

С. Х. Будыка, М. Г. Красник, М. К. Змушко

О ПОСТРОЕНИИ И ИСПОЛЬЗОВАНИИ КРИВЫХ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ СУТОЧНЫХ УРОВНЕЙ В РАСЧЕТАХ ПО ЛЕСОСПЛАВУ

В процессе заготовки и доставки древесины потребителям весьма важную роль играет транспорт древесины по водным артериям. Более половины лесоматериалов доставляется потребителям водным путем. Еще более возрастает роль лесосплава в связи с освоением лесных массивов в отдаленных районах.

Сплав леса по рекам усложняется в связи с непостоянством их уровня в течение навигационного периода. Задача состоит в том, чтобы на основании имеющихся гидрологических данных по рекам установить их сплавные характеристики, позволяющие планировать методы беспрепятственного и с наименьшими затратами лесосплава.

Наиболее полно в настоящее время используются стоковые характеристики рек, при этом основное внимание уделяется календарному ходу стока в навигационный период. По гидрографам ведется расчет лесопропускной способности рек, расчеты по регулированию стока и обоснованию проектируемых мероприятий на приречных складах [1].

Схемы гидрологических расчетов обычно предполагают:

1) наличие на реке поста с многолетними данными и графиков связи уровней опорного поста с расчетными створами;

2) возможность построения в расчетных створах кривых расходов и графиков связи ширины зеркала, средних скоростей с уровнями.

К недостаткам таких схем гидрологических расчетов можно отнести непреодолимые трудности по переносу расчетных гидрографов из створа в створ. Гидрографы отдельных лет представляют собой обычно неповторимую картину и вопросы обобщения календарного распределения стока в конкретные годы являются весьма сложными. При их рассмотрении приходится учитывать большое количество факторов, а влияние ряда из них в настоящее время выяснено не полностью. При исследовании вопросов внутригодового календарного распределения стока рассматривают поэтому укрупненные отрезки времени — сезоны, месяцы.

Более подробно разработаны методы сезонного распределения стока, которые можно пространственно обобщать в виде карт изолиний. Однако применение их в расчетах по лесосплаву в некоторых случаях приводит к грубым ошибкам. Переход к более коротким отрезкам времени обычно исключает пространственное обобщение, вследствие этого нет в настоящее время единой методики по установлению распределения стока по месяцам или по более коротким периодам для рек, не изученных или слабо изученных. Обычно в этих случаях прибегают к методу аналогий, который широко используется в водохозяйственных расчетах по лесосплаву. Однако применение этого метода для рек первоначального сплава связано с большими трудностями, так как фактические гидроло-

гические данные имеются только для крупных рек, в то время как реки, используемые для первоначального сплава относятся в основном к малым рекам.

В практике водохозяйственных расчетов по гидроэнергетике, водоснабжению и мелиорации широкое применение нашло статистическое распределение расходов в течение годового цикла, так называемые кривые обеспеченности суточных расходов. Эти кривые могут найти применение и в расчетах по лесосплаву, где требуется получить характеристики, связанные с продолжительностью стояния расходов или уровней за навигацию. В настоящее время применение их на лесосплаве очень ограничено.

Очертания ежегодных кривых продолжительности стояния уровней или расходов имеют много общего, но все же форма их весьма разнообразна и не отличается плавностью. Кроме того, связь между очертанием кривой и водностью года не является настолько тесной, чтобы можно было по водности судить о внутригодовом распределении стока. В связи с этим приходится отказываться от выбора ежегодных кривых продолжительности стояния уровней или расходов в качестве расчетной модели статистического распределения, а применять в качестве такой модели осредненные кривые, которые обычно называются кривыми обеспеченности.

