

УДК 627.8:[532.543](532.5.013.3)

## РАСЧЕТ КРИВЫХ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОТОКА ДЛЯ СВИСЛОЧСКОГО КАСКАДА ВОДОХРАНИЛИЩ

**С.М.Пастухов**, старший преподаватель

ГУО «Командно-инженерный институт» МЧС Республики Беларусь

**Ключевые слова:** водохранилище, кривая подпора, нормальная и критическая глубина, каскад гидроузлов

### **Введение**

Расчету кривой свободной поверхности в естественных руслах рек посвящено множество работ. Наиболее известными из них являются исследования Б.А. Бахметьева, Н.М. Бернадского, Н.В. Мاستицкого, Н.Н. Павловского, В.И. Чарномского, Хестеда, П.Г. Киселева, Т.Г. Войнич-Сяножецкого, Д.В. Штеренлихта, В.М. Альшева, Л.В. Яковлева и многих других. Данными исследователями было отмечено, что практически все методы по расчету кривой свободной поверхности являются достаточно приближенными и выбор того, либо иного метода зависит от полноты исходных данных. Однако построение кривой свободной поверхности является основным вопросом при рассмотрении неравномерного, плавно изменяющегося движения воды в русле при наличии искусственного препятствия (плотины).

Особенно важной становится задача по расчету кривых свободной поверхности при наличии нескольких водоемов (каскадов) на водотоке одной реки с учетом максимальных расходов воды. Получив такую кривую, находятся все необходимые величины, характеризующие гидравлику потока на протяжении продольного профиля, охваченного расчетом. Таким образом, при проектировании каскадного расположения гидроузлов в результате построения кривых свободной поверхности потока определяются оптимальные расстояния между смежными водоемами с учетом максимальных расходов воды в русле [1].

Согласно [2-5], различают следующие формы свободной поверхности при неравномерном движении жидкости в открытых руслах: кривые подпора и кривые спада. При увеличении глубин вдоль потока образуется кривая подпора, при уменьшении – кривая спада.

В данной работе построение линии свободной поверхности потока осуществлялось для решения двух типов задач:

– определение длины участка русла ( $l$ ) между двумя поперечными сечениями, для которых заданы глубины  $h_{гp1}$  и  $h_{гp2}$ ;

– определение разности отметок ( $\Delta Z$ ) свободной поверхности между граничными сечениями ( $h_{гр2}$  или  $h_{гр1}$ ) при заданных значениях длины ( $l$ ).

Основной целью по расчету кривой свободной поверхности было установление оптимального расстояния между искусственными водными объектами, расположенными на водотоке одной реки, а также оценка взаимного расположения водохранилищ на Свислочском каскаде с учетом максимальных водосбросных расходов.

#### Установление формы кривой свободной поверхности

Для установления формы кривой свободной поверхности, прежде всего, определялись нормальная  $h_0$  и критическая  $h_{кр}$  глубины. Затем рассчитывались глубины на левой и правой границах кривой свободной поверхности  $h_{гр1}$  и  $h_{гр2}$ , и далее весь поток между эти глубинами разбивался на ряд расчетных участков с известными глубинами на границах каждого участка.

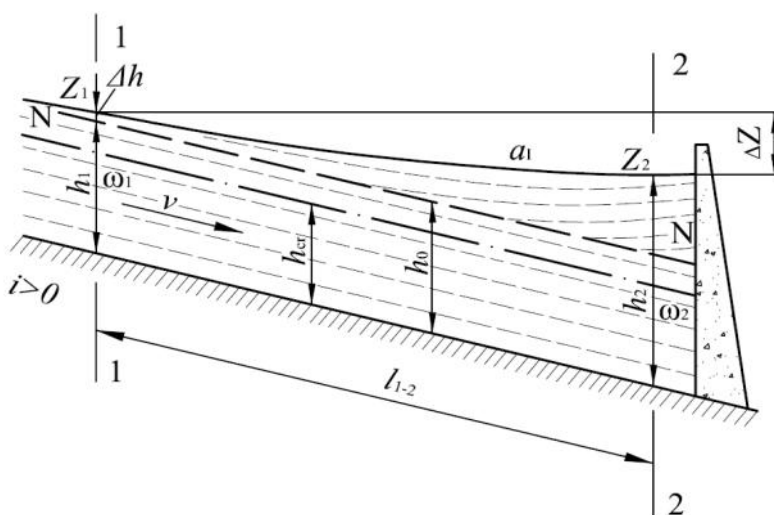


Рис.1 – Расчетная схема к определению параметров кривой свободной поверхности

Разбивка русла на расчетные участки производилась таким образом, чтобы гидравлические характеристики (форма и размеры поперечных сечений, шероховатость, уклон свободной поверхности в естественном состоянии и соответственно расход воды) в пределах каждого

участка были примерно одинаковыми.

