrt{\frac{g\omega}{B}} \right) \frac{Bh\nu}{Ixg\omega}} \right] \right\}$$

$$\times \frac{v}{g} \left(\frac{\exp\left(-\tau_1 \frac{a+b}{2}\right)}{1 + \frac{1}{v} \sqrt{\frac{g\omega}{B}}} - 2 \frac{Bh}{\gamma_1 x \omega} \right) \times$$

$$\begin{aligned} & \times \exp \left[\left(\frac{\gamma_1 x \omega \nu \exp \left(-\tau_1 \frac{a+b}{2} \right)}{Bh \left(\nu + \sqrt{\frac{g\omega}{B}} \right)} - 2 \frac{(t - \tau_1) \cdot I}{g \left(1 - \frac{a+b}{2\sqrt{ab}} \right) I - 2 \left(1 + \frac{a+b}{2\sqrt{ab}} \sqrt{\frac{g\omega}{B}} \right) \frac{Bh\nu}{xg\omega}} \right) + \Delta h'' = \frac{\gamma_2 \omega}{B} \cdot \frac{\Delta Q_k}{Q_k} \left\{ \frac{\nu \exp \left[-(2\tau_1 + \tau_2) \frac{a+b}{2} \right]}{\nu + \sqrt{\frac{g\omega}{B}}} + \frac{2\gamma_2 Bh}{\gamma_1^2 x \omega} \right\} \times \\ & + \frac{xg\omega \gamma_2^2 \left(\frac{\nu}{g} + I\tau_1 \left(2 - \frac{a+b}{\sqrt{ab}} \right) \right) - \gamma_2^2 \left(2 + \frac{a+b}{\nu\sqrt{ab}} \sqrt{\frac{g\omega}{B}} \right) \times \frac{\nu}{g} \left(\frac{\exp \left(-\tau_1 \frac{a+b}{2} \right)}{1 + \frac{1}{\nu} \sqrt{\frac{g\omega}{B}}} - 2 \frac{Bh}{\gamma_1 x \omega} \right) + \left[\frac{\gamma_1^2 I x \omega g \cdot \frac{\nu - \sqrt{\frac{g\omega}{B}}}{\nu + \sqrt{\frac{g\omega}{B}}} \cdot \exp \left[-\tau_1 (a+b) \right]}{Bh \left(\nu - \frac{a+b}{2\sqrt{ab}} \sqrt{\frac{g\omega}{B}} \right)} \cdot (t - \tau_1 - \tau_{20}^1) - \right. \\ & \left. + 2 \frac{Bh\nu}{\gamma_1 x g \omega} \cdot \frac{\nu + \sqrt{\frac{g\omega}{B}}}{\nu - \sqrt{\frac{g\omega}{B}}} \exp \left(-\tau_2 (a+b) \right) + \frac{2\gamma_2 Bh}{\gamma_1^2 x \omega} - \frac{2\gamma_2 I g \cdot (t - \tau_2^1)}{\nu - \frac{a+b}{2\sqrt{ab}} \sqrt{\frac{g\omega}{B}}} - \frac{\nu \cdot \exp \left(-\tau_2 \frac{a+b}{2} \right)}{\nu - \sqrt{\frac{g\omega}{B}}} \right\} \cdot (5) \\ & \left. \frac{2I\gamma_2^2}{\gamma_1 \left(1 - \frac{a+b}{2\nu\sqrt{ab}} \sqrt{\frac{g\omega}{B}} \right)} (t - \tau_{10}^1 - \tau_2^1) - 2 \frac{Bh\nu}{\gamma_1 x g \omega} \right\} \cdot (4) \end{aligned}$$

Решая выражение (3) получим для случая приращений наполнений в створах звена каскада канала, разграниченного перегораживающими сооружениями с авторегуляторами УНБ и защитой от переполнения канала, при возникновении возмущающего воздействия в конечном створе звена через время $t > \tau_1^1 + \tau_{20}^1$: (влияние на створ отраженной волны):

Приведем результаты расчета приращений наполнений Δh и наполнений h в створах звена каскада, используя выражение (2) на примере конкретного трансграничного канала Каратаки, характеристики которого приведены в табл. 1. Максимальное возмущение на данном канале может достигать $\Delta Q = -0,25Q$. Эти данные получены в результате опроса службы эксплуатации.