Существует два метода построения осредненных кривых обеспеченности суточных уровней и расходов, предложенных Д. И. Кочериным. По первому способу осредняются уровни или расходы, имеющие одинаковую обеспеченность на годовых кривых. Во втором способе осредняются обеспеченности, полученные по годовым кривым для задаваемых уровней или расходов. Кривая обеспеченности, построенная по первому способу, обычно называется кривой среднегодовых характеристик обеспеченности, а построенная по второму способу — многолетней кривая обеспеченности. Если построить осредненный за многолетие календарный график хода уровней или расходов за годовой период и по нему получить кривую обеспеченности суточных уровней или расходов, она совпадает с кривой обеспеченности, полученной по первому способу.

При построении кривой обеспеченности по второму способу получим график, который является по существу многолетней кривой продолжительности стояния уровней или расходов, только приведенной к годовому базису. Эти кривые поддаются обобщению. Имеются методы построения кривых обеспеченности суточных расходов для неисследованных рек, предложенные В. А. Урываевым [2], И. М. Лившицем [3], В. Г. Андрияновым [4], Г. А. Алексеевым [5] и др. Они могут быть приняты в качестве расчетной статистической модели внутригодового распределения стока или уровней.

Кривые обеспеченности ежедневных уровней навигационного периода. Для лесосплава существенное значение имеет распределение стока и уровней не за весь годовой период, а за навигацию. Обобщение этих кривых, насколько известно, не проводилось. В 1967—1968 гг. нами были построены кривые обеспеченности ежедневных уровней по 30 водомерным постам. Основное количество постов обработано для рек БССР. Полученные кривые обеспеченности ежедневных уровней были осреднены по первому методу Д. И. Кочерина.

Таким образом, для дальнейшего анализа используются кривые среднегодовых характеристик обеспеченности (по терминологии

Д. И. Кочерина), которые будем называть средними кривыми обеспеченности. На рис. 1 приведены средние кривые обеспеченности ежедневных уровней за навигационный и годовой периоды для р. Березина у водомерного поста Борисов и для р. Припять у водомерного поста Мозырь.

Средние кривые навигационного и годового периодов, как видно из рисунка, не совпадают. В верхней части графика (обеспеченностью до 20—30%) навигационная кривая располагается выше годовой, а в нижней части значительно ниже ее не только для постов, которые показаны на рисунке, но и для большинства рассмотренных водотоков.

Для расчетов по лесосплаву существенное значение имеет нижняя часть кривой. Поэтому нельзя рекомендовать, как это часто практикуется, проводить расчеты по годовой кривой.

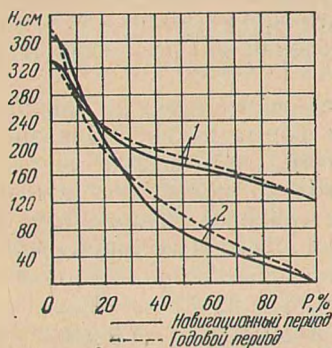


Рис. 1. Средние кривые обеспеченности ежедневных уровней: 1—р. Березина у в. п. Борисов; 2—р. Припять у в. п. Мозырь.

Для последующего обобщения средних кривых обеспеченности ежедневных уровней они должны быть построены в безразмерных координатах, имеющих общий базис. Таким базисом может быть максимальная или средняя амплитуда колебаний уровней. В качестве базиса можно также

принять уровень, соответствующий многолетнему расходу и отсчитываемый от физического нуля. Так как определение физического нуля связано с некоторыми трудностями, построение кривых осуществлялось для двух базисов— максимальной и средней амплитуда колеба-

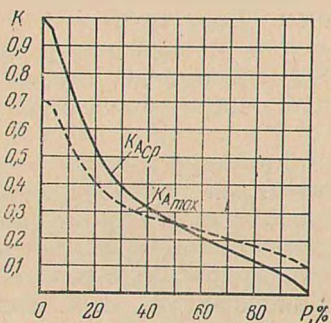


Рис. 2. Средняя кривая обеспеченности ежедневных уровней р. Березина у в. п. Борисов, построенная в безразмерных координатах.