Расчеты выполнялись с переходом от участка к участку вверх по течению. По заданной отметке  $Z_2$  горизонта воды и соответственно глубине  $h_2$  в сечении 2-2 определялись (см. рис.1): площадь поперечного сечения потока ( $\omega_2$ ), коэффициент Шези ( $C_2$ ), гидравлический радиус ( $R_2$ ). Отметка  $Z_1$  (глубина  $h_1$ ) в сечении 1-1, отстоящем от сечения 2-2 на расстояние  $l_{1-2}$ , определялась методом последовательных приближений: задавались и вычислялись значения:  $\omega_2$ ;  $\omega_{ср}$ ,  $R_1$ ,  $R_{ср}$ ,  $C_1$ ,  $C_{ср}$ ,  $K^2_{ср}$ .

Длина расчетных участков выбиралась таким образом, чтобы разность  $\Delta Z$  в граничных глубинах, определяемая по формуле (18), составляла не более 0,5 м [1].

Для определения формы кривой свободной поверхности было использовано уравнение неравномерного плавно изменяющегося движения жидкости в открытом русле [3]:

$$i = \frac{d}{ds} \left( \frac{\alpha v^2}{2g} \right) + \frac{v^2}{C^2 R}; \quad (1)$$

где  $i = \frac{dh}{ks}$  – уклон свободной поверхности в расчетном сечении (переменная

величина вдоль по течению);

$v$  – средняя скорость движения потока, м/с;

$C$  – коэффициент Шези, м<sup>0,5</sup>/с;

$\alpha$  – коэффициент Кориолиса, связанный с неравномерным распределением скоростей по течению,  $\alpha=1,1$  [2];

$R$  – гидравлический радиус, м.

Уравнение (1) в соответствии с [1] может быть представлено в следующем виде:

$$\frac{dh}{ds} = \frac{i - \frac{Q^2}{\omega^2 C^2 R} + \frac{\alpha Q^2}{g \omega^3} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial s}}{1 - \frac{\alpha Q^2 B}{g \omega^3}}; \quad (2)$$

где  $\omega$  – площадь живого сечения, м<sup>2</sup>;

$Q$  – расчетный расход воды в русле, м<sup>3</sup>/с;

$B$  – ширина сечения потока по верху, м.

В данном уравнении безразмерная величина  $\frac{\alpha Q^2}{g} \cdot \frac{B}{\omega^3}$  характеризует состояние потока. По предложению В.Д. Жудрина данная величина называется параметром кинетичности [4]:

$$P_k = \frac{\alpha Q^2 B}{g \omega^3}. \quad (3)$$

При значении данного параметра  $P_k < 1$  поток характеризуется спокойным состоянием. Анализ данных по расчету параметров кривой свободной поверхности позволил установить, что параметр кинетичности при движении жидкости в открытых руслах, подпертых гидротехническими сооружениями, не превышает 1, следовательно поток находится в спокойном состоянии.

Подставляя расходную характеристику ( $K$ ) и параметр кинетичности ( $P_k$ ) в уравнение (2), получаем следующий вид [4]:

$$\frac{dh}{dl} \approx \frac{\Delta h}{\Delta l} = \frac{i - Q^2 / \omega^2 C^2 R^2}{1 - P_k} = i \frac{1 - (K_0 / K)^2}{1 - P_k} \quad (4)$$

где  $K$  – расходная характеристика при глубине  $h$  неравномерного движения, которая определяется по следующей формуле:

$$K = SC \sqrt{R}, \quad (5)$$

$K_0$  – расходная характеристика, соответствующая нормальной глубине  $h_0$  равномерного движения, м<sup>3</sup>/с;

$\Delta h$  – изменение глубины потока на его участке малой длины  $\Delta l$ , м;

$i$  – уклон дна.

