

И.Ф. Карасев, С.Д. Винников, О.Е. Кучеренко

ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ ВОДЫ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ДВИЖЕНИИ РУСЛОВОГО ПОТОКА

I.F. Karasev, S.D. Vinnikov, O.E. Kucherenko

EXTRAPOLATION OF MAXIMUM WATER DISCHARGE IN THE UNSTEADY CHANNEL FLOW

Рассматривается вопрос оценки нестационарности потока и максимального расхода воды в реке при его неустановившемся движении

Ключевые слова: неустановившееся движение потока в реке, коэффициент нестационарности потока, экстраполяция расходов воды

The problem of assessment of unsteady flow and maximum discharge of water in the river during its unsteady motion is considered.

Key words: unsteady flow in the river, coefficient of unsteady flow, extrapolation of water discharge.

Важнейшей задачей, решаемой при эксплуатации гидротехнических сооружений и защите от затопления прибрежных территорий водотока, является оценка пропускной способности русла реки и экстраполяция расходов воды до их максимальных значений.

Наступление половодья и паводка изменяет и усложняет гидравлический режим речного потока. Характеристики его равномерного движения, достаточно надежно оцениваются как при измерениях, так и при расчетах. В условиях же половодий и паводков измерение расходов далеко не во всех случаях удается выполнить по всей амплитуде их изменения, а существующие расчетные методы не дают надежные результаты.

Именно этим определяется актуальность совершенствования методов установления пропускной способности русла и экстраполяции расходов воды в случае неустановившегося движения потока.

Основная трудность решения этой задачи заключается в неоднозначности связи гидравлических характеристик потока по фазам волны половодья (паводка) и прежде всего связи расходов с уровнями воды. Кривая расходов $Q(H)$ приобретает петлеобразную форму, разделяется на две ветви относительно однозначной кривой расходов воды при равномерном движении. Правая ветвь отражает возрастание расходов воды, левая — их убывание. Этот эффект порождается соответствующим изменением действующих уклонов водной поверхности: $I > i_p$ в фазе подъема и $I < i_p$ — в фазе спада волны половодья (паводка). Здесь i_p уклон при равномерном движении потока. В свою очередь эти фазы соответствуют приращению скоростей Δv : положительное в первом случае и отрицательное — во втором, так что действительная скорость движения оказывается соответственно равной (рис. 1):

$$v_{n,c} = v_p \pm \Delta v. \quad (1)$$

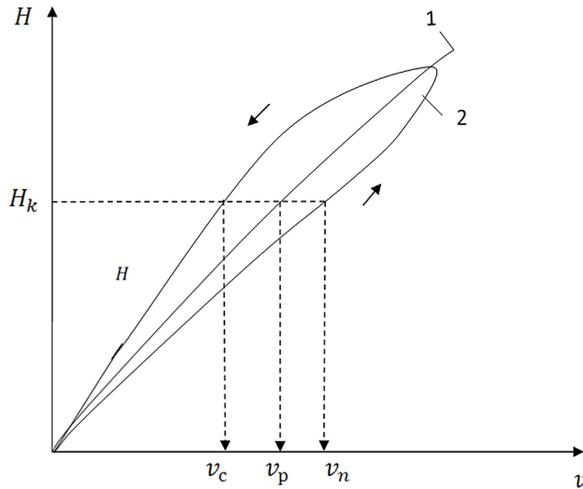


Рис. 1. Кривые средней скорости в гидростворе реки при равномерном (1) и неустановившемся (2) движениях воды; v_n и v_c – скорости потока при подъеме и спаде уровня воды в реке; v_p – скорость потока при его равномерном движении

Количественная оценка приращения Δv получена С. Д. Винниковым [1, 2] по данным наблюдений, выполненных Государственным гидрологическим институтом на р. Тверце в 1959 году [3]. Оказалось, что значение Δv зависит от разности уклонов водной поверхности $\Delta I = I - i_p$:

$$\Delta v = \alpha_{n,c} i_p \Delta I \tag{2}$$

с коэффициентом, имеющим размерность м/с, который принимает значение для ветви подъема $\alpha_n = 1,3 \times 10^7$ и для ветви спада $\alpha_c = 2,3 \times 10^7$.