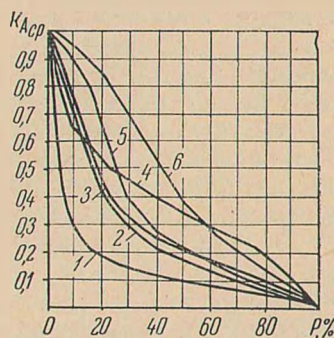


Рис. 3. Средние кривые обеспеченности ежедневных уровней: 1—р. Вихра у в. п. Куровичи; 2—р. Березина у в. п. Березино; 3—р. Березина у в. п. Бобруйск; 4—р. Дитва у в. п. Поречаны; 5—р. Днепр у в. п. Речица; 6—р. Ясельда у в. п. Сенин.

ния уровней. На рис. 2 показана средняя кривая обеспеченности ежедневных уровней р. Березины у водомерного поста Борисов, построенная в безразмерных координатах.

Из метода получения средней кривой обеспеченности следует, что выражение всех ordinат кривой в долях от амплитуды приводит к тому, что уровень нулевой обеспеченности будет равен единице, а уровень

100% обеспеченности равен нулю. На рис. 3 приведены шесть таких кривых.

Базис кривых должен легко находиться для не изученных в гидрологическом отношении рек в период лесосплавных изысканий или при рекогносцировочных обследованиях. Этому требованию отвечает максимальная амплитуда колебаний уровней, которая может быть восстановлена по опросу жителей или по некоторым признакам, а получить среднюю амплитуду колебаний весьма сложно. Поэтому нами принята в качестве базиса максимальная амплитуда колебаний уровней.

Проведенный анализ показал, что аналитически средние кривые обеспеченности могут быть представлены формулой вида

$$P = 10^{-aK_{A_{\max}}^b} \quad (1)$$

где $K_{A_{\max}}^b$ — ордината кривой, выраженная в долях от максимальной амплитуды колебаний уровней.

В логарифмическом виде формула (1) будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \lg P &= -aK_{A_{\max}}^b; \\ \lg(-\lg P) &= \lg a + b \lg K_{A_{\max}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Как видно из формулы (2), средняя кривая обеспеченности суточных уровней за навигационный период может быть представлена в виде прямой линии в логарифмических координатах.

На рис. 4 показаны некоторые кривые обеспеченности, наложенные на логарифмическую клетчатку (клетчатку Гудрича). Из рисунка видно, что все кривые имеют перелом. Это явление наблюдается для всех обработанных пунктов. Своеобразный характер статистического распределения ежедневных уровней, приведший к наличию перелома на кривой, обусловлен, по нашему мнению, двумя причинами: изменением живого сечения реки или изменением коэффициента шероховатости русла, а возможно, и их совместным воздействием.

Для исследуемых водпостов, как показал подробный анализ, перелом кривой обусловлен изменением коэффициента шероховатости русла. Абсцисса точки перелома для большинства исследуемых пунктов колеблется в пределах 20—30% и происходит на стыке паводочных и меженных уровней. Однако сравнение вычисленных коэффициентов C в формулу Шези показало, что перелом обусловлен резким изменением значения этого коэффициента. При этом большие значения соответствуют свободному руслу. Таким образом, мы приходим к выводу, что основную роль в переломе кривой играет изменение коэффициента шероховатости русла, связанного с его зарастаемостью.

Для использования кривой в расчетах по лесосплаву, как уже указывалось, необходимо в первую очередь иметь возможность построения ее нижней части, так как уровни обеспеченностью 20% обычно относятся к началу лесосплавного периода. Как нижнюю, так и верхнюю часть кривой можно аппроксимировать одним уравнением [1], но с разными параметрами.

Для построения кривых необходимо не только знать их уравнения, но и уметь определять параметры этих уравнений. Весьма важно опреде-

* Формула получена М. К. Змушко.

лять параметры для не исследованных в гидрологическом отношении рек. Методы определения параметров средней кривой ежедневных уровней навигационного периода будут изложены в последующей работе, здесь же рассмотрим методику использования этой кривой для расчетов по лесосплаву. В первую очередь рассмотрим использование кривой для определения сплавопропускной способности рек.