Коэффициент Шези определялся по формуле И.И. Агроскина [3]:

$$C = \frac{1}{n} + 17,72 \lg R; \quad (6)$$

где  $R = \frac{S}{\chi}$  – гидравлический радиус, м; (7)

$$\chi = B + 2 \cdot h \sqrt{1 + m^2} \text{ – смоченный периметр, м;} \quad (8)$$

$m$  – коэффициент заложения откоса (поскольку русло приравнивается к прямоугольному сечению,  $m = 0$ );

$n$  – коэффициент шероховатости, принимается  $n = 0,03$  (как для рек с благоприятными условиями течения) [3].

Для прямоугольного широкого русла нормальная глубина  $h_0$  определялась по формуле Маннинга [5]:

$$Q = B h_0 \frac{1}{n} h_0^{\frac{1}{6}} \sqrt{h_0 i}, \text{ откуда } h_0 = \left[ \frac{Q}{\frac{1}{n} B i^{0,5}} \right]^{\frac{3}{5}}; \quad (9)$$

где  $h$  – высота в расчетном сечении, м.

Для определения критической глубины потока была использована следующая формула [3]:

$$h_{кр} = \sqrt[3]{\frac{6 Q^2}{g B^2}}. \quad (10)$$

Поскольку при рассмотрении продольного профиля свободной поверхности водохранилищ руслового типа (в том числе и те, которые расположены в каскадах) глубины водного потока увеличиваются вниз по течению, то на основании этого можно сделать вывод о том, что для данных водоемов образуется вогнутая кривая подпора типа  $a_1$  в соответствии с [4].

$$\frac{\Delta h}{\Delta l} = i \frac{1 - (K_0 / K)^2}{1 - P_k} = \frac{\text{+ числитель}}{\text{+ знаменатель}} > 0;$$

Данная кривая является наиболее важным типом с практической точки зрения,

поскольку, задаваясь значениями глубины потока вниз по течению, определяется расстояние, на которое распространится подпор при переменных значениях уклона дна и расходов воды в русле реки.

#### **Методика расчета параметров кривой подпора**

Для кривой подпора рассчитывались следующие параметры (см. рис.1):

- длина участка свободной поверхности  $l_{1-2}$  (по методу Н.Н. Павловского) с целью установления оптимального расстояния между водоемами, расположенными в каскадах;
- разность отметок свободной поверхности воды в начале и конце участка  $\Delta Z$  (по методу решения дифференциальных уравнений в конечных разностях) с целью определения минимального количества расчетных поперечных сечений русла.

За расчетный участок принималось расстояние от глубоководной приплотинной части с глубиной  $Z_1$  до устья реки с нормальной глубиной  $h_0$ . Рассматривая водохранилища руслового типа, видим, что нормальная глубина русла реки образуется в зоне выклинивания подпора (место сопряжения кривой свободной поверхности с нормальным горизонтом воды). Так как кривая  $a_1$  асимптотически приближается к прямой N-N, то очевидно, что подпор, вызванный плотиной (см. рис.1), распространяется вверх по течению на теоретически бесконечно большую длину. Однако практически допускается пренебрегать некоторой незначительной величиной  $\Delta h$ , равной  $(0,01 \div 0,02)h_0$ , и считается длина кривой подпора  $l_{1-2}$  конечной [4].

Расчет длины участка свободной поверхности производился по формуле [3]:

$$l_{1-2} = \frac{a}{i} \{ (z_2 - z_1) - (1 - P'_k)_m \cdot [\Phi(z_2) - \Phi(z_1)] \}; \quad (11)$$

где  $l_{1-2}$  – расстояние между двумя сечениями неравномерного потока с глубинами  $h_1$  и  $h_2$  (индекс 1 относится к предыдущему по направлению движения жидкости сечению);

$$a = \frac{\Delta h}{\Delta z} = \frac{(h_2 - h_1)}{z_2 - z_1}; \quad (12)$$

$$z = \sqrt[x]{\left(\frac{Q'}{Q}\right)^2} = \frac{Q'}{Q}, \quad (13)$$

$x$  – произвольное положительное число ( $2 \leq x \leq 5,5$ ), в расчетах принимается  $x=2$  (по способу Н.Н. Павловского);

$Q'$  – фиктивный расход равномерного движения, определяемый по следующей формуле:

$$Q' = \omega C \sqrt{Ri}; \quad (14)$$

$P'_k$  – фиктивный параметр кинетичности при  $Q'$ , определяемый по формуле (3).

