– растительность на пойме реки оказывает существенное влияние на уровенный режим половодий, например, полное ее удаление приводит к среднему снижению уровней половодья (при 1% обеспеченности) на 1,0–0,5 м по сравнению с уровнем в естественных условиях;

– уменьшение междамбового расстояния вызывает увеличение русловой части расхода по сравнению с пойменной, вследствие чего повышение средних скоростей в русле больше, чем на пойме;

– на участках поймы, покрытых растительностью, где отсутствуют сосредоточенные течения (влияние рельефа местности и растительности), опасность размывов отсутствует при всех рассмотренных вариантах расположения дамб;

– при устройстве дамб обвалования из местных песков следует учитывать минимально допустимое приближение их к руслу реки и наличие сосредоточенных течений, обусловленных рельефом местности, наличием кустарника, устройством вдоль дамб траншей.

### Литература

1. Леви И.И. Моделирование гидравлических явлений. – М.–Л.,1960. 2. Гиляров Н.П. Моделирование речных потоков. – Л., 1973. 3. Розовский И.Л., Еременко Е.В., Базилевич В.А. Неустановившееся движение водного потока ниже гидроэлектростанций и его влияние на русло. – Киев, 1967. 4. Справочник по гидравлике. – Киев, 1977.

*УДК 532.57*

В.П. Рогунович, А.А. Осипович, Г.С. Цацук

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЬНОГО КОМПОНЕНТА ОСРЕДНЕННОЙ СКОРОСТИ В ОДНОРОДНЫХ ПО ДЛИНЕ ПОТОКАХ ТРАПЕЦЕИДАЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

Использование гипотезы о представлении поля продольных скоростей некоторой комбинацией полей скоростей двух плоских потоков [1,2,3] привело к удовлетворительному согласованию расчетных и экспериментальных данных [4]. Впервые аналогичное представление применительно к потокам прямоугольного поперечного сечения использовал В.Н. Гончаров [1]. Э.П. Коваленко, предложив [2,3] новую трактовку известного [1] гидравлического постулата о представлении потоков других форм сечений плоскими с глубиной, равной гидравлическому радиусу R, и шириной, равной смоченному периметру $\chi$, установил взаимосвязь между полем продольных скоростей в потоке ограниченного сечения и полями скоростей в двух плоских потоках – плоском по вертикали и по горизонтали.

В статье предпринята попытка вывести формулу для расчета распределения продольного компонента осредненной скорости в однородных по длине потоках трапецеидального сечения. Для этого использована новая трактовка [2,3,4] гидравлического постулата и полуэмпирическая зависимость для профиля скоростей в плоском потоке [5,6].

В случае прямоугольного сечения, основываясь только на гидравлическом постулате, можно записать соотношение [2,3,4]:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{H} + \frac{1}{B} . \tag{1}$$

Из него наиболее наглядно следует идея новой трактовки известного гидравлического постулата: по аналогии с R считать H и B глубинами плоских потоков по вертикали и горизонтали соответственно.

Для потоков трапецеидального сечения новое толкование постулата не столь очевидно, так как глубина и ширина переменны по сечению. В этом случае применяются некоторые средние значения H и B, которые в дальнейшем обозначаются $H_1$ и $B_1$. Возможность использования $H_1$ и $B_1$ применительно к потокам трапецеидального сечения вытекает из полученной ранее [4] формулы для потоков прямоугольного сечения, в которую H и B входят как параметры, определяющие средние характеристики движения.

На основании изложенных предпосылок и известных зависимостей можно для вычисления $H_1$ и $B_1$ получить следующие соотношения.

Средняя по сечению скорость плоского по вертикали потока в трапецеидальном сечении

$$\bar{v}_2 = \frac{\int_o^A v_2 \, dA}{A} ,$$

где A – площадь половины поперечного сечения.

С другой стороны, средняя скорость плоского по вертикали потока с постоянной глубиной $H_1$ может быть определена по формуле Шези. Для скоростного коэффициента Шези C используем формулу логарифмического типа [7]:

$$C = E + N \ln H_1 = \ln H_1^N e^E ,$$

где $E = \frac{1}{n}$; $N = (11,94 - 130,2\, n)$; n – коэффициент шероховатости.