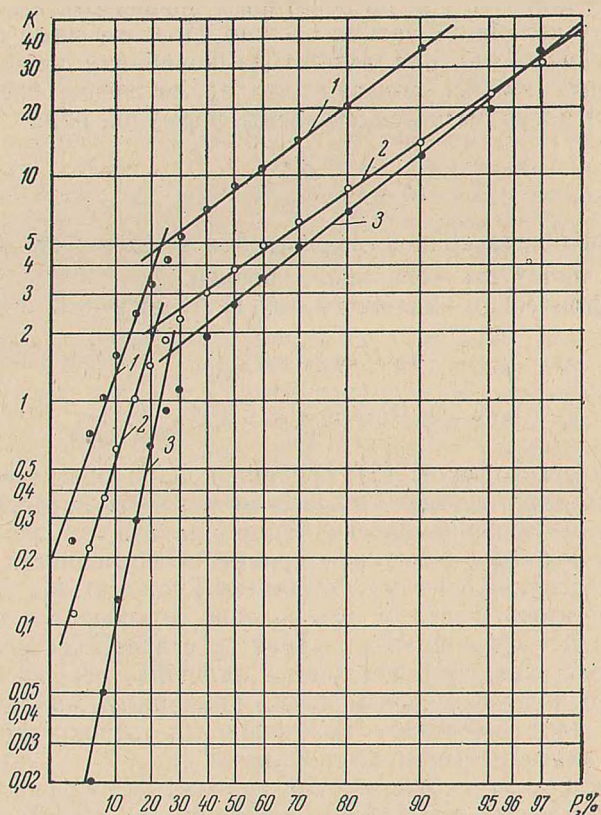


Рис. 4. Кривые обеспеченности, наложенные на логарифмическую клетчатку:

1— р. Дисна у в. п. Шарковщина; 2— р. Неман у в. п. Столбцы; 3— р. Птичь у в. п. Лучицы.

Кривая обеспеченности сплавопропускной способности. Согласно существующей методике [1], сплавопропускная способность реки в естественном состоянии при сплаве молью и в сплотивных единицах самосплавом определяется известной формулой

$$N = 3600 K_c v'_{\text{пов}} b_c \beta_c g t, \quad (3)$$

где величины K_c , β_c , g и t можно считать не связанными с гидрологическими характеристиками створа, и формулу (3) можно переписать так:

$$N = A b_c v'_{\text{пов}}, \quad (4)$$

где A объединяет вышеуказанные величины;

b_c — ширина сплавного хода реки в расчетном створе, $b_c = b \cdot \epsilon$;

- b — ширина реки по зеркалу в расчетном створе при рассматриваемом уровне;
 - ϵ — коэффициент использования ширины русла, который задается в функции от b ;
 - $v'_{\text{пов}}$ — средняя поверхностная скорость с поправкой на влияние ветра; обычно является функцией средней скорости в живом сечении.
- Таким образом, формулу (4) можно представить в виде

$$N = Af(H),$$

где H — заданный уровень.

При наличии в расчетном створе данных по измерениям уровней, графиков связи средней или поверхностной скорости с уровнями и графика изменения ширины зеркала реки в створе от уровней можно определить сплавопропускную способность реки, не прибегая к данным по расходам, используя формулу (4). При этом обычно вначале устанавливаются границы периода сплава в сплоточных единицах и молью, а затем, используя календарный ход уровней расчетного года и $b=f(H)$, $v=f(H)$, подсчитывают сплавопропускную способность реки по формуле (4).

В большинстве случаев данные по уровням за длительный период наблюдений в расчетных створах отсутствуют, что усложняет расчеты. Косвенными методами устанавливают связь $Q=f(H)$, $v=f(H)$ и $b=f(H)$, а для определения сплавопропускной способности используют гидрограф расчетного года, полученный в расчетном створе обычно методом аналогий. При наличии надежного графика связи между уровнями или расходами расчетного створа с постом с длительным периодом наблюдений сплавопропускная способность подсчитывается с их учетом. Расчетный год обычно принимается по навигационному стоку заданной обеспеченности.