Среднее значение между двумя расчетными поперечными сечениями определялось по следующей формуле:

$$P'_{km} = \frac{P'_{k1} + P'_{k2}}{2}; \quad (15)$$

Функция  $\Phi(z)$  определялась по формуле:

$$\Phi(z) = 1,1513 \lg \left| \frac{1+z}{1-z} \right| \quad (16)$$

**Расчет разности отметок свободной поверхности воды в начале и в конце участка ( $\Delta Z$ )**

Разность отметок свободной поверхности  $\Delta Z$  в начале и в конце рассматриваемого участка определялась на основании последовательного суммирования расчетных участков. Падение свободной поверхности для любого участка реки определялось по основному уравнению неравномерного установившегося движения жидкости в открытом непризматическом русле по формуле, представленной в [3].

Для расчета непризматических русел (естественные русла рек) был применен метод решения дифференциальных уравнений в конечных разностях, по которому расчетная формула (2) имеет вид [3, 6]:

$$\Delta Z = Q^2 \left[ \frac{\alpha}{2g} \left( \frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_1^2} \right) + \frac{\ell}{K_{cp}^2} \right], \quad (17)$$

где  $\Delta Z = (Z_1 - Z_2)$  – разность отметок свободной поверхности воды в начале и в конце расчетного участка, м;  $l_{1-2}$  – длина заданного участка русла, м;  $\omega_1, \omega_2$  – площадь живого сечения, соответственно в начале и в конце расчетного участка, м<sup>2</sup>;  $K_{cp}$  – средняя расходная характеристика на расчетном участке, определяемая по формуле (5), м<sup>3</sup>/с.

С учетом местных потерь напора, которые могут возникать в естественном русле, формула (17) имеет вид [1]:

$$\Delta Z = Q^2 \left[ \frac{\alpha}{2g} (1 + \varphi) \left( \frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_1^2} \right) + \frac{\ell}{K_{cp}^2} \right] \quad (18)$$

где  $\varphi$  – коэффициент местного сопротивления, который в соответствии с [1] при уменьшении скорости вдоль течения изменяется от 0,2 до 1,0. Обычно он принимается 0,5.

**Расчет параметров кривой свободной поверхности для Свислочского каскада водохранилищ**

В состав данного каскада входит 10 водохранилищ, общий объем которых составляет 145 млн.м<sup>3</sup>. Все водохранилища (за исключением водохранилища Головное), входящие в каскад, относятся к русловому типу. Очередность расположения водохранилищ в каскаде (вниз по течению) представлена на рис.2.

Исходные данные для проведения расчетов принимались на основании справочных и проектных материалов [7-9].

