
С. Х. БУДЫКА

доцент кандидат технических наук

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ СПЛАВА ЛЕСА ПРИ ПОМОЩИ ПЛОТИН

В водном транспорте леса особую роль играют малые реки, где сплав проводится при помощи плотин.

На малых сплавных реках Советского Союза построено большое количество плотин. В БССР много плотин лесосплавного назначения построено и на сплаво-осушительных каналах.

Назначение плотин заключается в том, чтобы регулировать сток сплавных путей и тем самым удлинять сплавной период. Сплав леса при помощи плотин в практике получил название «попускового лесосплава».

Сущность регулирования стока сплавных путей плотинами заключается в том, что путем устройства плотин образуются водохранилища и накопленную воду расходуют, создавая необходимые сплавные глубины на определенном участке реки, расположенном ниже плотины. Кроме того, устройством плотин создаются сплавные глубины и в верхнем бьефе, в зоне подпора.

Широкое применение попускового лесосплава давно уже вызывает необходимость в научно-техническом обосновании и в дальнейшем развитии его теории.

С гидравлической точки зрения попусковый лесосплав осуществляется при неустановившемся движении водного потока.

Многие авторы у нас и за границей (С. А. Христианович [1], В. В. Ведерников [2], И. В. Егиазаров [3], М. А. Великанов [4], В. А. Архангельский [5], А. Н. Рахманов [6], Буссинеск [7], Сен-Венан [8] и др.) дали глубокие теоретические и большие экспериментальные исследования в области неустановившегося движения водного потока в открытом русле. Однако сложность методики расчетов и отдаленность от специфики лесосплава не дают возможности применять их в инженерной практике этой области.

Впервые сделали попытку применить теорию неустановившегося движения водного потока в открытом русле для целей лесосплава В. Г. Самсоненко и С. В. Титов [9]. Их книга, из-

данная в 1933 г., явилась в свое время началом для развития науки о попусковом лесосплаве. В настоящее время эта книга имеет лишь историческое значение и отражает ранний период изучения этого вопроса.

Преследуя цель дать метод водохозяйственных расчетов, учитывающий специфику лесосплава, который мог бы найти широкое применение в инженерной практике, мы в своих работах [10, 11, 12, 13] изложили ряд вопросов в этой области. В частности, в них освещены основные водохозяйственные расчеты при пропусках с постоянными и переменными расходами, исходные положения при проектировании водохранилищ, расстояния между ними и др.

В настоящей работе рассматриваются дополнительные вопросы в области попускового лесосплава, в том числе и вопросы переменных расходов попуска. При этом мы применяем нашу новую формулу скорости движения фронта волны [13].

ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ И ВИДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Схемы регулирования стока устанавливаются в каждом конкретном случае, основываясь на материалах изысканий и конкретных топографических и гидрологических условиях. Однако, обобщая возможные варианты по признакам расположения плотин, можно установить три основные схемы регулирования.

1. Плотины расположены на неславных притоках. При этой схеме сплавной путь остается свободным, он не перегораживается плотинами. Дополнительное питание сплавного пути осуществляется из нескольких точек.

2. Одна плотина, создающая сравнительно большой объем водохранилища, расположена в верховьях сплавной реки, выше начальной точки сплава. При этой схеме сплавной путь остается также свободным. Дополнительное питание сплавного пути осуществляется из одной точки.

3. Плотины построены непосредственно на сплавной части реки (канала) и должны иметь приспособления для пропуска леса с верхнего бьефа в нижний.

Кроме указанных трех схем регулирования, могут быть схемы комбинированные.

Выбор той или иной схемы регулирования зависит от многих местных условий. Например, первые две схемы имеют то преимущество, что сплавная трасса не перегораживается плотинами, что облегчает проплав древесины. Отрицательной стороной этих схем является то, что вода, пущенная из водохранилища, проходит по сплавному пути транзитом, не задерживаясь в последующих водохранилищах. Это снижает степень использования регулируемого стока. При третьей же схеме, когда непосредственно на сплавной части водостока построено

несколько плотин, степень использования регулируемого стока значительно возрастает. В этом случае вода, выпущенная из одной плотины, производя необходимую транспортную работу, пополняет водохранилище нижележащей плотины.

Кроме этого, промежуточные плотины имеют большое значение для переформирования попуска. При больших расстояниях движения волны фронт ее, имея скорость большую, чем гребень, успевает значительно оторваться от тела попуска. Это уменьшает длину полезной части волны с заданной глубиной.

Однако отрицательной стороной третьей схемы является необходимость производить пропуск леса из верхнего бьефа в нижний, что вызывает дополнительные материальные затраты и создает неудобства при сплаве.

