

Логинов Г.И.

**ТЕОРИЯ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА КРИВОЛИНЕЙНЫХ УЧАСТКАХ
ЗАРЕГУЛИРОВАННЫХ РУСЕЛ ВОДОЗАБОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

G.I. Loginov

**THE THEORY OF FLUID MOTION ON CURVED SECTIONS OF REGULATED
RIVERBEDS INTAKES**

УДК:622.831

Приводится анализ известных результатов исследований по определению параметров криволинейных участков русел горных рек. Предлагается методика теоретического определения гидравлических характеристик потока жидкости на криволинейном участке русла перед элементами водозаборных сооружений.

The analysis is given of known results of studying the parameters of curvilinear sections of the river beds of the mountain rivers. Offers a method of theoretical determination of the hydraulic fluid flow characteristics of the curvilinear section of the riverbed of the elements of water intake structures.

Движение жидкости в естественных водотоках в основном происходит в виде формирования извилистых криволинейных участков с последовательно чередующимися меандрами. И только незначительная часть протяженности рек представляет собой прямолинейные участки. Это ведет к увеличению протяженности русел рек почти два раза.

Криволинейные зарегулированные русела на горных реках Средней Азии, в качестве наносозащитного элемента, впервые были применены при разработке водозаборных гидроузлов ферганского типа в 30-х годах XX века. Их эксплуатация показала, что криволинейное подводящее русло при водозаборе является эффективной ступенью борьбы с наносами в период прохождения паводков [1]. Параметры кривизны подводящих зарегулированных русел увязывались с величинами руслоформирующих расходов рек [1, 2, 3].

Изучению движения потока воды, содержащего наносы, на криволинейных участках русел посвящали работы многие ученые Европы: Дюбуа, Сен-Винан, Нави, Буссинек, Прус-Часинский, России и бывшего Советского Союза: Н.Е Жуковского, Н.С. Лелявского, А.Я Миловича, М.А., И.Л. Розовского, А.М. Дементьева, М.В. Потапова А.В. Караушева, В.Н. Гончарова, Н.Ф. Данелия, Г.И. Замбахидзе, В.Ф. Талмазы, Н.А. Крошкина [3, 4].

При движении на криволинейных участках русел рек к основному продольному движению добавляется еще поперечное циркуляционное течение, вызванное перераспределением удельных расходов воды. Сложность происходящих явлений до последнего времени не позволила решить поставленную проблему в целом и разработать теоретически обоснованную, практически проверенную

методику расчета движения двухфазного потока жидкости (вода - наносы) на излучинах рек [3]. На наш взгляд, этому способствует и тот факт, что на сегодняшний день нет однозначного качественного представления о закономерностях движения, тем более ставятся под сомнения многочисленные локальные количественные решения.

Существует три авторитетных мнения о причинах возникновения поперечной циркуляции на криволинейных участках русел рек [4]:

1) по мнению Буссинеска, Н.Е. Жуковского, М.А. Великанова в образовании восходящих и нисходящих вторичных течений на криволинейных участках участвуют вихревые силы;

2) М.А. Дементьев, А.К. Ананян, И.Л. Розовский, М.В. Потапов, Н.Ф. Данелия, М.П. Кожевников причинами образования радиальных вторичных течений считали инерционную силу – центробежную, образующую радиальные вторичные течения.

3) А.Я. Милович в своих трудах определяет, в качестве причины поперечных течений, разность давления в поперечных сечениях криволинейных участков русел.

На наш взгляд, совместное рассмотрение второй и третьей причин определяет предпосылки для качественного и количественного решения задачи. Современные средства проведения математического моделирования гидравлических процессов определяют возможность применения численных методов в решении задач такого характера.

По данным лабораторных исследований, жесткого прямоугольного русла (с неразмываемым дном), проведенных В.Ф. Талмазой, А.Н. Крошкиным [5] угол α от начала поворота до створа с максимальным поперечным уклоном рекомендуется определять по формуле [5]:

$$\alpha = \arccos \frac{2 \frac{R_{\text{ед}}}{B} + 1}{2 \left(\frac{R_{\text{ед}}}{B} + 1 \right)} - 2 \arcsin \frac{1}{4 \left(\frac{R_{\text{ед}}}{B} + 1 \right)}, \quad (1)$$

Ниже этого сечения значение поперечного уклона потока уменьшается и остается постоянным вплоть до выхода потока из поворота.

