

ДВИЖЕНИЕ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА ЖИДКОСТИ (ВОДА – НАНОСЫ) НА КРИВОЛИНЕЙНОМ УЧАСТКЕ РУСЛА

Г.И. Логинов

Рассматривается вопрос о закономерностях движения двухфазного потока жидкости (вода – наносы) на криволинейных участках открытых русел. Представлен вывод рекомендаций по определению более рациональных размеров при проектировании зарегулированных криволинейных русел водотоков.

Ключевые слова: жидкость; двухфазный поток; вода; наносы; русло.

Изучением закономерностей движения двухфазного потока жидкости (вода – наносы) на криволинейном участке русла занимались многие ученые, в их числе Н.С. Лелявский, Н.Е. Жуковский, М.Ф. Потапова, Н.Ф. Данелия, Г.Н. Замбахидзе, А.К. Ананян, В.Н. Гончаров и др. [1]. Особо необходимо отметить работы В.Ф. Талмазы и А.Н. Крошкина [2], которые посвящены морфометрическим гидравлическим характеристикам горных рек, вопросам их транспортирующей способности, а также движению воды на повороте открытого русла. Примечательно, что более точными и приемлемыми для применения на практике в горно-предгорной зо-

не являются разработки, выполненные нашими соотечественниками ещё в середине прошлого века. Основным направлением их исследований было определение закономерностей перераспределения скоростей потока и возможных деформаций русла, что имеет существенное значение при решении многих практических задач при водозаборе, проектировании защитных и регулировочных сооружений, криволинейных пескогравиеловок, отстойников и др. [2].

К примеру, В.Ф. Талмазой и А.Н. Крошкиным предложены зависимости для определения параметров подводящего криволинейного русла следующего вида.

Ширину устойчивого прямолинейного русла по урезу воды B , м, при расходах, равным руслоформирующим и более, и средних уклонах $i \geq 0,005$ рассчитывают по формуле [2]:

$$B = \frac{2,6}{i^{0,2}} \left(\frac{Q_{\text{дожде}}}{\sqrt{g}} \right)^{0,4}, \quad (1)$$

где i – уклон дна рассматриваемого участка русла по тальвегу; $Q_{\text{русл}}$ – руслоформирующий расход для водозаборных сооружений IV класса капитальности принимаем равным $Q_{1\%}$.

Для криволинейных зарегулированных русел радиус кривизны геометрической оси зарегулированного русла при среднем продольном уклоне дна $i = 0,005 \div 0,05$ определяются по формулам [2]:

$$R = \frac{3}{i^{0,5}} \left(\frac{Q_{\text{дожде}}}{\sqrt{g}} \right)^{0,4}. \quad (2)$$

Средняя глубина потока на прямолинейном участке, может быть определена по формуле [2]:

$$H = \frac{0,3}{i^{0,8}} \left(\frac{Q}{\sqrt{g}} \right)^{0,4}. \quad (3)$$

Длина криволинейного участка от начала до створа с наибольшей воронкой размыва рассчитывается по зависимости [2]:

$$L = \frac{5,6}{i^{0,3}} \left(\frac{Q_{\text{дожде}}}{\sqrt{g}} \right)^{0,4}. \quad (4)$$

Ширина зарегулированного русла на криволинейном участке с учетом рекомендаций Г.В. Соболина [3] принимается из соотношения:

$$B_k = \kappa B, \quad (5)$$

где κ – коэффициент, назначаемый в зависимости от уклона дна и руслоформирующего расхода реки: при $i = 0,005 - 0,01$ и $Q_{\text{русл}} = 100 - 250 \text{ м}^3/\text{с}$, $\kappa = 0,95 - 1,0$; при $i = 0,01 - 0,05$ и $Q = 25 - 100 \text{ м}^3/\text{с}$, $\kappa = 0,75 - 0,9$.

Максимальную глубину у вогнутого берега криволинейного русла по рекомендациям А.Н. Крошкина [4] рассчитывают из соотношения:

$$H_{\text{max}} = \varepsilon \cdot \varepsilon_1 \cdot H, \quad (6)$$

где ε – коэффициент, учитывающий относительную кривизну русла R/B , принимается по справочной литературе [4], ε_1 – коэффициент, учитывающий заложение напорного откоса дамбы, зарегулированного русла, принимается по литературе [4].