Уклон равномерного потока i_p всегда известен, а уклон поверхности воды при неустановившемся движении не во всех случаях удастся измерить. Поэтому целесообразно представить разность уклонов ΔI в функции параметра нестационарности α_n , например, согласно уравнению Джонса [4, 5]:

$$\alpha_n = \frac{\Delta z}{i_p C \Delta t} = \frac{\Delta h}{i \Delta x},$$

где C_e – скорость добегания данного расхода; $\Delta z/\Delta t$ – изменение уровня воды во времени в створе; $\Delta h/\Delta x$ – изменение глубины потока в створах, расположенных на расстоянии Δx , и тогда будем иметь:

$$\Delta v = \alpha_{n,c} \alpha_n^2 i_p^2. \tag{3}$$

В зависимости от крутизны волны попуска (уклона водной поверхности) параметр нестационарности α_n может составлять $1 \div 4$, а скорость подъема уровня воды не превысит 10 см в минуту.

Соотношения (1) и (2) получены по данным тщательной обработки результатов уникальных по пространственно-временному разрешению исследований, проведенных ГГИ на р. Тверце [3], что служит основанием считать достаточно общими и достоверными.

Для расчетной практики особое значение имеет как неоднозначность кривых $Q(H)$, так и несовпадение моментов наступления максимумов расходов и уровней воды: сначала первого, затем второго. При этом, чем выше параметр нестационарности, тем в большей степени проявляется эта неоднозначность.

Эффект несинхронности максимумов уровней и расходов воды совершенно несовместим, в частности, с экстраполяцией последних по тенденции положения кривой расходов в зоне отсутствия измерений. Подобная графическая операция вообще недопустима, а еще в большей степени – для ветвей подъема и спада волны паводка. В настоящее время, в отличие от прошлых лет, все в большей мере используются редуцированные соотношения расходов воды и гидравлических элементов, вытекающие из уравнений движения, а не только их регрессионно-статистические связи. Конечно, уравнения регрессии приводят к достаточно достоверным локальным решениям, но в них далеко не всегда отражается физическая природа изучаемых явлений. В этом смысле вполне можно поддержать сформулированное в недавнее время понятие о нелокальной гидрологии [6], изучающей общие закономерности формирования стока и разрабатывающей методику использования их для решения локальных задач.

Эффект несовпадения максимумов расходов и уровней воды наблюдается и при естественных паводках, но вызывается он не динамическими приращениями скоростей течения, а деформациями русла, повышающими его гидравлические сопротивления. Так, в легкодеформируемом русле каждый раз после прохождения максимальных расходов воды наблюдается вал выноса наносов ниже по течению, который создает подпор уровня при уже убывающих расходах воды. Подобное, например, наблюдалось на р. Амударье в створе г. Керки в многоводном 1969 г. Максимальные расходы, полученные в результате экстраполяции «по тенденции» до наивысшего уровня были завышены на 30 %, что потребовало чрезвычайных мероприятий для предотвращения прорывов обвалования орошаемых земель в нижнем течении реки. Тревога оказалась напрасной и дорогостоящей!

В свое время экспедицией Нижневолгопроекта [7] была выполнена серия высокоточных измерений расходов воды р. Волги, в частности в створе г. Камышина. Кривая $Q(H)$ оказалась явно неоднозначной с расхождением ветвей подъема и спада до 20 %. Не остается сомнений в том, что полноводный поток создает новый, как правило, грядовой рельеф дна, изменяющий режим гидравлических сопротивлений.