Таблица 1

Наполнения в створах при возмущении $\Delta Q_k / Q_k = -0,25$, $\Delta Q_n / Q_n = 0$ и времени $\tau_1^1 + \tau_{20}^1 > t \geq \tau_2^1$

t, сек	H, м	0,92	0,88	0,84	0,79	0,74	0,70	0,66	0,63	0,60	0,58	0,56	0,54	0,52	0,5
	S, м	0	600	1200	1800	2400	3000	3600	4200	4800	5400	5800	6400	7000	7500
600	Δh	0,033	0,011	0,001											
	h	0,953	0,891	0,841											
1200	Δh	0,043	0,020	0,007	0,001										
	h	0,963	0,900	0,847	0,791										
2100	Δh	0,061	0,030	0,014	0,006	0,002									
	h	0,981	0,910	0,854	0,796	0,742									
3300	Δh	0,086	0,046	0,024	0,013	0,007	0,003	0,001							
	h	1,006	0,926	0,864	0,803	0,747	0,703	0,661							
4500	Δh	0,105	0,061	0,035	0,020	0,012	0,007	0,003	0,002	0,001					
	h	1,025	0,941	0,875	0,810	0,752	0,707	0,663	0,632	0,601					
5700	Δh	0,120	0,082	0,047	0,027	0,017	0,011	0,007	0,004	0,002	0,001				
	h	1,040	0,962	0,887	0,817	0,757	0,711	0,667	0,634	0,602	0,581				
7200	Δh	0,132	0,095	0,060	0,035	0,023	0,015	0,010	0,006	0,003	0,002	0,001	0,001	0,0005	0,0001
	h	1,052	0,975	0,900	0,825	0,763	0,715	0,670	0,636	0,603	0,582	0,561	0,541	0,5205	0,5001

Расчеты показывают, что через 2 часа при устойчивом возмущении в конечном створе звена каскада, наполнение в канале не достигнет

строительной высоты ($h_{стр} = 1,1 м$) и не будет перелива через борта канала. Бортов канала вода достигнет через 2 часа 12 минут. К этому времени водо-

выпуски, расположенные в створах $S < 0,2S_1$ станут работать в аварийном режиме и заберут в отводы расходы на 7-14 % больше положенных. Это нежелательно исходя из требований нормированной водоподдачи в отводящие каналы. Однако это же обстоятельство не позволит достигнуть в транзитном канале наполнения h_{cmp} и исключит разрушение

откосов канала, которое гораздо хуже временной перегрузки водовыпускных сооружений.

Теперь проанализируем тенденцию изменения приращения Δh при изменении величины возмущающего воздействия в начальном створе звена каскада канала по той же зависимости (2) для канала Каратаки при возмущении в начальном створе $\frac{\Delta Q}{Q} = -0,25$ (табл. 2).

Таблица 2

Наполнения в створах при возмущении $\Delta Q_n / Q_n = -0,25$, $\Delta Q_k / Q_k = 0$ и времени $\tau_{10}^1 + \tau_2^1 > t \geq \tau_1^1$

t,сек	H,м	0,92	0,88	0,84	0,79	0,74	0,70	0,66	0,63	0,60	0,58	0,56	0,54	0,52	0,5
	S,м	0	600	1200	1800	2400	3000	3600	4200	4800	5400	5800	6400	7000	7500
600	Δh												-0,004	-0,011	-0,022
	h												0,536	0,509	0,478
1200	Δh										0,001	-0,006	-0,011	-0,018	-0,028
	h										0,579	0,554	0,529	0,502	0,472
2100	Δh								-0,002	-0,004	-0,007	-0,012	-0,017	-0,024	-0,034
	h								0,628	0,596	0,573	0,548	0,523	0,496	0,466
3300	Δh				-0,001	-0,002	-0,004	-0,006	-0,009	-0,012	-0,017	-0,02	-0,028	-0,034	-0,04
	h				0,789	0,738	0,696	0,654	0,621	0,588	0,563	0,54	0,512	0,486	0,460
4500	Δh	-0,002	-0,003	-0,004	-0,006	-0,008	-0,010	-0,012	-0,015	-0,019	-0,022	-0,027	-0,033	-0,040	-0,048
	h	0,918	0,877	0,836	0,784	0,732	0,69	0,648	0,615	0,581	0,558	0,533	0,507	0,48	0,452
5700	Δh	-0,006	-0,007	-0,010	-0,011	-0,013	-0,015	-0,018	-0,022	-0,025	-0,028	-0,033	-0,039	-0,045	-0,053
	h	0,914	0,873	0,83	0,779	0,727	0,685	0,642	0,608	0,575	0,552	0,527	0,501	0,475	0,447
7200	Δh	-0,011	-0,012	-0,015	-0,017	-0,019	-0,021	-0,024	-0,028	-0,031	-0,035	-0,04	-0,045	-0,050	-0,057
	h	0,909	0,868	0,825	0,773	0,721	0,679	0,636	0,602	0,569	0,545	0,52	0,495	0,470	0,443

Результаты расчетов, приведенные в табл. 2, показывают, что при возмущении в начальном створе $\Delta Q_n = -0,25Q_n$ водовыпуски, начиная с расположенного в этом створе, начнут работать в режиме, отличном от проектного, уже через 20 минут. Через 17 часов 32 минуты после возникновения указанного возмущения может вскрыться дно канала в начальном створе. Однако последнее маловероятно ввиду наличия на системах каскадного регулирования авторегуляторов уровня воды на перегораживающих сооружениях. Это исключает долговременные возмущающие воздействия.