Строительная высота струенаправляющих дамб подводящего зарегулированного русла определяется по формуле:

$$H_{\text{сн}} = H_{\text{max}} + \Delta h + \Delta H_p, \quad (7)$$

где Δh – запас верха струенаправляющей дамбы над максимальным уровнем воды у вогнутого берега, $\Delta h = 0,5 \div 0,7$ м; ΔH_p – запас высоты низа струенаправляющей дамбы от дна воронки размыва у вогнутого берега, $\Delta H_p = 1,0 \div 1,2$ м.

Максимальный поперечный уклон свободной поверхности потока в зависимости от величины средней скорости и радиуса кривизны русла рассчитывается по формуле [5]:

$$i_n = \frac{V_{\text{русл}}^2}{R \cdot g}. \quad (8)$$

Угол от начала поворота до сечения с максимальным поперечным уклоном можно определить по формуле [2]:

$$\alpha = \arcsin 1 - \frac{B}{R} - 2 \arcsin \frac{B}{4R}, \quad (9)$$

где $V_{\text{русл}}$ – средняя скорость на подводящем к криволинейному участку русла при прохождении руслоформирующего расхода.

Эти эмпирические зависимости выведены на основании данных многократных многофакторных экспериментальных исследований [2–4] и являются основными при расчетах параметров гидротехнических сооружений с криволинейными в плане зарегулированными руслами.

Отношение эмпирических формул (1) и (2) для определения ширины русла B и радиуса кривизны R даёт зависимость вида:

$$\frac{B}{R} = 0,87i^{0,3}. \quad (10)$$

Приведенная формула определяет вид и значение соотношения основных параметров криволинейного русла друг относительно друга при изменении уклона дна реки и в дальнейшем может послужить в качестве величины, оценивающей перераспределение удельных расходов воды при прохождении ими криволинейного участка русла.

Анализ перераспределения скоростей потока и законов размещения глубин, приведённых в результатах опытов В.Ф. Талмазы и А.Н. Крошкина [2] говорит о необходимости изучения закономерности перераспределения удельных расходов и отдельных струй воды. Именно эти факторы, на наш взгляд, являются определяющими в формировании рельефа дна русла на поворотном участке. Именно возможный рельеф дна, и следовательно, глубина потока, как это видно из зависимостей (6–8) влияют на габаритные размеры элементов гидротехнических сооружений.

Ранее нами для определения угла сектора окружности с учетом зависимостей (2) и (4) было предложено соотношение для определения предельного значения угла Y от начала поворота русла до сечения с наибольшей воронкой размыва у вогнутого берега в виде [6]:

$$Y = E \cdot i^{0,15}, \quad (11)$$

где E – размерный коэффициент, равный 107° для участков рек с уклонами $i=0,007 \div 0,035$.

Производя вычисления по зависимости (11) можно заметить, что значение угла φ изменяется для указанного диапазона уклонов в пределах от 51 до 65 градусов.

Используя первый закон Ньютона (закон инерции) [7]: “При отсутствии действия других тел всякое тело сохраняет состояние покоя или прямолинейного равномерного движения”, можно предположить, что линии токов отдельных струй воды, подходящие по прямолинейному участку русла к криволинейному сохраняют свою прямолинейную траекторию вплоть до вогнутого берега (рис. 1). Накладываясь друг на друга двигаются по ходу движения вдоль берега до точки (А), они полностью суммируются. Эта точка соответствует пересечению вогнутого берега с прямой линией, проведенной в продолжение прямой береговой линии подводящего русла, переходящей в выпуклый берег. Как показали натурные наблюдения и предварительные модельные исследования при сложении линий токов образуется конусообразный горизонтальный валец круглого сечения, расширяющийся от начала кривизны к точке (А). Именно в этой

точке и происходит сложение всех линий токов, здесь и находится сечение с наибольшей глубиной у вогнутого берега.

Из треугольника AOD (см. рис. 1) с учетом значений R и B можно вывести функциональную зависимость для определения угла f вида:

$$f = \arccos \frac{2R - B}{2R + B}. \quad (12)$$

Рассчитав значения углов от начала кривизны до сечения с наибольшей воронкой размыва по формулам (11) и (12) с помощью специальной статистической программы (Microsoft Office Excel) была определена зависимость для расчета их разницы:

$$Y - f = 58,3 \frac{B}{R} + 29,36i + 9,9. \quad (13)$$

Такое расхождение значения углов вызвано недоучетом нами в приведенных выше рассуждениях, по крайней мере, двух факторов, влияющих в натуре на смещение токов воды вдоль вогнутого берега от точки (А) к точке (С). По данным наблюдений можно сделать вывод, что вновь подходящие удельные расходы воды со стороны прямолинейного участка русла, на криволинейном участке смещаются по причине:

- ↳ взаимодействия с расходами, уже движущимися вдоль вогнутого берега в сторону понижения дна русла;
- ↳ соприкосновения с донными токами, направленными от вогнутого берега в зону отложения наносов у выпуклого берега (рис. 1).