В зависимости от величины стока реки, топографии долины, берегов и русла, а также от чисто эксплуатационных условий регулирование стока сплавных путей может быть трех основных видов:

1) суточное, когда в течение одних суток производится накопление воды и ее расходование. Ежедневно совершается полный цикл;

2) периодическое, когда накопление воды производится в течение нескольких суток (двух и более). Этот вид регулирования вызывается тем, что естественные расходы реки (канала) малы и при суточном регулировании скопление воды в водохранилище получается незначительное;

3) сезонное, когда накопление воды в водохранилище производится один раз в сезон, преимущественно в период весеннего паводка, а затем эта вода расходуется для создания необходимых глубин на сплавной трассе.

При сезонном регулировании накопление воды и ее расходование происходит в период не более одного сезона. Длительность сохранения сплавных глубин в этом случае зависит от количества накопленной воды и величины расхода попуска.

При сезонном регулировании накопление воды в водохранилище может производиться не только за счет водосбора регулируемого канала или реки, но и путем ввода воды из других водосборов.

Как видно, предлагаемое определение видов регулирования по смыслу своему несколько отличается от обычных определений, принятых в гидротехнике.

При установлении видов регулирования сплавных путей следует исходить не только из гидрологических соображений, но и не в меньшей мере из соображений чисто эксплуатационных, направленных на лучшее использование рабочей силы и средств производства.

Исходя из эксплуатационных соображений, очень важно, чтобы сплав проводился ежедневно (суточное регулирование). В этом случае рабочая сила и средства производства будут

использоваться ежедневно и не будет надобности в ожидании накопления водохранилища, переброске рабочих на другие работы.

При осуществлении периодического регулирования (2 и более суток) в те дни, когда нет попусков, рабочие-сгонщики должны быть заняты иными работами.

Сезонное регулирование имеет то преимущество, что при его осуществлении можно создать непрерывное дополнительное питание на протяжении определенного периода времени. Однако отрицательной стороной этого вида регулирования является непроизводительная трата воды в ночное время, когда сплавные работы либо прекращаются, либо проводятся с небольшой интенсивностью.

Исходя из основных схем и видов регулирования, возникают и исходные положения для расчета водохранилищ.

Первое исходное положение. Когда заданным условием является необходимость осуществления суточного регулирования. В этом случае неизвестными величинами являются необходимый полезный объем водохранилища, дальность распространения дополнительного питания и время стояния сплавных уровней при попуске.

Второе исходное положение. Когда необходимо иметь такой полезный объем водохранилища, чтобы обеспечить дополнительным питанием участок реки протяжением l и чтобы сплавные глубины на участке обеспечивались бы не менее t часов.

Это исходное положение соответствует периодическому регулированию, так как время накопления необходимого количества воды может быть самое различное.

Третье исходное положение. Когда по конкретным местным условиям является целесообразным создать большое водохранилище (или же оно уже имеется, но его нужно использовать для дополнительного питания сплавной трассы).

Таким образом, полезный объем водохранилища является величиной заданной. В этом случае регулирование будет сезонное. Здесь необходимо определить наиболее целесообразное протяжение участка реки l_x , обслуживаемое данным водохранилищем.

ПРОТЯЖЕННОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПИТАНИЯ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ СТОЯНИЯ СПЛАВНЫХ ГЛУБИН ПРИ ПОСТОЯННОМ РАСХОДЕ ПОПУСКА

Дальность распространения дополнительного питания при поступлении из плотины постоянного расхода попуска ($Q_n = \text{const}$) зависит от времени, в течение которого срабатывается водохранилище.

При постоянных расходах попуска на регулируемом участке сохраняются постоянные уровни до тех пор, пока происходит поступление постоянного расхода воды из водохранилища. При этом распластывание волны при этом происходит только в передней части ее за счет разности скоростей между фронтом и гребнем. Как только поступление Q_n из плотины прекращается, начинается интенсивное распластывание выпущенного объема воды также и в хвостовой части волны. Следовательно, если расход попуска (Q_n) обеспечивает только минимальные сплавные глубины (что и следует делать для эффективного использования накопленной воды), то они на регулируемом участке имеют место только в тот период времени, в течение которого происходит сработка сливной призмы. Исходя из этого, протяженные пути, обеспеченные сплавными глубинами, будет равно:

$$l = \frac{G}{Q_n} \cdot W, \quad (1)$$

где: G — полезный объем водохранилища;

Q_n — необходимый попусковой расход, обеспечивающий минимальные сплавные глубины в расчетных створах;

W — средняя скорость движения попусковой волны (в этом случае скорость гребня волны).

Практически нас интересует вопрос не только о том, на какое расстояние распространится попуск с необходимыми глубинами, но и сколько времени будут иметь место сплавные глубины на различных расстояниях от плотины. Мы считаем, что для эффективного использования рабочих при проведении сплава необходимо, чтобы сплавные глубины при одном попуске держались бы в самых отдаленных от плотины створах не менее 5 часов.