При расчете параметров кривой подпора свободной поверхности по описанной

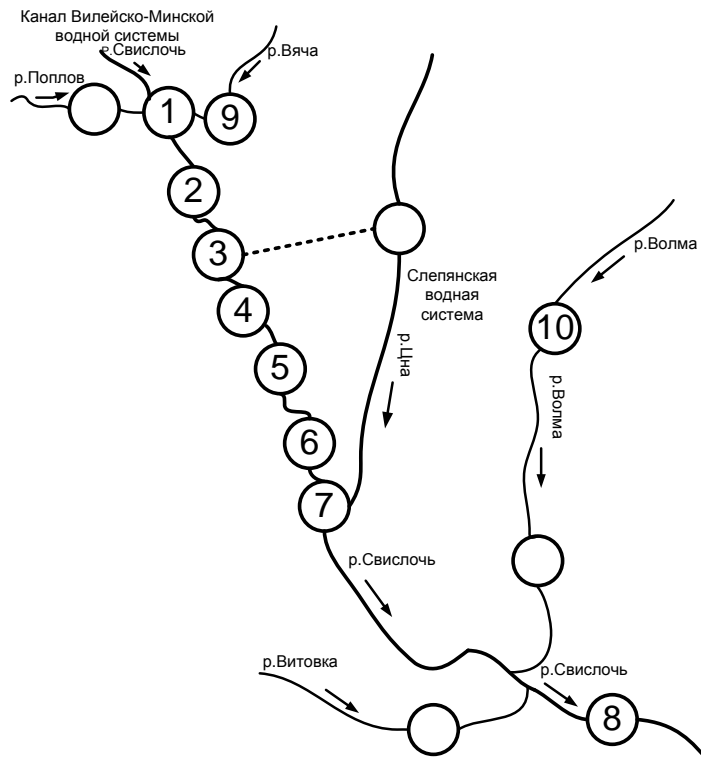


Рис.2 – Схема Свиslочского каскада водохранилищ

**Результаты расчета параметров кривой подпора для Свиslочского каскада водохранилищ**

Поз.	Водохранилище	$l_p, м$	$\Delta Z, м$	$l_{ф}, м$	$N$
1	Заславское	3013,8	6,9	300	15
2	Криница	6630,9	5,3		12
3	Дрозды	28938,46	3,8	150	10
4	Комсомольское оз.	7512,2	3,5	5700	10
5	Парк им. Горького	5327,3	2,5	3500	9
6	Водохранилище ТЭЦ-2	8762,8	4,0	6300	8
7	Чижовское	8045,4	3,7	7800	9
8	Осиповичское	14212,5	2,0	100000	6
9	Вяча	2137,7	6,1	14600	14
10	Волма	4677,3	2,5	–	6

*Примечание:*  $l_p$  – суммарная расчетная длина кривой подпора, м;  $\Delta Z$  – разность отметок свободной поверхности в начале и в конце расчетного участка, м;  $l_{ф}$  – фактическое расстояние между ближайшими водоемами в каскаде, м;  $N$  – количество расчетных участков по каждому водоему; фактическое расстояние для водохранилища Волма не определялось ввиду отсутствия вышележащего водоема.

стояние между данными водоемами меньше, чем длина участка свободной поверхности. В данном случае при возникновении аварийной ситуации на вышележащем водоеме

выше методике продольное русло каждого водоема разбивалось в среднем на 10-15 поперечных створов. Ввиду большого количества промежуточных расчетов по каждому створу в данной работе в таблице представлены только окончательные результаты. При определении параметров кривой подпора за расчетный расход принималась максимальная пропускная способность водосбросных сооружений в соответствии с [9]. Расчет параметров участка свободной поверхности для водохранилища Головное, расположенного на р. Поплов, не производился, так как данный водоем относится к наливному типу и практического интереса не представляет.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что такие водохранилища, как Криница, Дрозды, Комсомольское озеро, парк им. Горького, ТЭЦ-2 и Чижовское расположены в зоне влияния кривой подпора, т.е. рас-

(перелив воды через гребень, либо образование прорана в теле плотины) одновременно будет происходить повышение уровня воды в нижележащем (см. рис.3а). При данном расположении участок русла между водохранилищами практически отсутствует и является лишь частью нижележащего водоема.

В случае расположения водоемов вне зоны подпора (водохранилища Осиповичское, Волма, Вяча) повышение уровня воды в нижележащем водоеме при возникновении

гидродинамической аварии на вышележащем наступает через некоторый период времени  $\Delta T$ .

Данный отрезок времени зависит от длины участка русла, определяемого зоной выклинивания подпора и нижним бьефом вышележащего водоема. По данным лабораторных исследований, период времени  $\Delta T$  составляет около 5 мин. на 1 км русла (см. рис.3 б, здесь время  $\Delta T = 30$  с показано для моделей гидротехнических сооружений).

На рис. 3 представлены результаты лабораторных исследований по оценке уровня режима гидроузлов, расположенных в каскадах. На рис. 3 а показаны результаты для двух водоемов при отсутствии между ними участка русла, на рис. 3б – для водоемов, участок русла между которыми составлял 1 км.