Тогда средняя скорость плоского по вертикали потока с постоянной глубиной $H_1$

$$\bar{v}_2 = \sqrt{H_1 i} \;\; \ln H_1^N e^E .$$

На основании принятого равенства средних скоростей плоских по вертикали потоков в трапецеидальном сечении и в плоском потоке с постоянной глубиной $H_1$ можно записать

$$\sqrt{H_1 i}\,\ln H_1^N e^E = \frac{\int_0^A v_2 dA}{A}$$

и, следовательно, определить

$$H_1 = e^{\frac{\int_0^A v_2 dA}{AN\sqrt{H_1 i}} - \frac{E}{N}}.$$

Для плоских потоков по горизонтали, использовав аналогичные соотношения, получим

$$B_1 = e^{\frac{\int_0^A v_3\, dA}{AN\sqrt{B_1 i}} - \frac{E}{N}},$$

где $v_3$ – местная осредненная скорость плоского по горизонтали потока в трапецеидальном сечении.

Используя известный гидравлический постулат, можно записать аналогичное соотношение для R:

$$R = e^{\frac{\int_0^A v\, dA}{AN\sqrt{Ri}} - \frac{E}{N}}, \qquad (2)$$

где v – местная осредненная скорость в трапецеидальном сечении.

В частном случае трапецеидального сечения – при прямоугольном сечении – соотношение (1) выполняется точно, в общем случае соотношение

$$\frac{1}{R} \approx \frac{1}{H_1} + \frac{1}{B_1} \qquad (3)$$

лишь приближенно.

Для уточнения (3) предлагается ввести поправочный коэффициент k, который, как показывают расчеты, практически постоянен и близок к единице. Тогда (3) перепишется в виде

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{k}\left(\frac{1}{H_1} + \frac{1}{B_1}\right). \qquad (4)$$

Подставив значения R, $H_1$, $B_1$ в (4), получим

$$\frac{1}{e^{\frac{\int_0^A v\, dA}{AN\sqrt{Ri}} - \frac{E}{N}}} = \frac{1}{k}\left(\frac{1}{e^{\frac{\int_0^A v_2\, dA}{AN\sqrt{Ri}} - \frac{E}{N}}} + \right.$$

$$+ \frac{1}{e^{\frac{\int_0^A v_3\, dA}{A N \sqrt{Ri}} - \frac{E}{N}}} ) .$$

Выполним дифференцирование выражения (4) по A. Каждое слагаемое в (4) является функцией области A. Интегралы, входящие в (4), также функции A, при этом аддитивные.

Предварительно вычислим из (2):

$$\frac{\partial R}{\partial A} = e^{\frac{\int_0^A v\, dA}{AN\sqrt{Ri}} - \frac{E}{N}} \times$$

$$\times \frac{vA\sqrt{Ri} - N\sqrt{Ri}\int_0^{A'} v dA - N\sqrt{i}\int_0^A v dA \frac{1}{2\sqrt{R}} A \frac{\partial R}{\partial A}}{(A N \sqrt{Ri})^2} .$$

Выполнив алгебраические преобразования и учитывая, что $\frac{\int_0^A v dA}{A} =$

$= \bar{v}$, получим $\frac{\partial R}{\partial A} = \frac{2R(v - \bar{v})}{A\ (2N\sqrt{Ri} + \bar{v})}$ .

Аналогично $\frac{\partial H_1}{\partial A} = \frac{2H_1 (v_2 - \bar{v}_2)}{A(2N\sqrt{H_1 i} + \bar{v}_2)}$ ;

$$\frac{\partial B_1}{\partial A} = \frac{2B_1\ (v_3 - \bar{v}_3)}{A(2N\sqrt{B_1 i} + \bar{v}_3)}$$

Продифференцировав по A и воспользовавшись слабой изменяемостью k, преобразуем (4):

$$\frac{2R(v - \bar{v})}{AR^2(2N\sqrt{Ri} + \bar{v})} = \frac{2H_1(v_2 - \bar{v}_2)}{kAH_1^2(2N\sqrt{H_1 i} + \bar{v}_2)} + \frac{2B_1(v_3 - \bar{v}_3)}{kAB_1^2(2N\sqrt{B_1 i} + \bar{v}_3)} .$$

