

О ПОСТРОЕНИИ ГРАФИКА ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ ВОДЫ В ПРОИЗВОЛЬНОМ СТВОРЕ РЕКИ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ВОЛНЫ ПОПУСКА

Г. И. ТАРАКАНОВ

Кандидат технических наук

(Московский лесотехнический институт)

Регулирование стока сплавных рек, как известно, имеет целью поддерживать в реке в маловодные периоды сплавной навигации достаточные для сплава глубины и скорости течения. Для этого участки рек с пониженной сплавопропускной способностью получают в межень дополнительное питание в виде непрерывных, круглосуточных или периодических (в течение нескольких часов ежедневно) попусков воды из водохранилищ.

Эффективность наиболее распространенного в условиях сплава суточного (периодического) регулирования зависит от величины и продолжительности ежедневных попусков, которые, в свою очередь, лимитируются в основном бытовой приточностью к данному участку реки в период регулирования. Действие одиночного пуска определенной величины и продолжительности зависит, кроме того, от морфометрических характеристик русла: уклона, шероховатости, очертаний дна и берегов в плане и продольном профиле, рукавности, поперечного профиля ложа реки и поймы и т. д. Перечисленные факторы оказывают существенное влияние на форму и скорость распространения волны пуска, а следовательно, и на продолжительность стояния сплавных горизонтов в каждом створе реки. Поэтому точный расчет действительной эффективности пуска (в порядке проверки расчетных предложений) может быть сделан только при учете влияния всех этих факторов.

Однако строгое аналитическое решение задачи на построение графика изменения уровня воды в произвольном створе реки при прохождении волны пуска с учетом всех морфометрических особенностей русла встречает серьезные трудности. Поэтому заслуживает внедрения в практику сплавотехнических расчетов приближенный способ построения графиков изменения уровней в реке при сплавных пусках, предложенный инж. В. В. Савельевым (см. «Техническая информация Гипролестранса» за март 1953 г., приложение № 1).

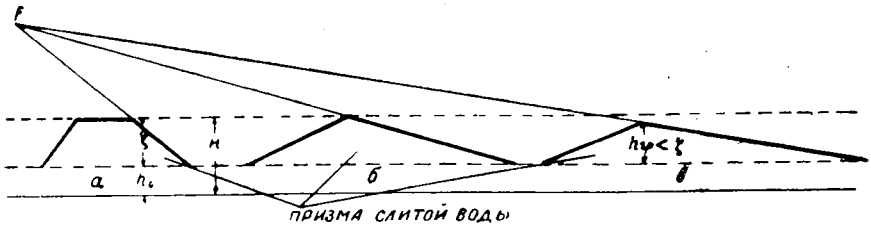


Рис. 1. Последовательное изменение продольного профиля волны попуска.

В порядке популяризации этого метода следует отметить, что построение графика колебания уровней $[z = f(t)]$ может быть значительно упрощено, если учесть, что схематично этот график можно построить по трем или четырем точкам без предварительного громоздкого построения мгновенных продольных профилей волны попуска и при полном исключении элементов подбора, к которому рекомендует прибегать В. В. Савельев для определения ряда расчетных величин.

Как указывает В. В. Савельев, схематизированный продольный профиль волны попуска, имеющий первоначально трапецеидальное очертание (рис. 1, а), постепенно расплывшаяся, на некотором удалении от плотины принимает форму треугольника с высотой, равной первоначальной высоте волны ζ (рис. 1, б). При дальнейшем расплывании волны высота ее гребня начинает убывать (рис. 1, в).

Во всех створах реки, через которые волна попуска проходит, имея трапецеидальные очертания, график изменения уровней при известной высоте волны ζ можно приблизительно построить по четырем точкам, соответствующим моментам: 1) начала повышения уровня воды — $t_{н. пов.}$; 2) конца повышения — $t_{к. пов.}$; 3) начала понижения уровня воды — $t_{н. пон.}$ и 4) конца понижения — $t_{к. пон.}$ (рис. 2, а). Для построения графика изменения уровня в створах, через которые волна попуска проходит, имея треугольные очертания, достаточно трех точек, соответствующих: 1) началу повышения уровня воды — $t_{н. пов.}$; 2) моменту прохождения через створ гребня волны — $t_{гр}$ и 3) концу понижения уровня воды — $t_{к. пон.}$ (рис. 2, б).

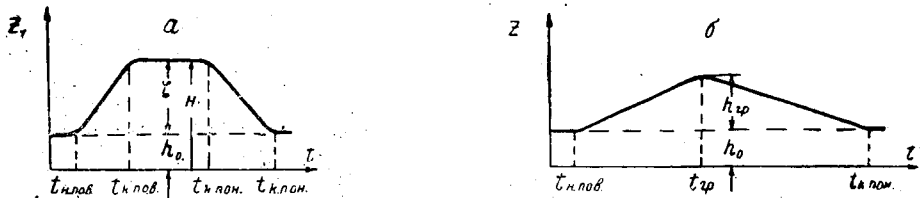


Рис. 2. Графики изменения уровня воды.