В.Ф. Талмаза и А.Н. Крошкин проанализировав ряд известных формул для определения максимального поперечного уклона водной поверхности на повороте русла, представили следующий

упрощенный вид зависимости для определения его величины [5]:

$$J_I = 0,85 \frac{v \sqrt{h}}{R_{\epsilon\theta}}, \quad (2)$$

Результаты исследований криволинейный участок русла с размываемым дном свидетель-

ствуют, о кардинальном их отличии от результатов, полученных на участке жесткого русла. Длина кривой подпора перед поворотом увеличивается, а сечение с максимальным уклоном смещается вниз по течению и размещается над воронкой максимального размыва дна (Рисунок 1) [5].

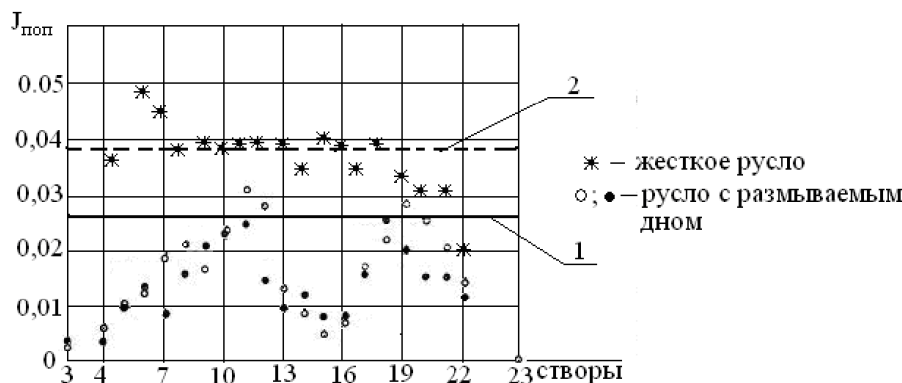


Рисунок 1 – Сопоставление измеренных значений поперечного уклона поверхности воды на криволинейном участке с расчетными значениями максимальных уклонов: 1 – значение поперечного уклона, рассчитанное по формуле (2) для условий размываемого дна при средне скорости в подводящем русле $v=0,68$ м/с и $Fr=0,99$; 2 - значение поперечного уклона, рассчитанное по формуле (2) для условий жесткого русла при средне скорости воды $v=0,84$ м/с и $Fr=1,06$.

Трансформация значений поперечного уклона потока по длине криволинейного участка происходит по функции с первоначальным увеличением значений и постепенным его уменьшением к углу закругления от 110 до 120 градусов. Затем вновь происходит рост значений поперечных уклонов вплоть до максимальных значений.

Как свидетельствуют результаты исследований (Рисунок 2) [5] для определения значений максимального уклона на участке криволинейного русла с размываемым дном, может быть использована зависимость (2).

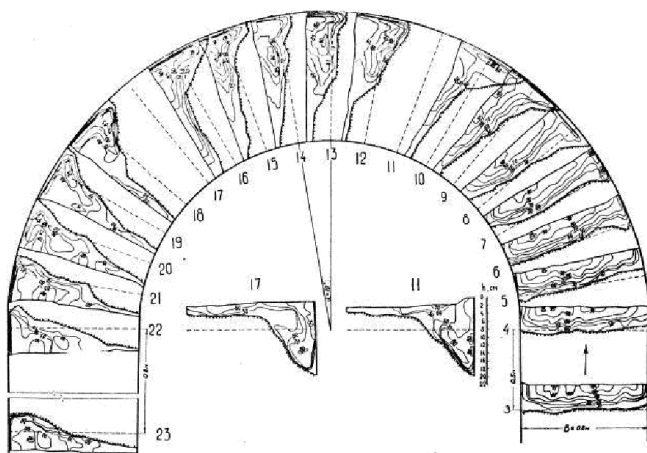


Рисунок 2 – Распределение продольных составляющих скоростей на повороте русла с размываемым дном.