После преобразований

$$v = \overline{v} + \frac{R(2N\sqrt{Ri} + \overline{v})(v_2 - \overline{v}_2)}{kH_1(2N\sqrt{H_1 i} + \overline{v}_2)} + \frac{R(2N\sqrt{Ri} + \overline{v})(v_3 - \overline{v}_3)}{kB_1(2N\sqrt{B_1 i} + \overline{v}_3)} . \qquad (5)$$

Для расчета распределения скоростей в плоском потоке и определения средней скорости воспользуемся формулами И.К. Никитина [5,6]. С учетом примечаний [4] запишем:

$$v_2 = 2{,}98\, v_{*2} \left[ \ln \frac{D(x_2)}{\delta_2} + 2{,}90 - \frac{\delta_2}{D(x_2)} \right]; \qquad (6)$$

$$\overline{v}_2 = 2{,}98\, v_{*H_1} \left( \ln \frac{H_1}{\delta_2} - 1{,}90 \right),$$

где $v_{*2} = \sqrt{gHi}$ ; $v_{*H_1} = \sqrt{gH_1 i}$ ; H – глубина потока на вертикали, проходящей через точку, в которой определяется местная осредненная скорость; $D(x_2)$ – расстояние от стенки до точки; $\delta$ – толщина пристенного слоя плоского потока по вертикали.

Для плоского потока по горизонтали соотношения вполне аналогичны.

Введем обозначения

$$L = 2{,}98 \frac{R(2N\sqrt{Ri} + \overline{v})}{kH_1(2N\sqrt{H_1 i} + \overline{v}_2)} ;$$

$$M = 2{,}98 \frac{R(2N\sqrt{Ri} + \overline{v})}{kB_1(2N\sqrt{B_1 i} + \overline{v}_3)} ;$$

$$S = 0{,}336(L\overline{v}_2 + M\overline{v}_3) .$$

Тогда зависимость (5) можно записать в виде

$$v = \overline{v} + L v_{*2} \left[ \ln \frac{D(x_2)}{\delta_2} + 2{,}90 - \frac{\delta_2}{D(x_2)} \right] + \\ + M v_{*3} \left[ \ln \frac{D(x_3)}{\delta_3} + 2{,}90 - \frac{\delta_3}{D(x_3)} \right] . \qquad (7)$$

Параметры L и M имеют смысл весовых функций влияния на местную осредненную скорость границ сечения.

В формуле $D(x_2) = H_o - x_2$, если $x_3 \leqslant b$, причем $0 < x_2 \leqslant H_o - \delta_2$,

$$D(x_2) = \frac{H_o}{B_o - b_o}(B_o - x_3) - x_2, \text{ если } x_3 > b_o, \text{ при этом}$$

$$0 < x_2 \leqslant \frac{H_o}{B_o - b_o}(B_o - x_3) - \delta_2 \,; \; D(x_3) = B_o - \frac{(B_o - b_o)x_2}{H_o} - x_3 \,,$$

причем $0 < x_3 \leqslant B_o - \dfrac{(B_o - b_o)x_2}{H_o} - \delta_3$ .