Эффект несинхронности наступления максимумов расходов и уровней воды как по динамическим условиям движения потока, так и в результате резких изменений гидравлических сопротивлений целесообразно рассматривать в качестве определяющего признака нестационарности потока в широком смысле. Это тем более целесообразно, что такая точка зрения позволяет избежать те систематические погрешности, прецеденты которых были приведены выше.

Сложность общей картины течений в условиях смены фаз паводочной волны вынуждает обращаться к феноменологическим соотношениям, основанным на

принципах динамического подобия. Так, К.В. Гришанину [8], удалось представить нестационарный поток как движение в режиме так называемой кинематической волны, при котором связь расходов и уровней воды остается однозначной, а само течение может считаться квазиравномерным [9]. Получаемое при этом соотношение для расходов воды не включает уклонов водной поверхности и основывается только на геометрических характеристиках русла и малоизменяющемся параметре M , выражающем отношение ширины потока B к его глубине h и числу Фруда:

$$Q = \frac{h^2}{M^2} (gB)^{0.5}. \quad (4)$$

Это соотношение действительно для динамически равновесных русел в пойменных бровках. Отсюда, если известен расход воды Q_0 по данным измерений, то экстраполируемое значение максимального расхода Q_3 может быть получено непосредственно на основе его редукции по геометрическим характеристикам потока:

$$Q_3 = Q_0 \left(\frac{h_3}{h_0} \right)^2 \left(\frac{B_3}{B_0} \right)^{0.5}, \quad (5)$$

где h_0 и h_3 , B_0 и B_3 – глубины и ширины потока, соответствующие расходам Q_0 и Q_3 .

Достоверность получаемых решений подтверждена большим количеством проверочных расчетов.

Общепризнанной основой синтеза факторов, определяющих неустановившееся движение потока, является гидродинамическое уравнение Сен-Венана. Различные формы его конечно-разностной интерпретации позволяют упростить расчетные алгоритмы и получить столь же приемлемые результаты [9]. Непосредственно из этого уравнения с учетом предпосылок кинематической волны И.Ф. Карасевым [4] получено расчетное соотношение с более широкой вариативностью параметров по сравнению с (5):

$$Q_3 = Q_0 \left(\frac{\omega_3}{\omega_0} \right)^S, \quad (6)$$

где ω_0 и ω_3 – поперечные сечения потока, соответствующие расходам Q_0 и Q_3 .

Разложение правой части в ряд раскрывает физический смысл показателя степени S , а именно, он является безразмерной скоростью, выражающей отношение скорости движения волны по Седдону C_g к начальной скорости потока:

$$S = \frac{C_g}{v_0} = \frac{\Delta Q}{v_0 \Delta \omega}. \quad (7)$$

В общем случае для определения S предложен ряд теоретических и эмпирических формул, в которых v_0 является актуальной скоростью потока в любой его фазе. Одну из таких формул рекомендует М.С. Грушевский [9]. На ее основе для зоны максимальных уровней, учитывая соотношение скоростей

$$\frac{v_3}{v_0} = \left(\frac{h_3}{h_0} \right)^{2/3},$$

получим:

$$S = \left(\frac{h_3}{h_0} \right)^{2/3} \left(1 + \frac{2}{3} \phi \right), \quad (8)$$

где v_3 – экстраполируемое значение скорости; $\phi = h/h_{\max}$ – параметр формы поперечного сечения русла.

Подчеркнем: приведенные экстраполяционные зависимости действительны лишь для однозначной кривой расходов воды и неправомерно их использование применительно к ветвям подъема и спада паводковых (попускных) волн. Знание же однозначной кривой, позволяет получить соотношение для приращения скорости Δv соответствующей петлеобразной кривой $Q(H)$.

Изучая изменения характеристик потока по всей амплитуде отметок уровня воды приходим к выводу, что можно пренебречь динамическим приращением скорости Δv в том случае, если оно на порядок меньше скорости равномерного течения при том же наполнении русла:

$$|\Delta v| \leq 0,1; \quad v_p = 0,1 \frac{h^{2/3}}{n} i^{0,5}.$$

Из этого неравенства с учетом (3) устанавливаем критериальное соотношение параметра нестационарности:

$$\alpha_{\text{нк}} \leq \frac{0,077 h^{2/3}}{n i_p^{1,5} 10^7}, \quad (9)$$

где n – коэффициент шероховатости.