В наиболее неблагоприятном положении по отношению к возникающим возмущениям находятся водовыпуски, расположенные на расстоянии $S > 0,85S_1$.

Далее на примере того же канала Каратаки проследим изменение глубины воды в створах звена каскада, когда на рассматриваемый створ накладывается отраженная волна. В том случае, когда имеет место возмущение в начальном створе звена каскада, расчет приращений глубины воды в канале осуществляется по формуле (5) для $t > \tau_{10}^1 + \tau_2^1$.

Время прохождения волной участка канала от начального створа II-II до конечного створа I-I, составит [1]:

$$\tau_{10}^1 = \frac{S_1}{\sqrt{\frac{g\omega}{B} + v}} = \frac{7500}{\sqrt{\frac{9,81 \cdot 1,375}{3,5} + 0,8}} = 2714,3 \text{ с.}$$

Результаты расчета приращений глубины в створах и сами глубины представим в табл. 3.

Таблица 3

Наполнения в створах при возмущении $\Delta Q_n / Q_n = -0,25$, $\Delta Q_k / Q_k = 0$ и времени $\tau_{10}^1 + \tau_2^1 < t$

t, сек	H, м	0,92	0,88	0,84	0,79	0,74	0,70	0,66	0,63	0,60	0,58	0,56	0,54	0,52	0,5
	S, м	0	600	1200	1800	2400	3000	3600	4200	4800	5400	5800	6400	7000	7500
600	Δh											-0,001	-0,006	-0,011	-0,022
	h											0,559	0,534	0,509	0,478
1200	Δh											-0,001	-0,006	-0,012	-0,018
	h											0,579	0,554	0,528	0,502
2100	Δh							-0,001	-0,004	-0,006	-0,009	-0,013	-0,018	-0,024	-0,035
	h							0,659	0,626	0,594	0,571	0,547	0,522	0,496	0,465
3300	Δh				-0,001	-0,002	-0,004	-0,007	-0,01	-0,012	-0,016	-0,02	-0,026	-0,032	-0,041
	h				0,789	0,738	0,696	0,653	0,62	0,588	0,564	0,54	0,514	0,488	0,459
4500	Δh	-0,004	-0,003	-	-0,006	-0,008	-0,010	-0,013	-0,016	-0,019	-0,023	-0,028	-0,033	-0,040	-0,048
	h	0,916	0,877	0,836	0,784	0,732	0,69	0,647	0,614	0,581	0,557	0,532	0,507	0,48	0,452
5700	Δh	-0,018	-0,011	-	-0,012	-0,013	-0,015	-0,018	-0,022	-0,025	-0,028	-0,031	-0,039	-0,045	-0,053
	h	0,914	0,869	0,82	0,778	0,727	0,685	0,642	0,608	0,575	0,552	0,529	0,501	0,475	0,447
7200	Δh	-0,032	-0,019	-	-0,017	-0,019	-0,021	-0,024	-0,028	-0,031	-0,035	-0,04	-0,045	-0,050	-0,057
	h	0,888	0,861	0,824	0,773	0,721	0,679	0,636	0,602	0,569	0,545	0,52	0,495	0,470	0,443

Сравнительный анализ числовых данных табл. 3 и табл. 2 показывает, что влияние обратной отраженной волны проявляется все более значительно с течением времени. Однако воздействие прямой волны на работу водовыпускных сооружений гораздо более значительно, чем обратной. Если влияние прямой волны приводит к аварийному режиму работы водовыпусков уже через 20 минут, то нежелательное воздействие обратной волны наступает через 3 часа 50 минут. Причем приращение наполнения от обратной волны не превышает 11...15 % приращения наполнения от прямой.

Далее на примере того же канала проанализируем изменение глубины воды в створах звена каскада, когда на рассматриваемый створ накладывается отраженная волна, а возмущение в конечном створе звена каскада канала. Расчет приращений глубины воды в канале выполняем по формуле (4) для времени $t > \tau_1^1 + \tau_{20}^1$.

Результаты расчета приведем в табл. 4.

Из табл. 4 видно, что прямая отраженная волна появляется несколько позже обратной отраженной, а также амплитуда ее несколько меньше, чем у обратной отраженной волны. При возмущении в конечном створе $\Delta Q_k / Q_k = -0,25$ глубина воды у нижнего перегораживающего сооружения достигнет h_{cmp} через 2 часа 12 минут.