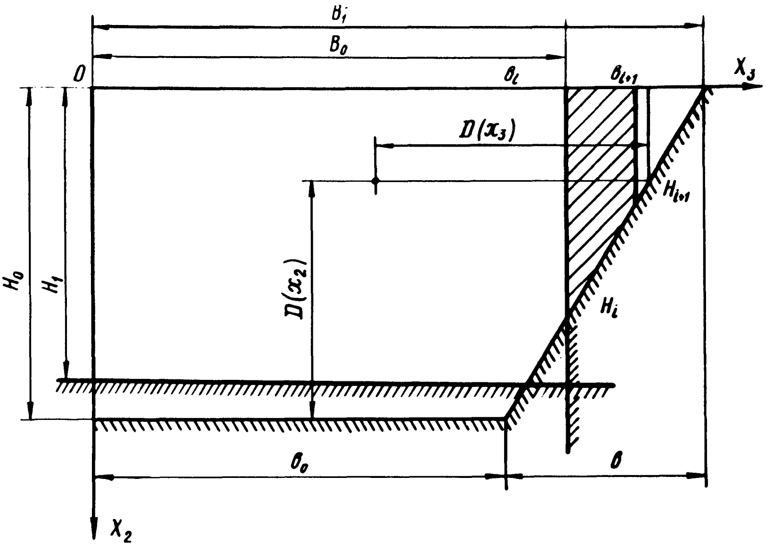


**Рис. 1. Расположение осей координат и схема к представлению равномерного потока как двух плоских.**

Входящие в формулу (7) величины могут быть определены следующим образом. Предварительно установим расходы в трапецеидальном сечении плоских по вертикали и по горизонтали потоков. Расход плоского потока по вертикали в трапецеидальном сечении слагается из расходов в треугольном и прямоугольном отсеках. Чтобы определить результаты в наиболее общей форме, рассмотрим трапецеидальный отсек общего вида (рис. 1), т.е. отсек, в котором глубина справа не равна глубине слева. Из общей формулы расхода можно получить формулы для треугольного и прямоугольного отсеков.

Расход $Q_i$ для плоского потока над наклонным участком отсека в обозначениях (см. рис. 1) можно определить, используя формулу Шези

$$Q_i = \int_{b_i}^{b_{i+1}} C_{H(x_3)} \sqrt{H(x_3)\, i}\;\; H(x_3)\, dx_3,$$

где $H(x_3)$ – глубина потока на вертикали с координатой $x_3$:

$$H(x_3) = H_1 - \frac{H_{i+1} - H_i}{b_{i+1} - b_i} \, ( b_i - x_3).$$

Выполнив интегрирование, получим:

для трапецеидального отсека общего вида $(H_i \neq H_{i+1})$

$$Q_i = \frac{\sqrt{i}}{2{,}5} \, \frac{b_{i+1} - b_i}{H_i - H_{i+1}} \, [ H_i^{2,5} (C_i - 0{,}4\,N) -$$

$$- H_{i+1}^{2,5} (C_{i+1} - 0{,}4N) ] ;$$

для треугольного отсека $H_{i+1} = 0$

$$Q_i = \frac{\sqrt{i}}{2{,}5} \, (b_{i+1} - b_i) \, H_i^{1,5} (C_i - 0{,}4N) ;$$

для прямоугольного отсека $(H_{i+1} = H_i)$

$$Q_i = \sqrt{i}\,(b_{i+1} - b_i) H^{1,5} .$$

Аналогично определяются расходы для плоского потока по горизонтали. Отличие заключается в том, что местами меняются $H_i$, $H_{i+1}$ с $B_i$ и $B_{i+1}$.

Применяя изложенные выше результаты к трапецеидальному сечению, получим в обозначениях рис. 1 формулы для определения расхода в трапецеидальном отсеке плоского по вертикали и по горизонтали потоков:

$$Q_2 = \sqrt{i} H_o^{1,5} [C_{H_o} (b_o + \frac{b}{2{,}5}) - 0{,}16Nb] ;$$

$$Q_3 = \frac{\sqrt{i}}{2{,}5} \, \frac{H_o}{b} [ B_o^{2,5} (C_{B_o} - 0{,}4N) - b_o^{2,5} (C_{b_o} - 0{,}4N) ] , \qquad (8)$$

где $C_{H_o}$, $C_{B_o}$, $C_{b_o}$ – скоростные коэффициенты, определенные при значениях гидравлического радиуса $H_o$, $B_o$, $b_o$.

Тогда средние в трапецеидальном сечении скорости плоских потоков будут равны

$$\bar{v}_2 = \frac{\sqrt{i}H_o^{1,5}}{A}\left[C_{H_o}\left(b_o + \frac{b}{2,5}\right) - 0,16Nb\right];$$

$$\bar{v}_3 = \frac{\sqrt{i}H_o}{2,5Ab}\left[B_o^{2,5}\left(C_{B_o} - 0,4N\right) - b_o^{2,5}\left(C_{b_0} - 0,4\,N\right)\right]. \qquad (9)$$

Параметры $H_1$ и $B_1$ находятся из уравнений вида (2) с использованием (8). Причем окончательные уравнения запишутся в виде

$$H_1^{0,5}\left(N \ln H_1 + E\right) = \frac{H_o^{1,5}}{A}\left[C_{H_o}\left(b_o + \frac{b}{2,5}\right) - 0,16\,Nb\right];$$

$$B_1^{0,5}\left(N \ln B_1 + E\right) = \frac{H_o}{2,5Ab}\left[B_o^{2,5}\left(C_{B_o} - 0,4N\right) - b_o^{2,5}\left(C_{b_o} - 0,4N\right)\right].$$

Средние толщины пристенных слоев плоских потоков по вертикали $\delta_2$ и горизонтали $\delta_3$ могут быть определены из решения уравнений (6).