При проходе через данный створ волна имеет трапецеидальные очертания в тех случаях, когда расстояние $L_{ств.}$ от плотины до створа удовлетворяет неравенству:

$$L_{ств.} < 3600 C_{\tau}^{-} t_{пон.} \frac{\frac{2q_{пон.}}{\zeta} - C_{\tau}^{+}}{C_{\tau}^{+} + C_{\tau}^{-} - \frac{2q_{пон.}}{\zeta}} M, \quad (1)$$

где $q_{\text{поп}} = \frac{Q_{\text{поп}}}{P_{\text{ср}}} = \frac{Q_{\text{поп}}}{\frac{B_0 + B_{\zeta}}{2}}$ — удельный расход попуска (в $\frac{\text{м}^3}{\text{сек}}/\text{м}$),

отнесенный к средней ширине потока в пределах тела волны;

B_0 — средняя ширина речного потока, соответствующая средневзвешенному расходу ботовой приточности;

$Q_0 = \frac{\sum Q_i l_i}{L_p}$ к участку регулирования длиной L_p при закрытой плотине;

B_{ζ} — ширина потока по урезу (на высоте волны) при расходе в реке $Q = Q_0 + Q_{\text{поп}}$;

$t_{\text{поп}}$ — продолжительность попуска в часах;

ζ — высота волны, равная разности нормальных глубин $H - h_0$, соответствующих расходам $Q = Q_0 + Q_{\text{поп}}$ и Q_0 ; высота волны ζ может быть определена по формуле:

$$\zeta = H - h_0 = \left(\frac{Q_n}{B_{\text{ср}} \sqrt{i}} \right)^{\frac{1}{1,5+y}} - \left(\frac{Q_{0n}}{B_0 \sqrt{i}} \right)^{\frac{1}{1,5+y}} \approx \left(\frac{Q_n}{B_{\text{ср}} \sqrt{i}} \right)^{0,57} - \left(\frac{Q_{0n}}{B_0 \sqrt{i}} \right)^{0,57};$$

n — коэффициент шероховатости дна русла;

i — средний уклон дна;

C_{τ}^+ — техническая скорость распространения нижней границы фронта положительной волны (волны наполнения) в м/сек;

C_{τ}^- — техническая скорость распространения верхней границы фронта отрицательной волны (волны отлива), появляющейся в тылу волны наполнения по прекращении попуска; измеряется C_{τ}^- также в м/сек.

На определении величин C_{τ}^+ и C_{τ}^- ниже остановимся подробнее.

Неравенство (1) и последующие формулы получены, исходя, главным образом, из геометрических соображений, положенных в основу способа построения мгновенных продольных профилей волн попуска, предложенного В. В. Савельевым.

При выполнении условия (1) для определения положения переломных точек схематизированного графика изменения уровня $z = f(t)$ легко получить следующие соотношения:

$$t_{\text{н. пов}} = \frac{L_{\text{ств}}}{3600 C_{\tau}^+} \text{ час.}; \quad (2)$$

$$t_{\text{к. пов}} = \frac{L_{\text{ств}}}{3600 \left(\frac{2q_{\text{поп}}}{\zeta} - C_{\tau}^+ \right)} \text{ час.}; \quad (3)$$

$$t_{\text{н. поп}} = \frac{L_{\text{ств}}}{3600 C_{\tau}^-} + t_{\text{поп}} \text{ час.}; \quad (4)$$

$$t_{\text{к. поп}} = \frac{L_{\text{ств}}}{3600 \left(\frac{2q_{\text{поп}}}{\zeta} - C_{\tau}^- \right)} + t_{\text{поп}} \text{ час.} \quad (5)$$

При $L_{\text{ств}} = 3600 t_{\text{поп}} \frac{C_{\tau}^-}{C_{\tau}^- + C_{\tau}^+ - \frac{2q_{\text{поп}}}{\zeta}}$ продольный профиль

волны попуска и график изменения уровня приобретают треугольные

очертания. Точки графика, соответствующие началу повышения и концу понижения уровня, в том случае определяются так же, как и при трапециевидальной форме графика, то есть по уравнениям (2) и (4).

