

УДК 556.53:627.83

Е. И. Шкуланов, Г. Л. Лобанов, Е. А. Савенкова (ФГБНУ «РосНИИПМ»)

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ СТОРА ВОДОЗАБОРА НА ПОВОРОТНЫХ УЧАСТКАХ РУСЕЛ ВОДОТОКОВ

Выбор места положения створа водозаборного сооружения на криволинейных участках русел водотоков, исключающего заиливание входных оголовков, является основной задачей при проектировании гидротехнических сооружений. Данная задача усложняется возникновением поперечной циркуляции на криволинейном участке, что приводит к изменению кинематической структуры и транспортирующей способности по живому сечению потока. Необходимыми данными для выбора места положения створа водозаборных сооружений, в первую очередь, являются механический состав наносов, величина продольных и радиальных донных скоростей. На основе опытных данных и теоретических решений движения потока на криволинейных участках водотока авторами было получено расчетное уравнение по определению расстояния от начала поворота до створа водозаборного гидроузла. Полученная формула была апробирована на русловой модели в масштабе 1:10 по методу Фруда.

Ключевые слова: створ, водозаборное сооружение, наносы, продольные радиальные скорости, расстояние до створа, русловая модель.

Ye. I. Shkulanov, G. L. Lobanov, Ye. A. Savenkova (FSBSE "RSRILIP")

ON THE ISSUE OF THE SELECTION OF WATER INTAKE CROSS SECTION AT THE TURNS OF WATERCOURSES

The main objective of the hydraulic design is the selection of the position of water intake cross section at the curved parts of the watercourses which excludes the sedimentation of front end wall. This problem is impeded by the nascency of transverse circulation at a curved part which leads to the changes in kinematic structure and capacity of a flow. The necessary data for water intake cross section selection in the first place is the texture of the deposits, longitudinal and transverse bottom velocities. On the basis of experimental data and theoretical solutions of the flow motion at the curved parts of the watercourses the authors got the equation for determine the distance from the beginning of the curved part to the water intake cross section of the structure. The obtained formula was tested at the stream model on a scale of one to ten by the method of Froude.

Keywords: cross section, water intake structure, deposits, longitudinal velocities, transverse velocities, distance before the water intake cross section, stream model.

Основной задачей при проектировании речных водозаборных сооружений на криволинейных участках русел водотоков является выбор места положения створа сооружений, исключающего заиливание входных оголовков. Задача усложняется тем, что в движущемся потоке на повороте происходит развитие четко выраженной поперечной циркуляции, характеризующейся наличием радиальных компонентов скоростей, направления которых

совпадают с положением радиуса закругления. Существенно изменяется кинематическая структура потока: происходит перераспределение скоростей, изменяется форма живого сечения потока (для размываемого русла), которое становится ассиметричным, вертикаль с наибольшей глубиной смещается ближе к вогнутому берегу, образуется поперечный (радиальный) уклон поверхности потока, продольные местные скорости убывают от поверхности ко дну, центробежная сила у поверхности воды больше, чем у дна. Поперечная циркуляция на изгибе водотока обуславливает возникновение радиальных скоростей, при которых в верхней части вертикали поперечные скорости направлены к вогнутому берегу, а в нижней – к выпуклому. Кроме того, изменяется транспортирующая способность потока по живому сечению и наблюдается отложение наносов на выпуклом берегу и отложение крупных наносов на начальном участке вогнутого берега.

Для выбора места положения створа водозаборных сооружений, исключающего возможность занесения наносами входных оголовков, в первую очередь, необходимы данные о механическом составе наносов и величинах продольных и радиальных донных скоростей. Так, И. Л. Розовский [1], принимая распределение продольных скоростей на вертикали по логарифмическому закону, получил теоретические профили радиальных скоростей, которые с достаточной достоверностью подтверждаются данными лабораторных и натурных измерений поля радиальных скоростей.

Результаты этого теоретического решения К. В. Гришанин [2] представил в виде следующего уравнения осредненных во времени радиальных скоростей:

$$W = \frac{hV}{k^2 \cdot r} \left[\frac{1}{3} \left(1 \ln - \frac{7}{2} \eta^2 + \frac{2}{3} \eta^3 \right) - \frac{3}{2} \right], \quad (1)$$

где W – радиальная скорость;

h – глубина потока на вертикали;

V – средняя продольная скорость на вертикали;

k – постоянная Кармана (для открытых потоков принимаем $k = 0,4$);

r – расстояние от центра вращения до продольной оси водотока;

$\eta = y/h$ – безразмерная глубина, отсчитывается от дна потока;

y – глубина потока в рассматриваемой точке.