Сравнивались скорости, вычисленные по (7), с многочисленными экспериментальными данными, полученными в однородных по длине потоках трапецеидальной формы сечения. На рис. 2 представлены расчетные и экспериментальные данные по распределению скоростей в канале трапецеидального сечения.

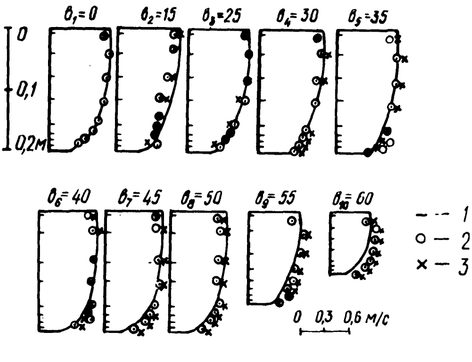


Рис. 2. Сравнение скоростей, вычисленных по формуле (7), с экспериментальными данными:
1 – вычисленные значения скоростей; 2,3 – измеренные скорости в точках, симметричных относительно оси сечения; $b_0 = 0,50$ м, $H_o = 0,202$ м, $i = 0,000645$, $t = 9^oC$, $v = 0,64$ м/с, $Q = 0,160$ м$^3$/с; $b_i$(см) – расстояние от гидродинамической оси до скоростной вертикали.

Сравнение позволило сделать вывод об удовлетворительном согласовании скоростей, вычисленных по предлагаемой методике, с экспериментальными, особенно во внутренней области течения. Наибольшее отклонение наблюдается в зоне откосов, по мере удаления от которых к центру погрешности уменьшаются. В значительной части сечения относительная погрешность не превышает 3%, что является подтверждением возможности использования упомянутой гипотезы для расчета распределения по сечению продольной компоненты осредненной скорости. Вместе с тем нельзя не обратить внимания на систематические отклонения вычисленных и экспериментальных скоростей в области сечения, находящегося у откоса. Это следствие того, что использованная гипотеза, естественно, не отражает полностью сложных процессов, имеющих место в потоке, например не учитывает трехмерности поля осредненных скоростей. Это во многом может объяснить отклонение вычисленных скоростей от экспериментальных.

Однако судя по приведенным, а также по другим выполненным многочисленным сравнениям, дающим удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных, можно сделать вывод о том, что полученная формула распределения по трапецеидальному сечению продольного компонента осредненных скоростей может быть использована в качестве первого приближения для решения различных задач.

## Литература

1. Гончаров В.Н. Динамика русловых потоков. — Л., 1962. 2. Коваленко Э.П. Распределение скоростей в равномерном потоке жидкости. — ИФЖ, 1961, № 8. 3. Коваленко Э.П. Исследование движения воды в открытых руслах. — Минск, 1963. 4. Рогунович В.П. К расчету распределения осредненных продольных скоростей в однородных по длине прямоугольных потоках. — Водное хозяйство Белоруссии. Минск, 1971, вып.1. 5. Никитин И.К. Турбулентный русловой поток и процессы в придонной области. — Киев, 1963. 6. Никитин И.К. Обобщение зависимости для расчета стабилизированных турбулентных течений по двухслойной схеме. — В сб.: Исследование однородных и взвесенесущих потоков. —Киев, 1967. 7. Агроскин И.И., Штаренлихт Д.В. Уточненная формула для коэффициента Шези С. — Гидротехника и мелиорация, 1965, № 9.

*УДК 556.04/08*

Н.М. Балаескул, В.Н. Заяц

# ОПЫТ ТАРИРОВКИ ВОДОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА КАНАЛИЗАЦИОННЫХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ

В практике учета сточных вод на канализационных системах наиболее широко используются в качестве стационарных измерителей расходов водоизмерительные сужающие устройства типа лотков Вентури и Паршалла [1,2]. В основу учета стока всеми гидрометрическими лотками положена устойчивая связь между расходами и уровнями верхнего бьефа в условиях свободного истечения потока. Лотки конструктивно просты. Для них разработан ряд рекомендаций и правил, при соблюдении которых действительны полуэмпирические зависимости и рабочие формулы, разрабо-