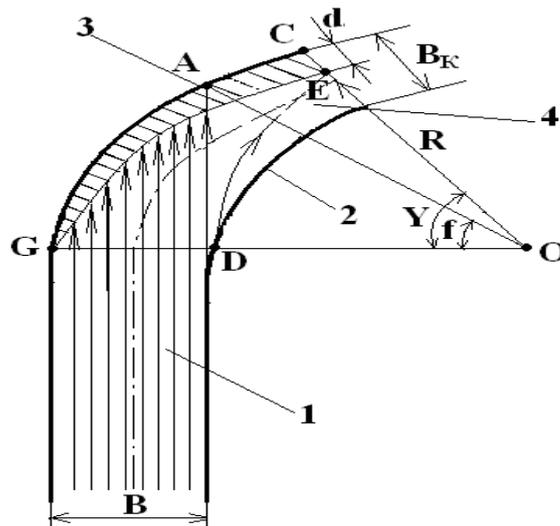


Рис. 1. Расчетная схема криволинейного участка русла. 1 – прямолинейный участок русла, 2 – выпуклый берег, 3 – вогнутый берег, 4 – зона отложений наносов.

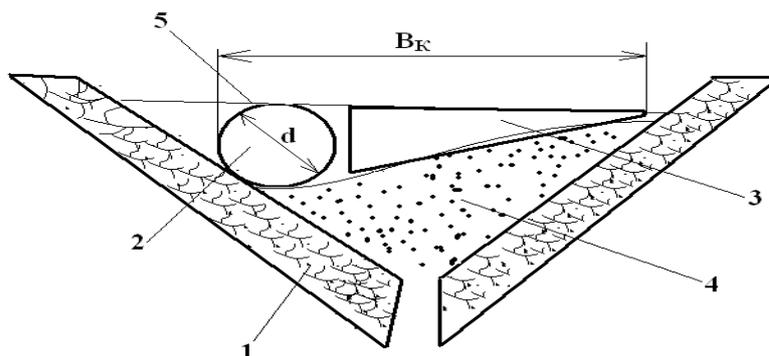


Рис. 2. Схема поперечного сечения криволинейного участка русла с определением предполагаемого местоположения объемов движущегося водного потока: 1 – струна направляющая дамбы вогнутого берега; 2 – сечение конусообразного потока; 3 – сечение потока движущегося к вогнутому берегу со стороны прямолинейного участка русла; 4 – отмытка русла; 5 – урез воды.

Можно предположить, что при сложении линий токов у вогнутого берега они образуют поток, круглая форма (в идеале) которого в поперечнике уже на этапе его формирования predetermined условием стремления объемов жидкости двигаться с наименьшими сопротивлениями в гидравлически наиболее выгодном сечении (рис. 2). За счет этого образуется конусообразный поток, расширяющийся по длине и заглубляющийся в размываемое дно русла при увеличении сечения за счет пополнения со стороны прямолинейного участка по ходу продвижения от начала криволинейного участка до сечения с наибольшей воронкой размыва.

Взаимодействие движущихся и суммирующихся объемов воды вызывает поперечную циркуляцию описанного конусообразного потока вдоль вогнутого берега. Это вызвано набеганием потока на вогнутый берег с образованием поперечного уклона поверхности воды с определенной направленностью поверхностных и донных струй на рассматриваемом участке. То есть вновь подходящие струи воды вступают во взаимодействие с конусообразным потоком, сдвигая его поверхность к вогнутому берегу. А разность уровней воды у вогнутого и выпуклого берегов вызывает отток придонных струй в виде восходящих потоков, с захватом и транспортировкой донных отложений от вогнутого берега в зону выноса наносов.

Все описанные выше перемещения объемов воды называются продольно поперечной циркуляцией, а конусообразный поток – циркуляционным вальцом, которые в гидротехнике применяются для отделения водного стока от стока

влекомых наносов при прохождении расчетных величин расходов.