Определяемая по расчетному году сплавопропускная способность реки не всегда отвечает заданной расчетной обеспеченности. Наиболее правильно определять сплавопропускную способность реки по кривой обеспеченности сплавопропускной способности, которая, однако, может быть получена только при наличии фактических гидрометрических данных в расчетном створе за длительный период наблюдений.

Для р. Лужесьянка у водомерного поста Борково нами была построена кривая обеспеченности сплавопропускной способности (рис. 5). Затем была определена сплавопропускная способность реки для расчетного года, выбранного по навигационному стоку 80% обеспеченности. Близкими годами по стоку оказались 1948, 1952, 1963. Полученные сплавопропускные способности в условных единицах следующие: в 1948 г. —

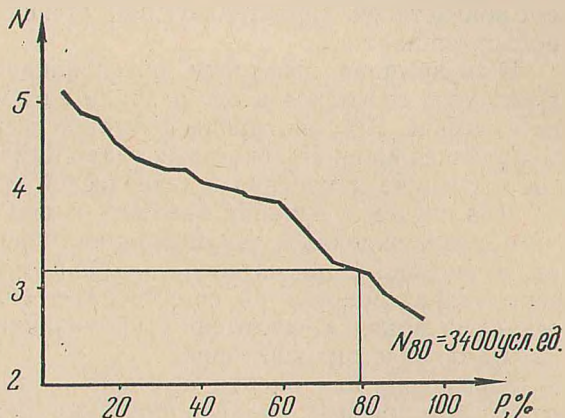


Рис. 5. Кривая обеспеченности сплавопропускной способности р. Лужесьянка у в. п. Борково ($C_v = 0,2$; $C_s = -0,62$).

$\frac{2210}{1100}$; 1952 — $\frac{2600}{1270}$; 1963 — $\frac{1690}{1120}$. Кривая обеспеченности сплавопропускной способности 2320.

Между сплавопропускной способностью расчетных лет и фактической имеется разница, особенно, если за расчетный год принять 1963. Значительно меньше сплавопропускная способность, подсчитанная с использованием в качестве исходных данных расходов реки. Эти цифры помещены выше в знаменателе. Еще большие расхождения получаются при использовании в качестве исходных материалов стоковые данные в створах с подвижным руслем, где связь между расходами и уровнями $Q = f(H)$ меняется из года в год.

Расчет сплавопропускной способности реки по средней кривой обеспеченности ежедневных уровней навигационного периода. Естественная сплавопропускная способность реки зависит не только от гидрологических характеристик водотока, но и от размеров сплаваемых единиц, дислокации пунктов выхода грузопотоков и целого ряда других технических показателей, характеризующих степень механизации и организации процесса сплава.

Весь комплекс факторов, обуславливающих естественную сплавопропускную способность, мы разбили на две группы: технические и гидрологические. Эти две группы факторов тесно связаны между собой. Доминирующее влияние некоторых гидрологических факторов вызывает соответствующие изменения в технической группе факторов.

Для изучения влияния каждого из факторов необходима схематизация в целом явления и допущение постоянства некоторой группы факторов. В частности, при изучении влияния гидрологических и морфометрических характеристик на естественную сплавопропускную способность реки нами принята некоторая схематизация явления и постоянство всей группы технических факторов.

Критерием для оценки возможной степени схематизации явления служит естественная сплавопропускная способность реки, определенная по кривой обеспеченности сплавопропускной способности. Из предыдущего следует, что естественная сплавопропускная способность реки в том или ином створе может быть определена следующими способами:

- 1) по гидрографу навигационного периода расчетного года и графикам $Q = f(H)$, $v = f(H)$, $b = f(H)$;
- 2) по календарному графику уровней навигационного периода расчетного года и кривыми $v = f(H)$, $b = f(H)$;
- 3) по кривой обеспеченности суточных расходов навигационного периода для расчетного года и графикам $Q = f(H)$, $v = f(H)$, $b = f(H)$;
- 4) по кривой обеспеченности суточных уровней навигационного периода для расчетного года и графикам $v = f(H)$ и $b = f(H)$.