Для некоторых характерных данных реки, например: $h = 4,0$ м, $n = 0,025$, $i_p = 0,0002$ будем иметь $\alpha_{\text{нк}} = 0,27$, что соответствует значениям $\alpha_{\text{нк}}$, полученным по условиям минимизации погрешности экстраполяции расходов воды [4].

Продemonстрируем применение зависимостей (5) и (6) на примере р. Тверцы в гидростворе 2 (см. таблицу). Задача облегчается тем, что однозначная связь $Q(H)$ была получена по данным наблюдений при достаточно большом осредненном параметре нестационарности $\alpha_n = 2,0$. Результаты расчетов представлены относительно шагов экстраполяции $\alpha_3 = (\omega_3 - \omega_0)/\omega_0$. Как видим, при достаточно большом шаге экстраполяции $\alpha_3 = 0,53$ ее точность оказалась неожиданно высокой. Однако следующий шаг $\alpha_3 = 0,95$ явно неприемлем.

Варианты экстраполяции максимальных расходов воды р. Тверцы в гидростворе 2

Шаг экстраполяции	Q	ω	h	α	S	Метод кинематической волны		Метод регрессии по геометрическим элементам потока		
						$Q_3, \text{ м}^3/\text{с}$	$\delta Q, \%$	$Q_3, \text{ м}^3/\text{с}$	$\delta Q, \%$	
	Максимальные фактические значения									
	115	107	2,84	2,0	Исходные данные для экстраполяции		Результаты экстраполяции			
шаг 1	80,0	90,0	2,40	0,19	1,63	113	-1,7	106	-7,8	
шаг 2	60,0	75,0	1,97	0,42	1,84	123	7,3	115	0,1	
шаг 3	50,0	70,0	1,84	0,53	1,95	119	3,5	114	-0,5	
шаг 4	40,0	55,0	1,45	0,95	2,29	153	39,4	1,84	60,7	

Выводы

1. Представляется целесообразным по определяющему признаку несинхронности наступления максимумов расхода и уровня воды при распространении волны паводка или попуска на реках рассматривать как общенестационарное движение потока независимо от того, вызвано ли оно по динамическим условиям или в результате деформации русла.
2. Подобный подход позволит избежать грубейших систематических погрешностей в оценке экстраполяции максимальных расходов воды на реках.

Литература

1. Винников С.Д. Некоторые аспекты речной гидравлики // Ученые записки РГГМУ, 2007, № 4, с. 67-76.
2. Винников С.Д. Расчет уровней при неустановившемся движении воды в канале // Ученые записки РГГМУ, 2008, № 7, с. 36-41.
3. Исследование неустановившегося движения воды на реках Тверце и Ордеж. – Л.: Гидрометеиздат, 1961. – 288 с.
4. Карасев И.Ф. Речная гидрометрия и учет водных ресурсов. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 310 с.
5. Железняков Г.В. Пропускная способность русел каналов и рек. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 311 с.
6. Коваленко В.В. Нелокальная гидрология // РГГМУ, Санкт-Петербург, 2010 – 91 с.
7. Поляков Б.В. Гидрологические исследования нижней Волги. – М.–Л.: Госстройиздат, 1938. – 160 с.
8. Гришанин К.В. Динамика русловых потоков. – Л.: Гидрометеиздат, 1979 – 311 с.
9. Грушевский М.С. Неустановившееся движение воды в реках и каналах. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 288 с.
10. Розовский И.Л., Еременко Е.В., Базилевич В.А. Неустановившееся движение водного потока ниже гидроэлектростанции и его влияние на русло. – Киев.: Наука Думка, 1968. – 276 с.