

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВТОРИЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ПРИЗМАТИЧЕСКИХ РУСЛАХ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСРЕДНЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА

Курбанов Холмурод Абдусаламович,
к.т.н., профессор. Академия МЧС РУз

Аннотация

В прямолинейном призматическом потоке прямоугольного и трапецеидального сечений имеют место поперечные и вертикальные компоненты осредненной скорости. Они образуют вихри (вторичные течения) с винтообразными линиями тока и продольными осями вращения.

Несмотря на незначительную абсолютную величину, поперечные скорости существенно влияют на структуру осредненного потока, распределение осредненных и турбулентных характеристик течения, движение наносов и выбор место забора воды из открытых источников.

В статье приведены данные о поперечных и вертикальных компонентах осредненной скорости в живом сечении открытых потоков прямоугольного и трапецеидального сечений. Выявлено влияние вторичных течений на распределение осредненных и турбулентных характеристик течения.

Ключевые слова: поток, вторичные течения, продольные и поперечные составляющие скорости, наносы, параметра русла.

Исследование кинематической структуры открытых турбулентных потоков занимает одно из важных мест в теории руслового процесса. Поток и русло, составляя единую систему, всегда находятся во взаимодействии, что затрудняет аналитическое решение ряда задач, связанных со структурой потока. Высказывание Б.А.Фидмана о том, что при спокойных режимах главную роль в деформациях играет не гравитационная сила, а кинематика, также свидетельствует о важности вопроса исследования кинематической структуры течения.

Известно, что в поперечном сечении призматических потоков имеют место поперечные компоненты осредненных скоростей, создающие поперечные вихревые движения частиц жидкости с продольными осями вращения, которые в гидравлике получили название «вторичные течения». Существование таких течений доказано как теоретически (В.Н.Гончаров, L.Prandtl, H.Nakagawa и др.), так и экспериментально (Ф.Д.Шнипов, Н.И.Зайцев, Е.К.Рабкова и ряд др.). Однако, причина возникновения вторичных (поперечных) течений объясняется по-разному.

По данным многих ученых величина средней скорости вторичных течений составляет 3-5 % (иногда доходят до 10%) от продольной скорости. Однако, несмотря

на незначительную абсолютную величину, поперечные скорости существенно влияют на структуру осредненного потока, распределение осредненных и турбулентных характеристик течения, движение наносов и так далее.

В связи с этим нами было изучено характерную особенность кинематической структуры потока в прямолинейном призматическом русле (прямоугольного и трапецеидального сечений) и закономерности распределения характеристик течения при наличии в потоке вторичных течений.

Кинематические характеристики потока измерялись: микровертушкой конструкции САНИИРИ с диаметром лопастей 5–8 мм, предназначенной для измерения средней и пульсационной составляющей продольной скорости (погрешность прибора – 3 %); измерителем вектора скорости (ИВС) конструкции ГГИ (Н.И.Зайцев), который дает возможность получить все три компонента актуальной скорости.

Наиболее полные данные о кинематических характеристиках потока получили при использовании ИВС. Пульсации модуля вектора скорости и два угла направления регистрировались на быстродействующий шестиканальный самописец марки НЗ38-6П, с последующей обработкой дискретного ряда значений, получаемых из записей с шагом дискретизации $\Delta t = 0,1$ сек при зернистой шероховатости $\Delta t = 0,04$ сек при грядовом рельефе дна. Количество членов ряда составляло не менее 600 при шаге дискретизации $\Delta t = 0,1$ секунд, не менее 1000-1200 при шаге $\Delta t = 0,04$ сек. В качестве примера на рис.1 показаны записи пульсации модуля скорости и два угла направления.