Для $\eta=0$ ($W=W_d$) Г. В. Железняков [3] получает формулу для донной радиальной скорости:

$$W_d = -(3h \cdot V) / (2k^2 \cdot r), \quad (2)$$

где W_d – донная радиальная скорость.

Как отмечается в работе Г. В. Железнякова [3], предельный угол поворота, при котором происходит полное развитие поперечной циркуляции, можно определить по формуле:

$$\theta_{пр} = (1,5Ch_{cp}) / \sqrt{g} r, \quad (3)$$

где $\theta_{пр}$ – предельный угол поворота;

C – коэффициент Шези;

h_{cp} – средняя глубина потока;

g – ускорение свободного падения.

На рисунке 1 показан профиль живого сечения, направление поперечной циркуляции и распределение радиальных скоростей на одной из вертикалей.

Длина участка полного развития поперечной циркуляции L определяется по формуле:

$$L = \frac{1,5Ch_{cp}}{\sqrt{g}} \quad (4)$$

Принимая допущение, что движение на длине L равнопеременное и донные струи на расстоянии X от начала поворота изменяются прямо пропорционально относительно длины $\frac{X}{L}$ и перемещаются от вогнутого берега к выпуклому, можно найти среднюю радиальную донную скорость:

$$W_{\text{дс}} = \frac{W_{\text{д}} \cdot X}{L} = \left| \frac{\sqrt{g \cdot h \cdot V \cdot X}}{k^2 \cdot C \cdot h_{\text{ср}}} \right|, \quad (5)$$

где $W_{\text{дс}}$ – радиальная донная скорость.

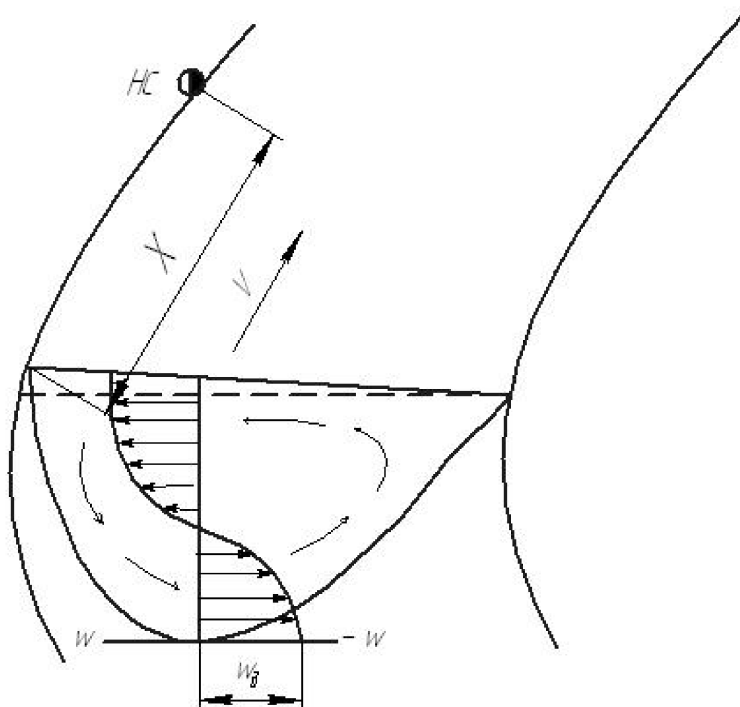


Рисунок 1 – Схема движения воды на излучине реки

Зная среднюю донную радиальную скорость, можно определить время T , за которое донные наносы переместятся от выпуклого к вогнутому берегу:

$$T = \frac{b}{W_{\text{дс}}} = \frac{B \cdot k^2 \cdot r \cdot C \cdot h_{\text{ср}}}{\sqrt{g \cdot h \cdot V \cdot X}}, \quad (6)$$

где B – ширина водотока по дну.

За этот же промежуток времени струи переместятся в продольном направлении на расстояние X . Время перемещения определится по формуле:

$$T = X / V_{\text{д}}, \quad (7)$$

где $V_{\text{д}}$ – донная продольная скорость.

Значение донной продольной скорости можно найти по формуле Г. В. Железнякова [3]:

$$V_d = V - 3V_*/k, \quad (8)$$

где $V_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$ – динамическая скорость;

τ_0 – касательное напряжение на границе поверхности дна русла;

ρ – плотность жидкости.