Очевидно, что заданные глубины непосредственно ниже плотины будут столько времени (t), сколько времени будет срабатываться водохранилище, а именно:

$$t = \frac{G}{Q_n}. \quad (2)$$

На других расстояниях от плотины время стояния сплавных (заданных) глубин будет меньше на величину того времени, которое потребно для добегания попуска от плотины до интересующего нас створа.

Из сказанного видно, что продолжительность стояния заданных глубин в сечении на любом расстоянии l_x от плотины при $l_x \leq l$ будет равна:

$$t = \frac{G}{Q_n} - \frac{l_x}{W}. \quad (3)$$

Уравнение показывает, что время стояния заданных глубин при условии постоянства скоростей прямо пропорционально расстоянию. Задавшись величиной $t_{сн}$, из уравнения (3) легко опре-

делить предельное расстояние l_x до того створа, где сплавная глубина имеет место за данный период времени, тогда уравнение удобно переписать так:

$$l_x = W \left(\frac{G}{Q_n} - t_{cn} \right). \quad (4)$$

Для определения высоты волны при заданном Q_n можно пользоваться условиями неразрывности

$$Z = \frac{Q_n}{b \cdot W}. \quad (5)$$

НЕОБХОДИМЫЙ ПОЛЕЗНЫЙ ОБЪЕМ ВОДОХРАНИЛИЩА ПРИ ПОСТОЯННОМ РАСХОДЕ ПОПУСКА

При первом виде регулирования, когда полный цикл работы плотины должен совершиться в одни сутки, очевидно, необходимый полезный объем водохранилища будет равен:

$$G = 3600 t \cdot 1,1 Q_n - 3600 t \cdot 0,9 Q_6$$

или

$$G = 3600 t (1,1 Q_n - 0,9 Q_6), \quad (6)$$

где: t — возможная продолжительность попуска в часах и равное

$$t = 24 \frac{0,9 Q_6}{1,1 Q_n}; \quad (7)$$

$1,1 Q_n$ — попусковый секундный расход с 10% увеличением на потери;

$0,9 Q_6$ — бытовой секундный расход (приток в водохранилище), уменьшенный на 10% за счет потерь из водохранилища.

При периодическом регулировании могут быть два основных варианта определения полезного объема водохранилища:

а) когда продолжительность цикла (двое, трое и более суток) является величиной заданной. В этом случае задача сводится к первому виду регулирования, с той лишь разницей, что вместо 24 часов учитывают $24 \cdot n$ часов, где n — число суток цикла. Возможная продолжительность попуска в часах будет равна:

$$t = 24n \frac{0,9 Q_6}{1,1 Q_n}. \quad (8)$$

Что же касается полезного объема водохранилища, то он определится по той же формуле (6);

б) когда заданными величинами являются протяжение сплавного пути l , на котором должны быть обеспечены сплавные глубины и минимальное время стояния сплавных уровней t часов.

Для решения поставленной задачи составим следующее уравнение:

$$G = 1,1 Q_n \frac{l}{W} + 1,1 Q_n \cdot t_{\text{сн}} - 0,9 Q_o \left(t_{\text{сн}} + \frac{l}{W} \right), \quad (9)$$

где обозначения букв те же, что и выше.

Первый член правой части уравнения представляет собою необходимый объем воды, чтобы попуск дошел до створа на расстоянии l от плотины.

Второй член правой части уравнения представляет собою необходимый объем воды, чтобы в створе на расстоянии l иметь сплавные уровни в течение $t_{\text{сн}}$ часов.

Третий член уравнения — объем воды, притекающий в водохранилище за период времени $\left(t_{\text{сн}} + \frac{l}{W} \right)$, т. е. за период, в течение которого производится попуск.

Уравнение (9) после преобразования перепишем:

$$G = (1,1 Q_n - 0,9 Q_o) \left(\frac{l}{W} + t_{\text{сн}} \right). \quad (10)$$

По уравнению (10) определяется необходимый полезный объем водохранилища G , если заданы l и $t_{\text{сн}}$.

Время, потребное для производства одного пуска, будет слагаться из времени наполнения водохранилища и времени его сработки:

$$T = \frac{G}{0,9 Q_o} + \frac{G}{1,1 Q_n}. \quad (11)$$

Полезный объем водохранилища при сезонном регулировании должен определяться исходя из продолжительности периода, в течение которого необходимо осуществлять дополнительное питание.

ПРОТЯЖЕННОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПИТАНИЯ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ СТОЯНИЯ СПЛАВНЫХ ГЛУБИН ПРИ ПЕРЕМЕННОМ РАСХОДЕ ПОПУСКА

Попуск с переменным расходом ($Q_n \neq const$) получается тогда, когда открывается отверстие плотины и первоначальная ширина его сохраняется до полной сработки водохранилища. В этом случае вначале после открытия отверстия плотины имеет место наибольший расход пуска, а затем по мере сработки водохранилища расход пуска уменьшается.