Анализ плана изменения глубин и эпюр перераспределения скоростей потока, приведённых на рисунках 1 и 2 [5], определяет выводы о закономерности в направленности отдельных струй воды на участке криволинейного русла с поворотом русла на 180 градусов [6]:

- под действием разности давлений (уровней воды) у вогнутого и выпуклого берегов и увеличения глубин возникает движущая объемная сила потока, под действием которой образуются придонные токи, которые направлены в зону пониженного давления, в направлении транспорта влекомых наносов;

- при увеличении величин поперечного уклона потока до максимальных значений движущая объемная сила возрастает до критической величины, при которой основная масса воды отходит от вогнутого берега в сторону геометрической оси русла, что вызывает уменьшение поперечного уклона поверхности потока;

- следуя по течению, ниже угла закругления 90 градусов поток под действием силы тяжести и в малой степени силы инерции поступательного движения (так как объемы воды на вышележащем участке не достигают первоначального равномерного перераспределения по ширине) набегает на вогнутый берег, вновь формируя максимальный поперечный уклон потока и воронку размыва;

- возникновение второй воронки размыва вторично вызывает повышение движущей объемной силы потока, которая создает донные токи, направленные к центру кривизны. Возникновение донных

токов уменьшает интенсивность размыва дна и значения поперечного уклона потока на ниже лежащих участках. При этом, движущая объемная сила потока вновь определяет смещение основных объемов воды в сторону геометрической оси русла.

Сопоставление графических зависимостей изменения поперечного уклона потока на криволинейных участках русла с размываемым и не размываемым дном (см. рисунок 1) определяет заключение, что основным отличием является образование зон размыва и относительное выравнивание уровне воды в поперечном сечении на центральном участке кривизны. Это на наш взгляд, связано с увеличением глубин, которые увеличивают объемную силу потока, действующую в поперечном сечении.

В продолжении анализа нами была определена центростремительная сила (движущей силы потока возникающей при возникновении поперечного уклона), уравнивающую центробежную силу ($F_{тяж} = F_{ц.б}$).

Рассматривая движения объемов жидкости в открытых руслах (Рисунок 3) [61] можно сделать вывод, что, находясь над наклонным дном водотока, компоненты, которые определяют движущую силу потока, могут быть записаны в виде:

$$\left. \begin{aligned} G_x &= \rho dx dy dz g i; \\ G_z &= \rho dx dy dz \left(-g \sqrt{1-i^2} \right); \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где ρ - плотность жидкости;

dx, dy, dz - стороны параллелепипеда рассматриваемого объема воды;

i - уклон дна русла;

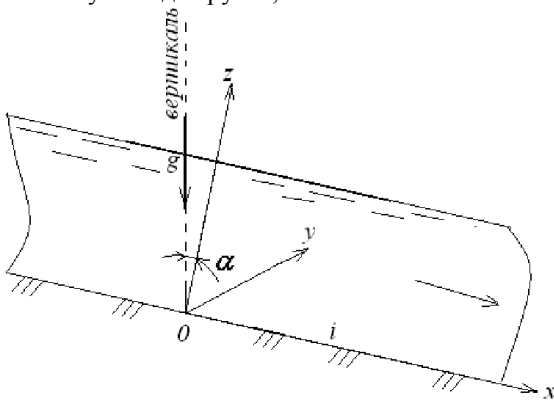


Рисунок 3 – Система координат руслового потока: α - угол наклона координатных плоскостей к горизонту $\sin \alpha = i$.

При условии движения водного потока параллельно плоскости координат x, z , значение проекции действующей силы $G_y = 0$.

Из системы (3) следует, что проекция массовой

силы на ось x определяет объемную движущую силу жидкости, которая для потока жидкости может быть определена в виде формулы:

$$F'_{тяж} = \rho Q dt g i, \quad (4)$$

где Q - расход потока, проходящего по рассматриваемому участку русла за время dt .

Проекция массовой силы объемов воды на ось z проявляется в виде напряжений на ограничивающих поверхностях потока, которые будут равны:

$$F_{nan} = \rho Q dt \left(-g \sqrt{1-i^2} \right), \quad (5)$$

Учитывая, что основная движущая сила жидкости возникает от уклона поверхности потока, уравнение объемной движущей силы воды действующей в радиальном направлении, на криволинейном участке, может быть записано в виде:

$$F'_{тяж} = \rho Q dt g J_{non}, \quad (6)$$

J_{non} - поперечный уклон поверхности потока.