Приравняв формулы (1) и (2), подставив V_d из формулы (3), получим следующее уравнение:

$$X = \sqrt{\frac{k^2 \cdot B \cdot r \cdot C \cdot h_{cp} \cdot (V - 7,5V_*)}{\sqrt{g \cdot h \cdot V}}}. \quad (9)$$

Для определения размывающей динамической скорости в зависимости от диаметра донных наносов воспользуемся опытами Н. Н. Беяшевского [4], который определял значения придонных размывающих скоростей в зависимости от диаметра донных отложений.

Исходя из того, что в придонной области распределение скорости для шероховатого русла подчиняется логарифмическому закону, Л. Г. Лойцянский [5] предложил следующую зависимость:

$$\frac{V}{V_*} = 5,75 \lg \frac{Y}{\Delta} + \Phi \left[\frac{\Delta V_*}{\nu} \right], \quad (10)$$

где Y – глубина потока;

Δ – высота выступов шероховатости;

ν – кинематический коэффициент вязкости.

Считая, что средняя скорость на высоте выступов шероховатости равна действительной придонной размывающей скорости, переписываем уравнение (10) в следующем виде:

$$\frac{V}{V_*} = \Phi \left[\frac{\Delta V_*}{\nu} \right]. \quad (11)$$

По данным В. А. Базилевича [6] квадратичная область сопротивления развивается при $d \geq 1,5$ мм. Это позволяет нам использовать опытные дан-

ные Н. Н. Беляшевского для донных наносов с диаметром более 1,5 мм. Для квадратичной области сопротивления уравнение (11) можно записать в виде:

$$\frac{V}{V_*} = 8,5. \quad (12)$$

Обработав опытные данные Н. Н. Беляшевского [4] и построив зависимость действительной размывающей придонной скорости от диаметра донных отложений (рисунок 2) для диапазона диаметров донных отложений от 1,5 мм до 100 мм, получаем с достоверностью $R^2 = 0,996$ следующую зависимость:

$$V = 17,31d^{0,633}. \quad (13)$$

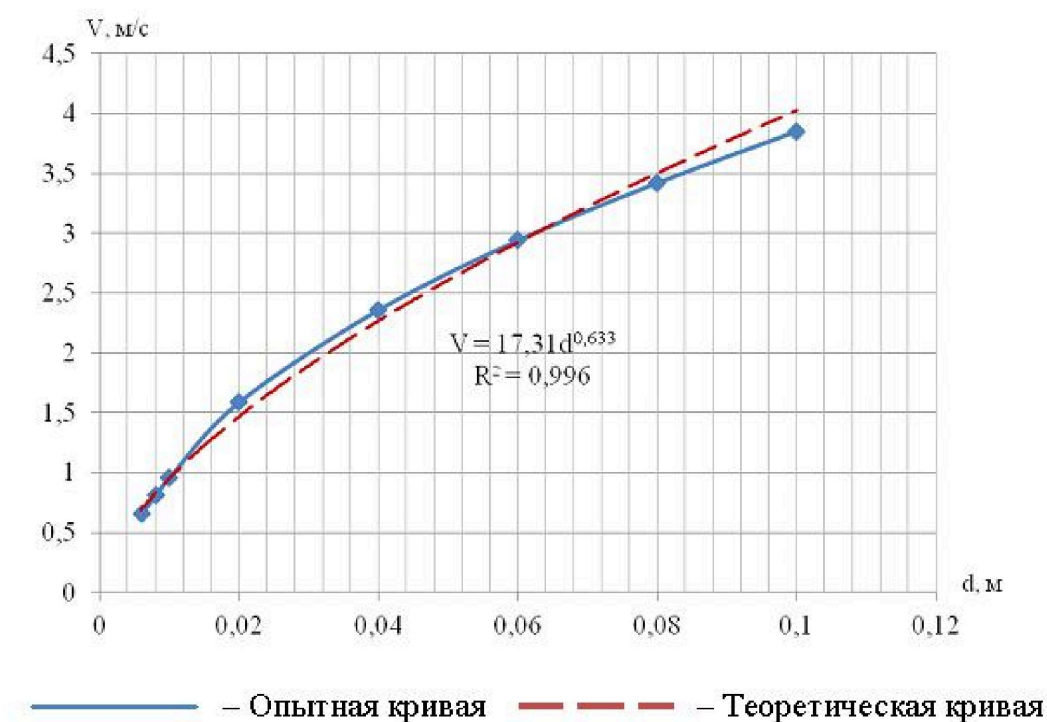


Рисунок 2 – Графики зависимости размывающей придонной скорости от диаметра донных отложений

Подставляя уравнение (13) в (12), получаем:

$$V_{*p} = 2,04d^{0,633}, \quad (14)$$

где V_{*p} – размывающая динамическая скорость.