Рассматривая вопрос о дальности распространения пуска при постепенно уменьшающемся его расходе, будем считать,

что объем воды, выпущенной из плотины в процессе своего перемещения, остается постоянным и равным G .

По мере продвижения объема волны, имевшей первоначальную длину l_0 , глубину z_0 и ширину b_0 , происходит ее расплывание. Оно осуществляется как в передней части волны за счет убегания фронта от гребня, так и хвостовой — за счет отставания хвоста от гребня. В процессе расплывания увеличивается длина волны и уменьшается средняя глубина ее.

При сохранении постоянства объема волны можно написать равенство:

$$l_0 \cdot z_0 \cdot b_0 = l z b_1, \quad (12)$$

где: l_0 — первоначальная длина волны после выхода всего объема воды C из водохранилища;

z_0 и b_0 — соответственно первоначальные глубина и ширина волны;

$l z b_1$ — длина, глубина и ширина волны в любой момент времени.

Обозначая скорость движения фронта волны W , первоначальную скорость потока до попуска V_0 и делая допущения, что $b_1 = b_0 = b$, можем написать уравнения, где: скорость распространения волны

$$W = \frac{dl}{dt} = \frac{d}{dz} \left(\frac{l_0 z_0}{z} \right) \frac{dz}{dt}, \quad (13)$$

изменение высоты волны в единицу времени

$$\frac{dz}{dt} = \frac{dz}{ds} \cdot \frac{ds}{dt}, \quad (14)$$

общая скорость передвижения фронта волны

$$\frac{ds}{dt} = W + V_0. \quad (15)$$

W здесь выразим полученной ранее формулой (13), имеющей вид:

$$W = \frac{3}{2} \eta C_0 \sqrt{(h_0 + z) i_0} + V_0. \quad (16)$$

В этой формуле C_0 — параметр сопротивления русла при начальных условиях (скоростной коэффициент до попуска); h_0 — первоначальная глубина воды в m (до попуска); z — возвышение гребня волны при попуске над первоначальным уровнем в m ; i_0 — первоначальный уклон свободной поверхности; η — коэффициент изменения сопротивлений русла и величины русловых и гидрав-

лических элементов при прохождении попуска по сравнению с начальными условиями принимается независимым от z .

$$\text{Значит, } \frac{ds}{dt} = V_0 + \frac{3}{2} \eta C_0 \sqrt{(h_0 + z) i_0}; \quad \frac{dz}{ds} = \frac{\frac{dz}{dt}}{\frac{ds}{dt}}$$

$$\frac{dz}{dt} = \frac{W}{\frac{d}{dz} \left(\frac{l_0 z_0}{z} \right)} = \frac{\frac{3}{2} \eta C_0 \sqrt{(h_0 + z) i_0}}{-\frac{l_0 z_0}{z}} = -\frac{3}{2} \frac{\eta C_0}{l_0 z_0} z^2 \sqrt{(h_0 + z) i_0};$$

$$\frac{dz}{ds} = -\frac{3}{2} \frac{\eta C_0}{l_0 z_0} \cdot \frac{z^2 \sqrt{(h_0 + z) i_0}}{V_0 + \frac{3}{2} \eta C_0 \sqrt{(h_0 + z) i_0}}. \quad (17)$$

Откуда:

$$ds = -\frac{2 l_0 z_0}{3 \eta C_0} \cdot \frac{v_0 + \frac{3}{2} \eta C_0 \sqrt{(h_0 + z) i_0}}{z^2 \sqrt{(h_0 + z) i_0}} dz. \quad (18)$$

Интегрируя это дифференциальное уравнение, получим:

$$S = -\frac{2 l_0 z_0}{3 \eta C_0} \int \frac{v_0 + \frac{3}{2} \eta C_0 \sqrt{(h_0 + z) i_0}}{z^2 \sqrt{(h_0 + z) i_0}} dz + C =$$

$$= -\frac{2 l_0 z_0}{3 \eta C_0} \left(\frac{v_0}{\sqrt{i_0}} \int \frac{dz}{z^2 \sqrt{h_0 + z}} + \frac{3}{2} \eta C_0 \int \frac{dz}{z^2} \right) + C. \quad (19)$$

Интеграл $\int \frac{dz}{z^2 \sqrt{h_0 + z}}$ найдем с помощью подстановки $h_0 + z = u^2$, тогда $0 + dz = 2udu$

$$\int \frac{dz}{z^2 \sqrt{h_0 + z}} = \int \frac{2udu}{(u^2 - h_0)^2 \cdot u} = 2 \int \frac{du}{(u^2 - h_0)^2}.$$