Необходимо отметить, что сечение конусообразного циркуляционного потока вдоль выпуклого берега только в определенных условиях может иметь форму, близкую к окружности, обычно его форма напоминает горизонтально или вертикально развитый эллипс. Вертикально развитый эллипс соответствует повышенной величине размыва дна, а горизонтальный эллипс наблюдается при умеренном размыве. Это, как показал анализ натуральных наблюдений и результатов лабораторных опытов [2, 6], обусловлено значением скоростей водного потока, степенью размываемости грунта в основании потока или величиной фракций русловых отложений (отмытки русла), а также в случае устройства крепления откосов русла коэффициентом их заложения. На основании этого, можно заключить:

↪ Скорость струй воды, подходящих со стороны прямолинейного участка и вступающих во взаимодействие с поверхностными объемами конусообразного потока, что предопределяет величину их сдвига или набегания на вогнутый берег. Это сказывается на относительных повышениях уровней воды над циркуляционным вальцом и над зоной выноса наносов, что существенно влияет на интенсивность восходящих токов и вероятность размыва дна.

↪ Существенное влияние на форму размываемой поверхности оказывает размер фракций отмытки дна в зоне размыва русла и уровень их относительного залегания, которые имеют скорость трогания больше скорости перемещающегося потока.

↪ Коэффициент заложения береговых откосов зарегулированного русла определяет возможность и величину размещения части движущегося конусообразного циркуляционного вальца над креплениями, что также влияет на величину размыва при возможном гашении циркуляции.

Приведенный анализ подтверждает необходимость выполнения рекомендаций Г.В. Соболина представленных им в виде формулы (5), о плавном сужении криволинейных зарегулированных русел от начала кривизны до сечения с максимальной глубиной у вогнутого берега.

Это также подтверждает фотография, на которой представлен рельеф дна криволинейного зарегулированного русла, выполненного без сужения в концевой части, на физической модели водозаборного сооружения после проведения промывки верхнего бьефа паводковыми расходами (рис. 3). На рисунке видно, что у выпуклого берега остается значительный объем мелких фракций частиц песка, которые ранее составляли призму наносов, сформированную при меженных расходах моделируемого потока. Физическое моделирование проводилось по общепринятой методике при $F_r = \text{idem}$ без искажения масштаба. Масштаб модели водозаборного сооружения с подводным зарегулированным руслом был принят 1:25. Величина меженного расхода модели составляла $Q_{75\%} = 1,25 \text{ л}^3/\text{с}$, а паводкового расхода $Q_{1\%} = 19,8 \text{ л}^3/\text{с}$.



Рис. 3. Физическая модель водозаборного сооружения и криволинейного подводного русла после промывки верхнего бьефа паводковыми расходами.

Был сделан вывод, что сужение необходимо производить за счет смещения линии выпуклого берега к динамической оси русла.

Используя рекомендации, предложенные Г.В. Соболиным к расчету сужения русла по формуле (5), в виде функциональной зависимости, нами было получено отношение для определения ширины криволинейного участка русла:

$$B_K = (0,00072Q - 0,2 i + 1,5) \frac{Q^{0,4}}{i^{0,2}}. \quad (14)$$

При этом ось для построения линии кривизны выпуклого берега также смещалась в сторону относительно оси динамической оси русла, что усложняло процесс расчетов и проектирования гидроузлов, а так же их вынос в натуре. Но это компенсировалось возможностью сокращения общей ширины водосбросного фронта, сооружений, устраиваемых в конце криволинейного участка, уменьшением времени и увеличением эффективности их промывки.

Проведенные исследования позволят уточнить методику изучения криволинейных участков русел, с целью создания более точных математических моделей расчета и прогноза рельефа дна верхнего бьефа водозаборных сооружений на горных реках.

Литература

1. Гончаров В.Г. Основы динамики русловых потоков. – Л.: Гидрометеиздат, 1954.
2. Талмаза В.Ф., Крошкин А.Н. Гидроморфометрические характеристики горных рек. – Фрунзе, 1968. – 204 с.
3. Соболин Г.В. Водозаборные узлы для оросительных систем рек горно-предгорной зоны. – Фрунзе, 1990. – 241 с.
4. Крошкин А.Н. Руководство по проектированию средств стабилизации руслового процесса при низконапорном плотинном водозаборе из рек горно-предгорной зоны / Мин-во Мелиорации и водного хозяйства СССР // Всесоюзное научно-производственное объединение “Союзводавтоматика”. – Фрунзе, 1980. – 82 с.
5. Лавров Н.П. Расчёт и проектирование узла энергетических сооружений малой ГЭС. – Бишкек: КРСУ, 2000. – 47 с.
6. Логинов Г.И. Совершенствование водозаборных гидроузлов ирригационно-энергетического назначения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Бишкек, 2004. – 36 с.
7. Сахаров Д.И., Блудов М.И. Физика для техникумов. – М.: Наука, 1967. – 608 с.