При этом определяется равенство движущей силы водного потока и центробежной силы возникающей на криволинейном участке русла, которое выражается в виде уравнения:

$$\rho g Q dt J_{non} = \rho Q dt \frac{v^2}{R_{кр}}, \quad (7)$$

Отсюда следует выражение:

$$g J_{non} = \frac{v^2}{R_{кр}} \rightarrow J_{non} = \frac{v^2}{g R_{кр}}, \quad (8)$$

Но факт возникновения донных токов на криволинейном участке, от вогнутого берега к выпуклому берегу, нарушает представленное равенство сил и вызывает необходимость рассмотрения более сложной расчетной схемы с применением более широкого спектра расчетных составляющих.

Параметры регуляционных сооружений криволинейных зарегулированных русел водозаборных гидроузлов из горных рек зависят от глубины воронки размыва и ее относительного размещения. Как свидетельствуют результаты исследований многих авторов [2, 3, 4, 5], наибольшие глубины у вогнутого берега располагаются за сбойными зонами потока, где поперечные донные скорости достигают наибольших значений. Это обеспечивает защиту от наносов отводящих каналов, которые рекомендуется размещать на вогнутом берегу в зоне максимального размыва дна.

В результате лабораторных и натурных исследований водозаборных гидроузлов ферганского типа А.П. Ушаков, В.Н. Шолохов, И.Я. Якштас [5] пришли к выводу, что наибольшая глубина воронки размыва, совпадающая с рациональным распо-

жением водоприемного оголовка, размещается от входного сечения криволинейного участка на расстоянии [5]:

$$L_{кр} = \frac{5,6}{i^{0,35}} \left(\frac{Q}{\sqrt{g}} \right)^{0,4}, \quad (9)$$

При этом рациональный радиус закругления оси русла определяется по зависимости [5]:

$$R_{кр} = \frac{3}{i^{0,5}} \left(\frac{Q}{\sqrt{g}} \right)^{0,4}, \quad (10)$$

Учитывая зависимости (9 и 10) с учетом уравнения длины окружности может быть определена зависимость для расчета угла размещения водоприемного оголовка водозаборного сооружения от входного сечения криволинейного участка [6]:

$$\varphi = \frac{360L_{кр}}{2\pi R_{кр}} = 107i^{0,15}, \quad (11)$$

Эта зависимость может быть использована, как и формулы, определяющие ее вид, при уклонах дна подводящего русла i изменяющихся в диапазоне 0,005 до 0,05. Производя вычисления по зависимости (11), значение угла φ изменяется для указанного диапазона уклонов в пределах от 48 до 68 градусов. Это согласуется с известными рекомендациями [2] в которых угол кривизны зарегулированных подводящих русел водозаборных сооружений на горных реках рекомендуется принимать в пределах от 45 до 70 градусов.

Рассмотрим плановые размеры криволинейного подводящего русла водозаборного гидроузла с размещение элементов водного потока на примере расчетной схемы приведенной на рисунке 4 [6]. При этом условно используем начальный участок криволинейного русла, приведенный на рисунках 2 до створа возникновения первой воронкой размыва.

Разность углов φ и f может быть определена по формуле [6]:

$$\varphi - f = 58,3 \frac{B}{R} + 29,36i + 9,9, \quad (12)$$

С целью перехода от качественного описания к количественным характеристикам ниже приведем модель, в первом приближении описывающую происходящие гидравлические процессы на участке криволинейного русла с размываемым дном.

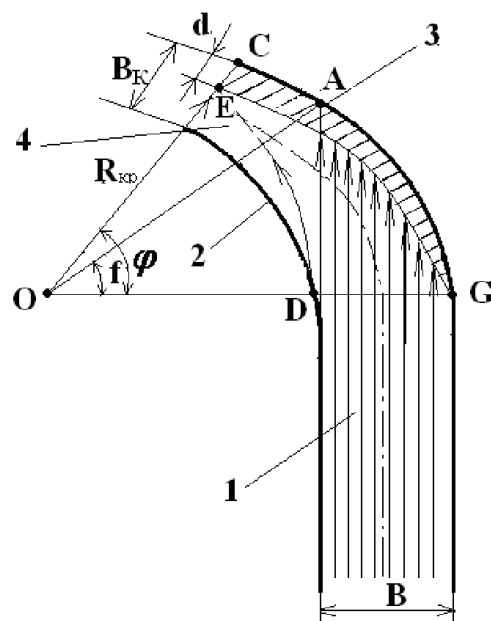


Рисунок 4 - Расчетная схема криволинейного участка русла водозаборного гидроузла. 1-прямолинейный участок русла, 2-выпуклый берег, 3-вогнутый берег, 4-зона отложений наносов.