Время же окончания повышения уровня, совпадающее с началом его понижения, определяется зависимостью:

$$t_{к. пов} = t_{н. пон} = \frac{C_T^- \cdot t_{пон}}{C_T^- + C_T^+ - \frac{2q_{пон}}{\zeta}} \quad (6)$$

При $L_{ств} > 3600 C_T^- \cdot t_{пон} \frac{\frac{2q_{пон}}{\zeta} - C_T^+}{C_T^- + C_T^+ - \frac{2q_{пон}}{\zeta}}$ переломные точки

графика изменения уровня $z = f(t)$ определяются из следующих соотношений.

Начало повышения уровня находится по уравнению (2):

$$t_{н. пов} = \frac{L_{ств}}{3600 C_T^+} \text{ час.}$$

Момент прохождения через данный створ гребня волны ($t_{гр}$), то есть верхняя точка графика, определяется из уравнения:

$$\left[\left(C_T^- + C_T^+ - \frac{2q_{пон}}{\zeta} \right) t_{гр} - C_T^- \cdot t_{пон} \right] \left(C_T^+ t_{гр} - \frac{L_{ств}}{3600} \right)^2 = \frac{4t_{пон} q_{пон}}{\zeta} \left[\left(\frac{2q_{пон}^2}{\zeta^2} - \frac{3q_{пон} C_T^+}{\zeta} + C_T^{+2} \right) t_{гр} - \left(\frac{q_{пон}}{\zeta} - C_T^+ \right) \frac{L_{ств}}{3600} \right] t_{гр} \quad (7)$$

Обозначив левую и правую части этого уравнения через $F_1(t_{гр})$ и $F_2(t_{гр})$ и построив кривые этих функций, по точке их пересечения находим значение $t_{гр}$, при котором $F_1(t_{гр}) = F_2(t_{гр})$.

Понижение уровня воды в данном створе заканчивается по прошествии с момента открытия плотины промежутка времени

$$t_{к. пон} = \frac{2q_{пон} t_{пон}}{\zeta C_T^{+2}} \left[\frac{L_{ств} \zeta C_T^+}{7200 q_{пон} t_{пон}} + \left(C_T^+ + \frac{C_T^-}{2} - \frac{q_{пон}}{\zeta} \right) \pm \sqrt{\frac{L_{ств} \zeta C_T^+}{3600 q_{пон} t_{пон}} \left(\frac{C_T^+ - C_T^-}{2} - \frac{q_{пон}}{\zeta} \right) + \left(C_T^+ + \frac{C_T^-}{2} - \frac{q_{пон}}{\zeta} \right)^2 - \frac{\zeta C_T^{+2} C_T^-}{2q_{пон}}} \right] \text{ час.} \quad (8)$$

Если в выражении (8) при обоих знаках перед корнем $t_{к. пон}$ имеет положительное значение, то действительным $t_{к. пон}$ будет большее его значение, ближайшее к $t_{гр}$.

Технические скорости распространения положительной волны C_T^+ и отрицательной волны C_T^- вычисляются по формулам:

$$C_T^+ = v_0 + \alpha^+ \sqrt{qh_0}, \quad (9)$$

$$C_T^- = v_{0в} + \alpha^- \sqrt{qH}, \quad (10)$$

где v_0 и h_0 — соответственно средняя скорость течения и бытовая глубина при первоначальном установившемся режиме (до попуска) при расходе Q_0 ;

$v_{0в}$ и H — средняя скорость и нормальная глубина на участке потока между передней и задней гранями волны, в пределах которого движение можно считать установившимся. Эти величины определяются, исходя из основного уравнения равномерного движения:

$$Q = Q_0 + Q_{\text{поп}} \approx \frac{1}{n} B_{\text{ср}} H^{1,5+y} \sqrt{i},$$

откуда
$$H \approx \left(\frac{Q_n}{B_{\text{ср}} \sqrt{i}} \right)^{\frac{1}{1,5+y}} \approx \left(\frac{Q_n}{B_{\text{ср}} \sqrt{i}} \right)^{0,57};$$

$$v_0 \approx \frac{Q}{B_{\text{ср}} H};$$

α^+ и α^- — коэффициенты, зависящие от расхода и режима попуска, уклона, шероховатости, формы и особенностей строения русла.

Поскольку учет влияния всех особенностей русла затруднителен, можно в приближенных расчетах коэффициенты α^+ и α^- определять по графикам В. В. Савельева (рис. 3), на которых эти коэффициенты даются в за-