В этот момент приращение расхода в начальном створе у верхнего перегораживающего сооружения составит $\Delta Q_k = +0,2\%$, что нечувствительно для водовыпусков, находящихся вблизи начального створа. Поэтому следует отметить, что основное нежелательное воздействие на водовыпуски, расположенные вдоль канала, главным образом, вблизи конечного створа звена каскада, оказывает именно обратная волна, образующаяся в этом створе в результате возмущения $\Delta Q_k / Q_k$.

На основе анализа расчетов наполнений в различных створах звена каскада канала в зависимости от наносимых возмущающих воздействий была получена возможность сделать следующие **выводы**:

- Водовыпускные сооружения, расположенные на расстоянии $0,2S_1 \leq S \leq 0,85S_1$ вдоль звена каскада канала, менее всего подвержены динамическим воздействиям со стороны возмущений в канале. Они позволяют обеспечить отводимые расходы воды с погрешностью $\Delta Q_o = \pm 5\%$ от расчетного расхода отвода.
- Отраженные волны в канале старшего порядка системы каскадного регулирования не приносят ощутимого ущерба водовыпускным сооружениям, расположенным вдоль длинного бьефа межгосударственного канала.

Таблица 4

Наполнения в створах при возмущении $\Delta Q_k / Q_k = -0,25$, $\Delta Q_n / Q_n = 0$ и времени $\tau_1^1 + \tau_{20}^1 < t$

t, сек	H _м	0,92	0,88	0,84	0,79	0,74	0,70	0,66	0,63	0,60	0,58	0,56	0,54	0,52	0,5
	S _м	0	600	1200	1800	2400	3000	3600	4200	4800	5400	5800	6400	7000	7500
600	Δh	0,033	0,011	0,001											
	h	0,953	0,891	0,841											
1200	Δh	0,043	0,020	0,007	0,001										
	h	0,963	0,900	0,847	0,791										
2100	Δh	0,061	0,030	0,014	0,006	0,002									
	h	0,981	0,910	0,854	0,796	0,742									
3300	Δh	0,086	0,046	0,024	0,013	0,007	0,003	0,001							
	h	1,006	0,926	0,864	0,803	0,747	0,703	0,661							
4500	Δh	0,105	0,061	0,035	0,020	0,012	0,007	0,003	0,002	0,001					
	h	1,025	0,941	0,875	0,810	0,752	0,707	0,663	0,632	0,601					
5700	Δh	0,120	0,082	0,047	0,027	0,017	0,011	0,007	0,004	0,002	0,001				
	h	1,040	0,962	0,887	0,817	0,757	0,711	0,667	0,634	0,602	0,581				
7200	Δh	0,132	0,095	0,060	0,035	0,023	0,015	0,010	0,006	0,003	0,002	0,001	0,001	0,000	0,0005
	h	1,052	0,975	0,900	0,825	0,763	0,715	0,670	0,636	0,603	0,582	0,561	0,541	0,520	0,5005
7800	Δh	0,144	0,107	0,072	0,042	0,028	0,019	0,013	0,008	0,004	0,003	0,0022	0,002	0,001	0,0012
	h	1,074	0,987	0,912	0,7942	0,7428	0,702	0,6613	0,638	0,604	0,583	0,5622	0,542	0,521	0,5012

- Водовыпуски, расположенные вблизи крайних створов, наиболее подвержены возмущениям в первые 2 часа с момента возникновения возмущений. Эти водовыпускные сооружения необходимо обеспечивать более тщательным надзором со стороны службы эксплуатации, а также на стадии проектирования учесть возможность пропуска аварийных расходов воды через водовыпуск в отводящий канал, например, установить на водовыпуске дополнительно автоводослив. Это позволит защитить канал от разрушения из-за аварийного перелива через борта канала.
- Полученные выражения (2)...(5) позволяют оценить влияние параметров неустановившегося

движения воды в открытом канале системы каскадного регулирования на глубину воды в любом створе канала. Зависимости (2) и (5) рекомендуются для расчета сооружений водораспределения в системах каскадного регулирования межгосударственного значения.

Литература:

4. Маковский Э.Э., Волчкова В.В. Автоматизированные автономные системы трансформации неравномерного стока. – Фрунзе: Илим, 1981. –380 с.
5. Атаманова О.В. Курс лекций по основам автоматики и автоматизации процессов в гидротехническом строительстве: Учеб.пособие. – Бишкек: Изд-во КРСУ, 2009. – 232 с.

Рецензент: д.т.н., профессор Абдурасулов И.А.