Для нахождения последнего интеграла разложим дробь $\frac{1}{(u^2 - h_0)^2}$ на простейшие

$$\frac{1}{(u^2 - h_0)^2} = \frac{1}{(u + \sqrt{h_0})(u - \sqrt{h_0})^2} = \frac{A}{(u + \sqrt{h_0})} + \frac{B}{u + \sqrt{h_0}} +$$

$$+ \frac{C}{(u + \sqrt{h_0})^2} + \frac{D}{u + \sqrt{h_0}}. \quad (20)$$

Приводя к общему знаменателю и преобразуя, составим систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} B + D &= 0; \\ A - \sqrt{h_0} B + C + \sqrt{h_0} D &= 0; \\ -2\sqrt{h_0} A - h_0 B + 2\sqrt{h_0} C - h_0 D &= 0; \\ h_0 A + h_0 \sqrt{h_0} B + h_0 C - h_0 \sqrt{h_0} D &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Решая эту систему, найдем:

$$A = \frac{1}{4h_0}; B = \frac{1}{4h_0\sqrt{h_0}}; C = \frac{1}{4h_0}; D = -\frac{1}{4h_0\sqrt{h_0}}.$$

После подстановки значений A, B, C и D в (19) получим:

$$\begin{aligned} \frac{1}{(u^2 - h_0)^2} &= \frac{1}{4h_0} \cdot \frac{1}{(u + \sqrt{h_0})^2} + \frac{1}{4h_0\sqrt{h_0}} \cdot \frac{1}{u + \sqrt{h_0}} + \\ &+ \frac{1}{4h_0} \cdot \frac{1}{(u - \sqrt{h_0})^2} - \frac{1}{4h_0\sqrt{h_0}} \cdot \frac{1}{u - \sqrt{h_0}}. \end{aligned} \quad (22)$$

Таким образом, искомым наш интеграл преобразуется:

$$\begin{aligned} \int \frac{dz}{z^2\sqrt{h_0+z}} &= 2 \int \frac{du}{(u^2 - h_0)^2} = 2 \frac{1}{4h_0} \left[\frac{du}{(u + \sqrt{h_0})^2} + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{\sqrt{h_0}} \int \frac{du}{u + \sqrt{h_0}} + \int \frac{du}{(u + \sqrt{h_0})^2} - \frac{1}{\sqrt{h_0}} \int \frac{du}{u - \sqrt{h_0}} \right] = \\ &= \frac{1}{2h_0} \left[-\frac{1}{u + \sqrt{h_0}} + \frac{1}{\sqrt{h_0}} \ln(u + \sqrt{h_0}) - \frac{1}{u - \sqrt{h_0}} - \right. \\ &- \left. \frac{1}{\sqrt{h_0}} \ln(u - \sqrt{h_0}) \right] = \frac{1}{2h_0} \left(-\frac{2u}{u^2 - h_0} - \frac{1}{\sqrt{h_0}} \ln \frac{u - \sqrt{h_0}}{u + \sqrt{h_0}} \right) = \\ &= -\frac{1}{2h_0} \left(\frac{2\sqrt{h_0+z}}{h_0+z-h_0} + \frac{1}{\sqrt{h_0}} \ln \frac{u - \sqrt{h_0}}{u + \sqrt{h_0}} \right) = -\frac{1}{2h_0} = \\ &= -\frac{1}{2h_0} \left(\frac{2\sqrt{h_0+z}}{z} + \frac{1}{\sqrt{h_0}} \ln \frac{\sqrt{h_0+z} - \sqrt{h_0}}{\sqrt{h_0+z} + \sqrt{h_0}} \right). \end{aligned} \quad (23)$$

Что касается интеграла $\int \frac{dz}{z^2}$, то он равен

$$\int \frac{dz}{z^2} = -\frac{1}{z}. \quad (24)$$

Следовательно,

$$S = -\frac{2l_0 Z_0}{3\eta C_0} \left[-\frac{v_0}{2h_0\sqrt{t_0}} \left(\frac{2\sqrt{h_0+z}}{z} + \frac{1}{\sqrt{h_0}} \ln \frac{\sqrt{h_0+z} - \sqrt{h_0}}{\sqrt{h_0+z} + \sqrt{h_0}} - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{3}{2} \eta C_0 \frac{1}{z} \right) \right] + C$$

или

$$S = \frac{l_0 z_0 v_0}{3\eta C_0 h_0 \sqrt{t_0}} \left(\frac{2\sqrt{h_0+z}}{z} + \frac{1}{\sqrt{h_0}} \ln \frac{\sqrt{h_0+z} - \sqrt{h_0}}{\sqrt{h_0+z} + \sqrt{h_0}} \right) + \\ + \frac{l_0 z_0}{z} + C. \quad (25)$$

Перепишем выражение (25) несколько иначе и определим значение произвольной постоянной интегрирования C . При этом исходим из граничных условий:

при $S = l_0$, $Z = Z_0$

$$\int = \frac{l_0 z_0 v_0}{3\eta c_0 h_0 \sqrt{i_0}} \left[\left(\frac{3\eta c_0 h_0 \sqrt{i_0}}{v_0} + 2\sqrt{h_0 + z} \right) \frac{1}{z} + \right. \\ \left. + \frac{1}{\sqrt{h_0}} l_n \frac{\sqrt{h_0 + z} - \sqrt{h_0}}{\sqrt{h_0 + z} + \sqrt{h_0}} \right] + C. \quad (26)$$

При указанных граничных условиях будет:

$$l_0 = \frac{l_0 z_0 v_0}{3\eta c_0 h_0 \sqrt{i_0}} \left[\left(\frac{3\eta c_0 h_0 \sqrt{i_0}}{v_0} + 2\sqrt{h_0 + z} \right) \frac{1}{z} + \right. \\ \left. + \frac{1}{\sqrt{h_0}} l_n \frac{\sqrt{h_0 + z} - \sqrt{h_0}}{\sqrt{h_0 + z} + \sqrt{h_0}} \right] + C; \quad (27)$$

$$C = l_0 - \frac{l_0 z_0 v_0}{3\eta c_0 h_0 \sqrt{i_0}} \left[\left(\frac{3\eta c_0 h_0 \sqrt{i_0}}{v_0} + 2\sqrt{h_0 + z} \right) \frac{1}{z_0} + \right. \\ \left. + \frac{1}{\sqrt{h_0}} l_n \frac{\sqrt{h_0 + z_0} - \sqrt{h_0}}{\sqrt{h_0 + z_0} + \sqrt{h_0}} \right]; \quad (28)$$

$$S = \frac{l_0 z_0 v_0}{3\eta c_0 h_0 \sqrt{i_0}} \left[\left(\frac{3\eta c_0 h_0 \sqrt{i_0}}{v_0} + 2\sqrt{h_0 + z} \right) \frac{1}{z_0} + \right. \\ \left. + \frac{1}{\sqrt{h_0}} l_n \frac{\sqrt{h_0 + z} - \sqrt{h_0}}{\sqrt{h_0 + z} + \sqrt{h_0}} \right] + l_0 - \frac{l_0 z_0 v_0}{3\eta c_0 h_0 \sqrt{i_0}} \left[\left(\frac{3\eta c_0 h_0 \sqrt{i_0}}{v_0} + \right. \right. \\ \left. \left. + 2\sqrt{h_0 + z} \right) \frac{1}{z_0} + \frac{1}{\sqrt{h_0}} l_n \frac{\sqrt{h_0 + z} - \sqrt{h_0}}{\sqrt{h_0 + z_0} + \sqrt{h_0}} \right]; \quad (29)$$

$$S = l_0 + \frac{l_0 z_0 v_0}{3\eta c_0 h_0 \sqrt{i_0}} \left[\left(\frac{3\eta c_0 h_0 \sqrt{i_0}}{v_0} + 2\sqrt{h_0 + z} \right) \frac{1}{z} - \right. \\ \left. - \left(\frac{3\eta c_0 h_0 \sqrt{i_0}}{v_0} + 2\sqrt{h_0 + z_0} \right) \frac{1}{z_0} + \frac{1}{\sqrt{h_0}} l_n \frac{\sqrt{h_0 + z} - \sqrt{h_0}}{\sqrt{h_0 + z} + \sqrt{h_0}} - \right. \\ \left. - \frac{1}{\sqrt{h_0}} l_n \frac{\sqrt{h_0 + z_0} - \sqrt{h_0}}{\sqrt{h_0 + z_0} + \sqrt{h_0}} \right]; \quad (30)$$

$$S = l_0 + \frac{l_0 z_0 v_0}{3\eta c_0 h_0 \sqrt{i_0}} \left[\left(\frac{3\eta c_0 h_0 \sqrt{i_0}}{v_0} + 2\sqrt{h_0 + z} \right) \frac{1}{z} - \right. \\ \left. - \left(\frac{3\eta c_0 h_0 \sqrt{i_0}}{v_0} + 2\sqrt{h_0 + z} \right) \frac{1}{z_0} + \right. \\ \left. + \frac{1}{\sqrt{h_0}} l_n \frac{(\sqrt{h_0 + z} - \sqrt{h_0})(\sqrt{h_0 + z} + \sqrt{h_0})}{(\sqrt{h_0 + z} + \sqrt{h_0})(\sqrt{h_0 + z_0} - \sqrt{h_0})} \right]. \quad (31)$$

Раскрывая скобки и производя сокращения, получим дальность распространения волны:

$$S = \frac{l_0 z_0}{z} + \frac{4l_0 z_0 v_0 \sqrt{h_0 + z}}{3\eta c_0 h_0 \sqrt{i_0} \cdot z} + \\ + \frac{l_0 z_0}{3\eta h_0} l_n \frac{(\sqrt{h_0 + z} - \sqrt{h_0})(\sqrt{h_0 + z_0} + \sqrt{h_0})}{(\sqrt{h_0 + z} + \sqrt{h_0})(\sqrt{h_0 + z_0} - \sqrt{h_0})}. \quad (32)$$

Входящая в уравнение величина Z представляет собою среднюю глубину волны (приведенную в продольном профиле к прямоугольнику), S — путь, пройденный лобовой частью волны от плотины (рис. 1).