Перечисленные методы имеют два существенных недостатка:

первый — несоответствие получаемой сплавопропускной способности ее действительному значению;

второй — необходимость переноса вдоль потока гидрографов, календарных графиков уровней или кривых обеспеченности суточных расходов и суточных уровней конкретных лет.

Несколько лучшие результаты для переноса по потоку можно получить при использовании в качестве эталона внутринавигационного распределения расходов или уровней их средние кривые обеспеченности. На рис. 3 кривые обеспеченности ежедневных уровней р. Березина у водомерного поста Березино ($F = 10\,800 \text{ км}^2$) и у водомерного поста Бо-

бруйск ($F = 20\ 200\ \text{км}^2$) почти совпадают и могут быть перенесены на значительном участке реки без изменения. Средние кривые обеспеченности уровней и расходов также легко переносятся при помощи зависимости (1).

Таким образом, использование средних кривых обеспеченности расходов и уровней позволяет избегать весьма больших затруднений, имеющих место при переносе гидрографов и графиков колебания уровней конкретных лет.

Однако использовать непосредственно средние кривые обеспеченности расходов и уровней для подсчета сплавопропускной способности нельзя, так как полученная сплавопропускная способность не будет отвечать нормативной обеспеченности. Средние кривые в данном случае служат только в качестве типового внутринавигационного распределения расходов или уровней.

Для определения естественной сплавопропускной способности заданной обеспеченности по средней кривой необходимо выбрать соответствующий базис кривой. В качестве базиса для средней кривой обеспеченности суточных расходов навигационного периода является, как известно, средненавигационный расход. Выбрав нужной обеспеченности средненавигационный расход, можно перестроить среднюю кривую, по которой подсчитывается сплавопропускная способность. Следует отметить, что в качестве эталонного распределения может быть принята средняя кривая обеспеченности суточных расходов навигационного периода, полученная путем осреднения не всех фактических кривых, а только кривых маловодных лет [6, 7].

Выбор базиса для средней кривой обеспеченности ежедневных уровней не столь очевиден. В качестве базиса может быть принята амплитуда, средний уровень и др. Для р. Лужесьянка у водомерного поста Борково была перестроена средняя кривая обеспеченности уровней в расчетную путем использования в качестве базиса амплитуды колебания уровней. Была построена кривая обеспеченности амплитуд. За расчетную принята амплитуда 80% обеспеченности. Средняя кривая обеспеченности суточных уровней навигационного периода построена в соответствии с принятой расчетной амплитудой, т. е. в качестве единицы (рис. 2 и 3) принята амплитуда $A_{80\%} = 1,6\ \text{м}$. По полученной кривой с использованием графиков $v = f(H)$ и $b = f(H)$ рассчитана сплавопропускная способность, она оказалась равной 2300 условным единицам, т. е. близкой к значению снятой с кривой обеспеченности естественной сплавопропускной способности.

В заключение следует указать, что если для расчетного створа можно получить расчетные кривые обеспеченности навигационных расходов и уровней, то отпадает необходимость иметь зависимость $v = f(H)$ для расчета сплавопропускной способности реки.

На рис. 6 дана схема расчета сплавопропускной способности с использованием кривых обеспеченности расходов и уровней навигационного периода. В этом случае для расчетного живого сечения строится график изменения площади живого сечения в функции от уровня (график 3). Задаваясь расходами и фиксируя их на кривой обеспеченности суточных расходов (график 1) навигационного периода, определяем соответствующие им уровни на кривой обеспеченности суточных уровней навигационного периода (график 2). По этим уровням находим площади живого сечения (график 3), а затем путем деления расходов на площади живых сечений определяем средние скорости и соответствующие им поверхно-

стные скорости (график 4). Имея график скорости и график изменения сплавной ширины в зависимости от уровня (график 5), подсчитываем по формуле (4) сплавпропускную способность реки и строим кривую обеспеченности (график 6). Площадь этого графика дает сплавпропускную способность расчетного навигационного периода.