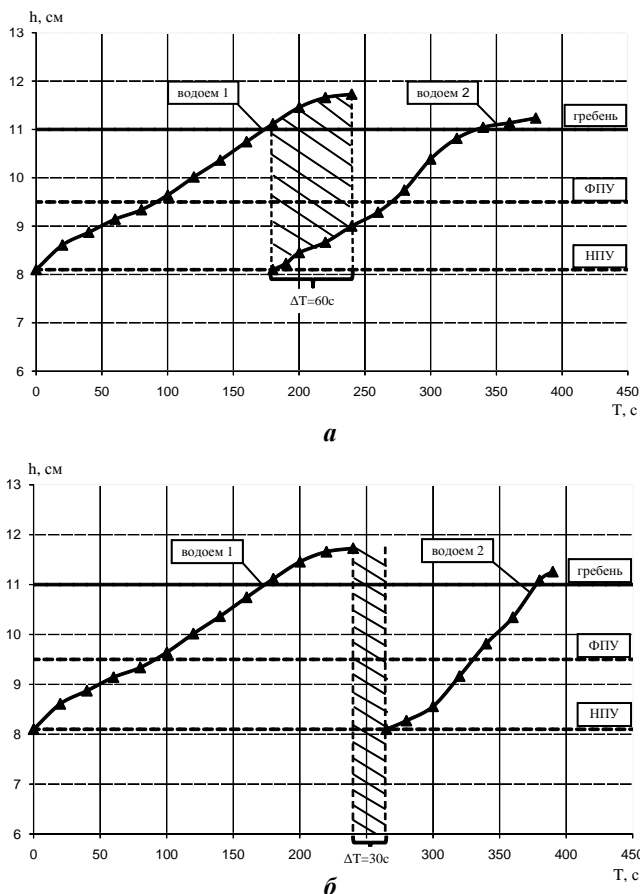


Рис.3 – Сравнительный анализ уровня режима гидроузлов, расположенных в каскадах

### Заклучение

Представленные результаты свидетельствуют об отличительных особенностях уровня режима каскадов водохранилищ, расположенных на территории Республики Беларусь. Определение длины кривой подпора является актуальной задачей при проектировании и реконструкции искусственных водных объектов одиночного и каскадного расположения.

В результате проведенных исследований установлено, что в случае расположе-



ния водохранилищ в подпоре одновременно с возникновением аварийных ситуаций на вышележащих водоемах будет происходить поднятие уровня воды в нижележащих. При наличии свободного участка русла с нормальной глубиной  $h_0$  поднятие уровня в нижележащих водоемах происходит спустя интервал времени, который зависит от величины расхода и сценариев возникновения аварии. Однако масштабы последствий от возможных гидродинамических аварий при наличии свободного участка русла между водохранилищами будут гораздо больше, чем при их расположении в подпоре за счет увеличения скорости водного потока по участку.

#### Литература

1. Михневич, Э.И. Устойчивость русел открытых водотоков. / Э.И. Михневич. – Минск: Ураджай, 1988. – 240 с.
2. Бахметьев, Б.А. Гидравлика открытых русел / Б.А. Бахметьев. – Л.: Стройиздат наркомстроя, 1941. – 246 с.
3. Штеренлихт, Д.В. Гидравлические расчеты: учеб. пособие. / Д.В. Штеренлихт, В.М. Алышев, Л.В. Яковлева. – М.: Колос, 1992. – 287 с.
4. Чугаев, Р.Р. Гидравлика (техническая механика жидкости): учебник для вузов / Р.Р. Чугаев. – 4-е изд., доп. и перераб. – Л.: Энергоиздат, Ленингр. отд-ние. 1982. – 672 с.
5. Чертоусов, М.Д. Гидравлика. Специальный курс. / М.Д. Чертоусов. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 630 с.
6. Богомолов, А.И., Гидравлика: учебник для вузов / А.И. Богомолов, К.А. Михайлов. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Стройиздат, 1972. – 648 с.
7. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т.5. Ч.1. Описание рек и озер Белоруссия и Верхнее Поднепровье. / К.А. Ключева; под общ. ред. К.А. Ключевой. – Л.: Гидрометеоздат, 1971. – 1107 с.
8. Широков, В.М. Водоохранилища Беларуси: справочник / В.М. Широков, В.А. Пидоплечко. – Минск: Университетское, 1992. – 80 с.
9. Водоохранилища Беларуси: справочник / М.Ю. Калинин [и др.]; под общ. ред. М.Ю. Калинина. – Минск: Полиграфкомбинат им. Я.Коласа, 2005. – 183 с.

#### Summary

##### **Pastukhov S. Calculations of free surface curves for water stream at Svisloch cascade reservoirs**

Results of calculations of key parameters for free surface curve for water stream at Svislochs cascade reservoirs considering maximum stream flow through water overflow. Assessment of interpositioning of adjacent hydrounits; conclusion - most part of the reservoirs included into the cascade are located within an impact area of backwater curve. The results of the research show that consequences of potential hydrodynamic failures are even more serious, if a free streambed area between water reservoirs is available, than if such failures happened in backwater due to water stream speed increase in such area.

Поступила 15 апреля 2010 г.