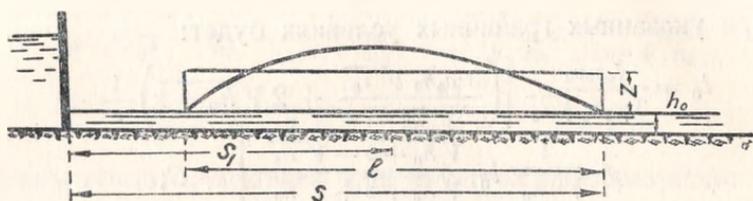


Рис. 1.

Следовательно, уравнение дает возможность определить S при заданном Z , или же Z при заданном S .

Третий член уравнения составляет незначительную величину по сравнению с другими двумя членами, которые при решении дают тысячи метров, а потому в целях упрощения расчетов считаем возможным им пренебречь.

Цифровое значение указанного члена уравнения зависит главным образом от соотношения $\frac{z}{z_0}$, причем практически эти соотношения могут быть равны от 1 (начальный момент движения волны, когда $z = z_0$) до $z_1 (0,1-0,2) z_0$ (когда в расчетном створе, находящемся на расстоянии l_x от плотины, в результате расплывания, высота волны составляет уже $0,2-0,1$ первоначальной волны).

В первом случае Z приближается к Z_0 (т. е. когда $\frac{z}{z_0} = 1$), рассматриваемый член уравнения дает значение, равное нулю, ибо

$$l_{im} l_n \frac{(\sqrt{h_0 + z} - \sqrt{h_0}) (\sqrt{h_0 + z_0} + \sqrt{h_0})}{(\sqrt{h_0 + z} + \sqrt{h_0}) (\sqrt{h_0 + z} + \sqrt{h_0})} = l_n 1 = 0$$

при $Z \rightarrow Z_0$.

Если же $Z \approx (0,2-0,1) Z_0$, то значение этого члена при $h_0 = 0,2-0,5$, что обычно бывает в практике лесосплава, составит десятки (и не более сотен) метров, что находится в пределах точности расчетов, отнесенных к натурным условиям каналов и рек.

Таким образом, уравнение получает вид:

$$S = \frac{l_0 z_0}{z} + \frac{4l_0 z_0 v_0 \sqrt{h_0 + z}}{3\gamma c_0 h_0 \sqrt{t_0 z}} \quad (33)$$

Однако нас, с точки зрения лесосплава, интересует не столько дальность распространения фронта волны, сколько той

точки ее, где имеется заданная средняя глубина z на фактической волне, а не на приведенной к прямоугольнику.

С некоторым запасом принимаем, что заданная глубина z находится в середине приведенной волны. Тогда расстояние до середины волны будет равно $s_1 = s - \frac{l}{2}$, где l — длина приведенной волны с средней высотой z

$$l = \frac{l_0 z_0}{z}.$$

Тогда

$$S_1 = \frac{1}{2} \frac{l_0 z_0}{z} + \frac{4l_0 z_0 v_0 \sqrt{h_0 + z}}{3\eta c_0 h_0 \sqrt{i_0 z}}. \quad (33')$$

Упрощая это уравнение и выражая значение первоначальной скорости v_0 формулой Шези, можно записать

$$S_1 = \frac{1}{2} l_0 \frac{z_0}{z} + M \frac{1}{\eta} \frac{\sqrt{h_0 + z}}{z}, \quad (34)$$

где: $M = \frac{4l_0 z_0}{3V\sqrt{h_0}}$, или, зная, что $l_0 z_0 b = G$ (объем сливной призмы)

$$M = \frac{4G}{3b\sqrt{h_0}}. \quad (35)$$

Формула (34) является расчетной, она служит для определения расстояния до того створа, где будет иметь место заданная глубина z .

Средняя первоначальная глубина волны z_0 с некоторым допущением может быть определена по формуле:

$$z_0 = \frac{Q_n' + Q_n''}{2} \cdot \frac{1}{bw}, \quad (36)$$

где: Q_n' — начальный расход попуска после открытия отверстия плотины;

Q_n'' — конечный расход попуска;

$\frac{Q_n' + Q_n''}{2}$ — средний расход попуска за период сработки водо-

хранилища;

b — средняя ширина потока при попуске.

При пользовании формулой (36) скорость волны W определяется по формуле (16), или ориентировочно эту величину можно принимать подобно движению лаводка примерно $W = \frac{3}{2} v_0$, где v_0 — первоначальная средняя скорость потока.

l_0 — средняя первоначальная длина волны может быть определена по формуле:

$$l_0 = \frac{G}{bz_0}. \quad (37)$$

При движении попуска с переменным расходом время стояния сплавных глубин на различных расстояниях от плотины будет различное.