При таком подсчете расчетной сплавпропускной способности отпадает необходимость выполнения весьма трудоемких работ по измерению скоростей в расчетном створе.

На основании проведенных исследований можно сделать выводы:

1. В водохозяйственных расчетах по лесосплаву в настоящее время наиболее полно используются характеристики внутригодового распределения расходов или уровней в их календарной последовательности и

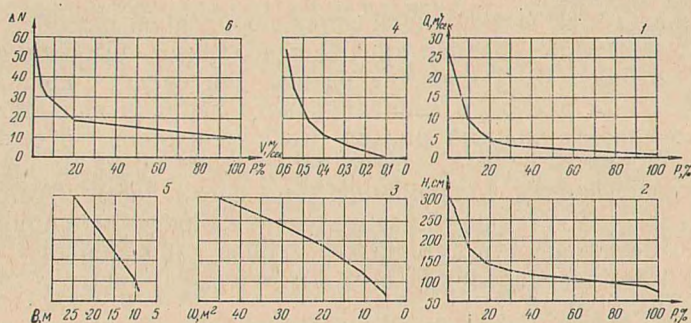


Рис. 6. Схема расчета сплавпропускной способности с использованием кривых обеспеченности расходов и уровней навигационного периода.

почти не используются кривые обеспеченности суточных расходов и ежедневных уровней. Однако кривые обеспеченности расходов и уровней имеют существенное преимущество при проведении водохозяйственных расчетов на реках слабоизученных и не изученных в гидрологическом отношении.

2. Получение естественной сплавпропускной способности реки по навигационному периоду конкретного года, имеющего навигационный сток заданной обеспеченности, не является репрезентативным. Естественная сплавпропускная способность реки не следует только за вариациями расхода, а является функцией нескольких варьируемых величин. Наиболее точно естественная сплавпропускная способность может быть определена из кривой обеспеченности сплавпропускной способности реки.

3. Для определения естественной сплавпропускной способности реки можно использовать средние кривые обеспеченности суточных расходов или ежедневных уровней в качестве типовых распределений внутринавигационного хода стока или уровней.

4. Для построения и обобщения средних кривых обеспеченности суточных уровней навигационного периода можно рекомендовать экспоненциальную зависимость (1).

5. Несмотря на разнообразие морфометрических особенностей естественных русел, перенос средних кривых обеспеченности расходов или уровней возможен на значительные расстояния вдоль реки.

6. Переход от средних кривых обеспеченности ежедневных уровней к расчетным должен осуществляться путем выбора по заданной обеспе-

ченности сплавопропускной способности величины амплитуды, т. е. размаха уровней.

7. Для широкого внедрения в водохозяйственные расчеты по лесосплаву кривых обеспеченности суточных расходов и ежедневных уровней необходимо их дальнейшее исследование, в особенности это относится к кривым обеспеченности суточных уровней.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технические указания по проектированию лесосплавных предприятий. Л., 1967.
2. В. А. Урываев. Обеспеченность расходов в году рек Европейской части СССР. Труды НИУ ГУГМС СССР, серия IV, вып. 2, 1941.
3. И. М. Лившиц. Внутригодовая обеспеченность расходов рек БССР. Минск, 1948.
4. В. Г. Андриянов. Гидрологические расчеты при проектировании малых и средних гидроэлектростанций. Л., 1957.
5. Г. А. Алексеев. Методика определения гидроэнергетических характеристик малых ГЭС. Труды ГГИ, вып. 9 (63). Л., 1948.
6. М. Г. Красник. Типизация уровневого режима р. Припять. Минск, 1953.
7. М. Г. Красник, И. М. Лившиц. Типизация календарных графиков средне-суточных уровней и расходов воды. Труды III гидрологического съезда, т. 11. Л., 1959.