Допустим, что величины удельных расходов приходящихся на единицу длины вогнутого берега по всей длине от точки G до точки C будут постоянными (см. Рисунок 4):

$$q_{воз} = \frac{Q_P}{L_{кр}} = const, \quad (13)$$

Тогда значение расхода воды, поступающего в конусообразный поток образующийся вдоль вогнутого берега в i -м сечении может быть определено по формуле:

$$Q_{bi} = q_{воз} L_{кри} - Q_{дони} = Q_P \frac{\varphi_i}{\varphi} - Q_{дони}, \quad (14)$$

где φ_i - угол между входным поперечным сечением криволинейного участка и рассматриваемым i -м поперечным сечением;

$Q_{дони}$ - расход донных токов воды, отделяющихся от конусообразного потока от его начала до рассматриваемого сечения. Допустим, что его величина является переменной, зависящей от величины движущей силы, возникающей при увеличении глубин в конусообразном вальце и поперечного уклона поверхности потока, может быть определена с помощью уравнения Шези:

$$Q_{дони} = \int_0^{L_{кри}} \omega_i C \sqrt{R_i \Delta J} \times dl, \quad (15)$$

ω_i - площадь поперечного сечения придонного потока отделяющегося от конусообразного вальца в i - м сечении (конусообразный валец образуется вдоль вогнутого берега):

$$\omega_i = k_i dl, \quad (16)$$

где k_i - вертикальный размер донного потока в рассматриваемых сечениях. На основе анализа результатов лабораторных исследований Г.Н. Замбахидзе [4] и В.Ф. Талмазы, А.Н. Крошкина [5] нами было сделано заключение, что его величина составляет около 30% глубины водного потока у вогнутого берега;

R_i - расчетная величина гидравлического радиуса в рассматриваемом сечении, с учетом рекомендаций [4] его значение примем равным $R_i = d_i / 4$, здесь d_i - диаметр конусообразного вальца в рассматриваемом сечении на предварительном этапе может быть определен по формуле:

$$d_i = \sqrt{\frac{4 \times Q_{bi}}{\pi \times v}}, \quad (17)$$

v - средняя скорость водного потока в конусообразном вальце;

\tilde{N} - коэффициент Шези для движения придонных токов;

ΔJ - приращение уклона свободной поверхности в результате суммирования центробежной силы и силы инерции при набегании потока на

вогнутый берег. Его величина предварительно может быть определена в результате разности значений уклонов рассчитанных с использованием уравнений (2) и (8).

Представленная методика определения гидравлических характеристик водного потока на криволинейных участках русел малых горных рек может быть использована в ходе математического планирования экспериментов по определению гидравлических характеристик потока и рациональных параметров зарегулированных подводящих русел низконапорных плотинных сооружений.

Литература:

1. Ушаков А.П., Шолохов Н.В., Якштас И.А. Водозаборные узлы Ферганского типа. Институт водных проблем и гидротехники. Изд. АН Уз. ССР.- Ташкент, 1962. 128 с.
2. Филончиков А.В. Проектирование автоматизированных водозаборных узлов на горных реках. – Фрунзе: Кыргызстан, 1990. – 376 с.
3. Гидротехнические сооружения для малой энергетики горно-предгорной зоны / Под ред. Н.П. Лаврова. – Б.: Салам, 2009. – 504 с.
4. Замбахидзе Г.Н. Движение реальной жидкости и твердых тел на криволинейных участках рек// Под редакцией Н.Ф. Данелия. Изд. «Сабчота сакартвело», Тбилиси, 1967. – 186 с.
5. Талмаза В.Ф., Крошкин А.Н. Гидроморфометрические характеристики горных рек. – Фрунзе, 1968. – 204 с.
6. Логинов Г.И. Движение двухфазного потока жидкости (вода - наносы) на криволинейном участке русла. Бишкек Вестник КРСУ, 2010, том 10, №2. - С.93 – 97.

Рецензент: д.т.н. Лавров Н.Т.