Непосредственно ниже плотины оно будет соответствовать времени τ истечения заданного объема воды при переменном напоре.

При определении τ задача сводится к тому, чтобы определить время опорожнения водохранилища при постоянной ширине отверстия плотины b и переменных напорах в пределах от H_2 до H_1 .

Объем воды, вытекающий из водохранилища за время dt , равен ωdh , где ω — площадь зеркала воды в водохранилище на данный момент.

Этот же объем воды должен равняться расходу через отверстие плотины в тот же элемент времени

$$-\omega dh = \mu f \sqrt{2gh} \cdot dt,$$

где: μ — коэффициент расхода;

f — площадь сечения отверстия.

$$\text{Тогда } dt = -\frac{\omega dh}{\mu f \sqrt{2gh}}.$$

Делая допущение, что площадь сечения отверстия остается постоянной, время сработки водохранилища в пределах от H_2 до H_1 будет равно

$$\tau = \int_{H_1}^{H_2} \frac{\omega dh}{\mu f \sqrt{2gh}}. \quad (38)$$

Этот интеграл может быть легко вычислен по известной формуле Симпсона.

Однако формула (38) довольно громоздкая и получается она, как указано выше, при известных допущениях, снижающих точность решения, а потому мы считаем возможным время сработки водохранилища (или время стояния сплавных глубин непосредственно ниже плотины) при ориентировочных расчетах считать равным

$$\tau = \frac{2G}{Q_{II} + Q_{II}}. \quad (39)$$

По мере отдаления от плотины время стояния сплавных глубин постепенно увеличивается. Это происходит за счет расластывания волны, другими словами за счет снижения уровня волны и ее удлинения. Затем дальше время стояния сплавных глубин уменьшается.

Полезный объем водохранилища при заданном протяжении действия попуска и времени стояния сплавных уровней

можно считать по формуле 10, где расход попуска следует принимать как средний между начальным и конечным

$$G = \left(1,1 \frac{Q_{II} + Q_{II}''}{2} - 0,9Q_0 \right) \left(\frac{t}{w} + t_{cp} \right). \quad (40)$$

Время, потребное для производства одного попуска, складывается из времени наполнения водохранилища и времени его сработки, т. е.

$$\tau = \frac{G}{0,9 Q_0} + \frac{G}{Q_{II} + Q_{II}''}. \quad (41)$$

* * *

Предлагаемая классификация схем и видов регулирования стока наиболее близко отражает практические условия попускового лесосплава.

Методы расчета протяженности распространения дополнительного питания, продолжительности стояния сплавных глубин и определения объема водохранилища близко совпадают с данными практики. Это показали специальные исследования, произведенные нами в 1951—1954 гг. на реках Уборть и Уздянка и на каналах Крушинный и Бычок (БССР).

Определение длительности стояния сплавных уровней по длине регулируемого участка сплавного пути имеет большое практическое значение. В зависимости от длительности стояния необходимых сплавных глубин должна определяться и сплавопропускная способность реки или канала.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. А. Христианович. Неустановившееся движение в каналах и реках. Некоторые новые вопросы механики сплошной среды. Изд. АН СССР, 1938 г.
2. В. В. Ведерников. Волны попусков реальной жидкости, неустановившееся движение водного потока в открытом русле. Изд. АН СССР, 1947 г.
3. И. В. Егiazаров. Журнал «Известия Научно-исследовательского института гидротехники» № 21, 1937 г.
4. М. А. Великанов. Журнал «Гидротехническое строительство» № 2, 1931 г.
5. В. А. Архангельский. Инженерный сборник Института механики АН СССР.
6. А. Н. Рахманов. О неустановившемся движении в нижних и верхних бьефах речных гидроустановок. Известия ВНИИТ, том XXX, 1941 г. и том XXXI, 1946 г.
7. Boussinesq. Mem. pres. par dio. sao. àl Acad. Sci. de l'Institut de France, 23, 1877 г.
8. B. de Seind-Venant. Comptes rendus des séances de l'Academie des Sciences, Paris, 1878 г.

9. В. Г. Самсоненко и С. В. Титов. Регулирование стока сплавных рек водохранилищами, 1933 г.

10. С. Х. Будыка. Волны наполнения при регулировании стока малых рек, 1945 (кандидатская диссертация).

11. С. Х. Будыка. Освоение малых рек БССР для целей лесссплава. Белгосиздат, 1939 г.

12. С. Х. Будыка. Эффективнее использовать плотины на малых сплавных реках. Журнал «Лесная промышленность» № 6, 1951 г.

13. С. Х. Будыка. Лесные гидротехнические мелиорации. Раздел «Использование осушительных каналов для лесссплава». Изд. АН БССР, 1954 г.