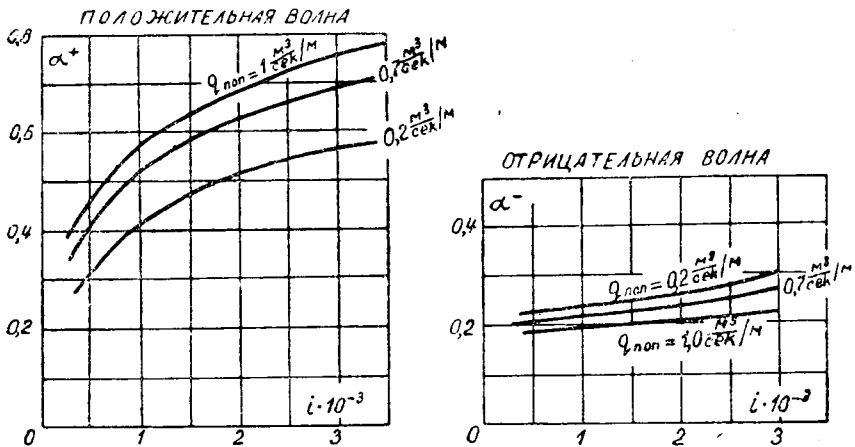


Рис. 3. Графики значений коэффициента α в формуле $C_T = v_0 + \alpha \sqrt{gh_0}$.

Графики составлены для условий: уклоны дна $i = 0,0003 - 0,0030$; начальные глубины (средние) $h_0 \cong 0,3 \text{ м}$; конечные глубины $H = 0,75 - 1,70 \text{ м}$; коэффициент шероховатости русла $n = 0,040 - 0,067$; расход за время попуска постоянный.

висимости только от уклона дна русла i и удельного расхода попуска $q_{\text{поп}}$. Следует при этом оговориться, что графики В. В. Савельева составлены на основании расчетов кривых свободной поверхности так называемыми «детальными методами» гидравлики неустановившегося движения жидкости в открытых руслах и нуждаются в проверке и уточнении в лабораторных условиях и в натуре. Такая проверка должна явиться предметом специальных исследований.

Учитывая непрерывное снижение гребня волны, спустя время

$$t' = \frac{C_T^- \cdot t_{\text{поп}}}{C_T^- + C_T^+ - \frac{2q_{\text{поп}}}{\zeta}} \text{ час.} \quad (6)$$

после начала попуска, время $t_{гр}$ следует определять путем последовательных приближений. Для этого, найдя вначале $t'_{гр}$ по точке пересечения кривых $F_1(t_{гр})$ и $F_2(t_{гр})$ [см. уравнение (7)] при технической скорости C_T' , вычисленной по формуле

$$C_T' = v'_{0в} + \alpha^- \cdot \sqrt{qH'}, \quad (10)$$

следует определить высоту гребня волны попуска $h_{гр}$

$$h_{гр} = \zeta \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{2\zeta\lambda}{p}}}{1 + \sqrt{1 + \frac{2\zeta\lambda}{p} + \frac{\zeta\lambda}{p}}}, \quad (11)$$

где
$$\lambda = 3600 \left[\left(C_T' + C_T^+ - \frac{2q_{поп}}{\zeta} \right) t'_{гр} - C_T^- \cdot t_{поп} \right]$$

и
$$p = 3600 q_{поп} t_{поп}.$$

После этого можно вычислить истинное значение C_T^- :

$$C_T^- = v''_{0в} + \alpha^- \cdot \sqrt{qh_{гр}}, \quad (12)$$

где
$$v''_{0в} = \frac{1}{n} h_{гр}^{0,5+y} \sqrt{i} \approx \frac{1}{n} h_{гр}^{0,5} \sqrt{i},$$

$$h_{гр} = h_0 + \frac{\zeta}{2} = \frac{h_0 + H}{2}.$$

Подставив уточненное таким образом значение C_T^- в выражение $F_1(t_{гр})$ [левая часть уравнения (7)], следует рядом с прежним построить новый график функции $F_1(t_{гр})$, пересечение которого с кривой $F_2(t_{гр})$ даст искомое значение $t_{гр}$.

Ордината точки с абсциссой $t_{гр}$ (вершина графика) равна сумме первоначальной бытовой глубины h_0 и высоты гребня $h_{гр}$, вычисленной по формуле (11).

Исходя из тех же соображений, при удалении створа от плотины на расстояние

$$L_{ств} > 3600 C_T^- \cdot t_{поп} \frac{\frac{2q_{поп}}{\zeta} - C_T^+}{C_T^- + C_T^+ - \frac{2q_{поп}}{\zeta}}$$

техническую скорость распространения отрицательной волны C_T^- для подстановки в уравнение (8) следует определять по формуле

$$C_T^- = v''_{0в} + \alpha^- \cdot \sqrt{qh_{гр}}. \quad (13)$$

Построив по приведенным формулам график изменения уровня воды при прохождении волны попуска через наиболее удаленный от плотины створ на участке реки с пониженной сплавпропускной способностью, легко установить продолжительность периода, в течение которого на протяжении всей трассы при данной интенсивности ее дополнительного питания будут обеспечены достаточные для сплава глубины. Таким образом, с помощью указанного графика можно проверить расчетом эффективность намечаемого регулирования стока.