Подставляя уравнение (14) в (9), получаем формулу для определения расстояния X от начала поворота до створа водозаборного гидроузла:

$$X = \sqrt{\frac{k^2 \cdot B \cdot r \cdot C \cdot (V - 15,3 \cdot d_{\text{cp}}^{0,633}) \cdot h_{\text{cp}}}{\sqrt{g} \cdot h \cdot V}}, \quad (15)$$

где d_{cp} – средний диаметр донных отложений.

Для проверки достоверности полученных зависимостей были проведены опыты в лаборатории на русловой модели в масштабе 1:10. Моделирование проводилось по Фрудру с соблюдением подвижности руслослагающего материала в натуре и на модели [7]. В частности, были проведены опыты, где в качестве руслослагающего материала использовался донской песок со средним диаметром $d_{\text{cp}} = 0,4$ мм. Результаты, полученные на модели, показали, что расстояние от начала поворота до створа, где прекращается отложение наносов на выпуклом берегу русла водотока (т.е. створе расположения водозабора сооружения), соответствуют расчетному уравнению (15).

Выводы:

- в движущемся потоке на поворотном участке водотоков происходит развитие четко выраженной поперечной циркуляции, изменяется транспортирующая способность потока по живому сечению, наблюдается отложение наносов на выпуклом берегу и отложения крупных влекомых наносов на начальном участке вогнутого берега; при проектировании водозаборных сооружений возникает проблема выбора места расположения створа этих сооружений;

- для определения места расположения створа водозаборного сооружения на поворотном участке водотока рекомендуется использовать предложенную формулу (15), которая с высокой вероятностью дает достоверные результаты.

Список использованных источников

1 Розовский, И. Л. Движение воды на повороте открытого потока / И. Л. Розовский. – Изд-во Академии наук УССР, 1957. – 188 с.

2 Гришанин, К. В. Динамика русловых потоков / К. В. Гришанин. – Л.:

Гидрометеиздат, 1979. – 312 с.

3 Железняков, Г. В. Пропускная способность русел рек и каналов / Г. В. Железняков. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 312 с.

4 Расчеты нижнего бьефа за водосбросным сооружением на скальных основаниях / Н. Н. Беяшевский [и др.]. – Киев: Наукова Думка, 1973. – 292 с.

5 Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1978. – С. 736.

6 Базилевич, В. А. Исследование актуальных (максимальных мгновенных) скоростей и их связи с размывающей способностью в равномерном потоке и в нижнем бьефе водосливных плотин: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.09 / В. А. Базилевич – Киев, 1962. – 20 с.

7 Косиченко, Ю. М. Вероятностная модель эксплуатационной надежности крупных каналов / Ю. М. Косиченко, Ю. И. Иовчу, М. Ю. Косиченко // Гидротехническое строительство. – 2007. – № 12. – С. 39-45.

Шкуланов Евгений Иванович – Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации» (ФГБНУ «РосНИИПМ»), ведущий научный сотрудник.
Контактный телефон: 8-951-534-60-45.
E-mail: rosniipm@novoch.ru

Shkulanov Yevgeniy Ivanovich – Federal State Budget Scientific-Research Establishment “Russian Scientific-Research Institute of Land Improvement Problems” (FSBSE “RSRILIP”), Leading Researcher.
Contact telephone number: 8-951-534-60-45.
E-mail: rosniipm@yandex.ru

Лобанов Георгий Леонидович – кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации» (ФГБНУ «РосНИИПМ»), старший научный сотрудник, доцент.
Контактный телефон: 8-909-423-92-06.
E-mail: rosniipm@novoch.ru

Lobanov Georgiy Leonidovich – Candidate of Technical Sciences, Federal State Budget Scientific-Research Establishment “Russian Scientific-Research Institute of Land Improvement Problems” (FSBSE “RSRILIP”), Senior Researcher, Associate Professor.
Contact telephone number: 8-909-423-92-06.
E-mail: rosniipm@yandex.ru

Савенкова Елена Александровна – Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации» (ФГБНУ «РосНИИПМ»), научный сотрудник.

Контактный телефон: 8-904-348-03-08.

E-mail: rosniipm@novoch.ru

Savenkova Yelena Aleksandrovna – Federal State Budget Scientific-Research Establishment “Russian Scientific-Research Institute of Land Improvement Problems” (FSBSE “RSRILIP”), Researcher.

Contact telephone number: 8-904-348-03-08.

E-mail: rosniipm@yandex.ru