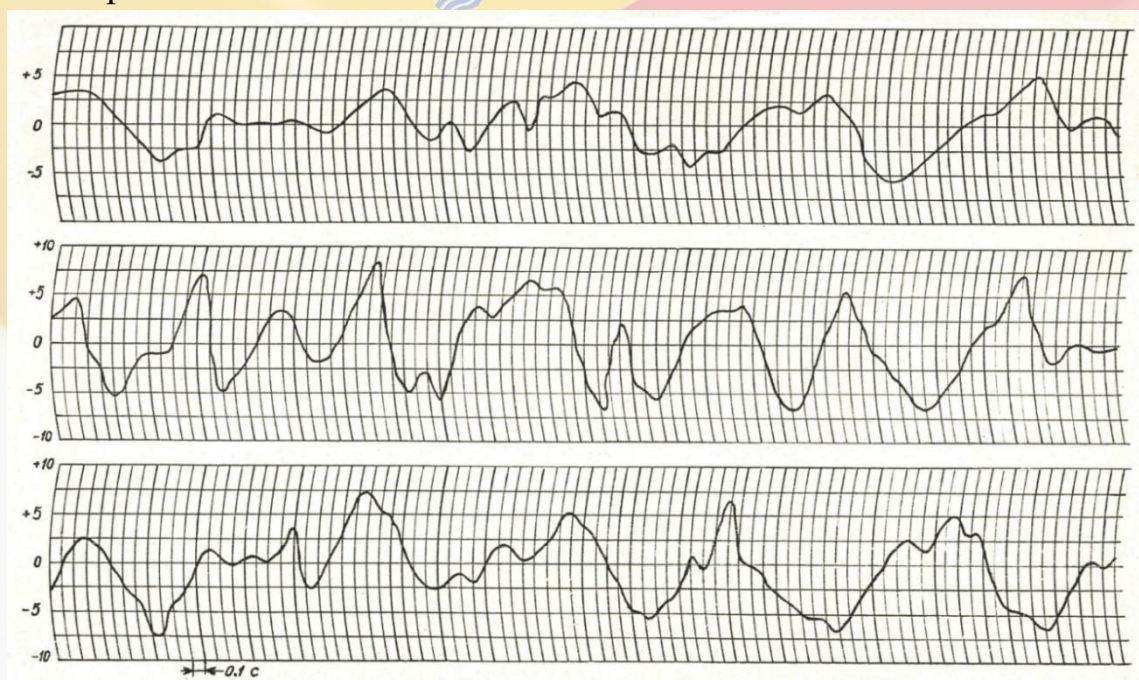


Рис.1. Пульсация модуля скорости и два угла направления
1-пульсация модуля вектора скорости; 2-угол в горизонтальной плоскости;
3- угол в вертикальной плоскости.

Обработка производилась по специальным программам на ЭВМ. В результате обработки получали все три компонента актуальной скорости потока: u' - продольной составляющей $u' = U \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta$

v' - вертикальной составляющей $v' = U \cdot \sin \beta$

w' - поперечной составляющей $w' = U \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta$

где U – модуль вектора скорости в точке, значение которого снимается со вторичного прибора; α – угол в горизонтальной плоскости; β – угол в вертикальной плоскости.

При обработке реализаций на ЭВМ в программе предусмотрено введение поправки в данные измерения, исключающее погрешность, связанную с инерционностью прибора. Суммарная погрешность измерений средней продольной скорости составляла меньше 5%. Точность измерения поперечных составляющих скорости зависит только от точности отслеживания струи гидрофлюгером, т.е. от точности определения двух углов направления вектора скорости. Использованное нами графосчитывающее устройство Ф-018 позволяет снимать ординаты с точностью 0,5 мм, которым соответствует $0,25^\circ$ (1/4 доля градуса). Если допустить ошибку при снятии ординат 1 мм. Точность определения поперечных течений составляет 1 % от продольной составляющей.

Для сравнения сопоставлены данные, измеренные микровертушкой и ИВС на осевых вертикалях, оценено расхождение этих данных в %. Анализ этих данных показал, что осредненная продольная скорость, измеренная микровертушкой, практически совпадает со значениями, полученными с помощью ИВС (расхождение не превышает 3%).

По данным измерений с использованием ИВС составлены графики распределения осредненных поперечных скоростей течения в поперечном сечении русла (рис.2).

Анализ этих графиков показывает, что

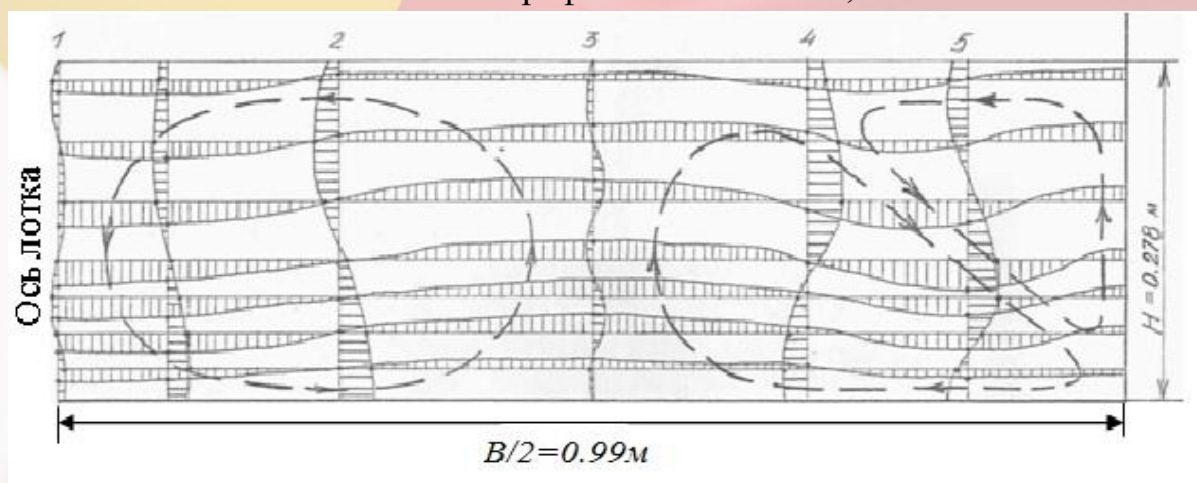


Рис.2. Распределение осредненных поперечных (w) и вертикальных (v) скоростей течения в живом сечении прямоугольного русла.

в прямолинейном призматическом потоке прямоугольного и трапецеидального сечений имеют место поперечные и вертикальные компоненты осредненной скорости. Они образуют вихри (вторичные течения) с винтообразными линиями тока и продольными осями вращения. Поперечные размеры и количество продольных вихрей в поперечном сечении зависят от осредненной скорости потока, параметра формы русла (B/H), и шероховатости. Два основных винта наблюдаются у стенки ниже биссектрисы и по два индуцированных, расположенных выше биссектрисы углов.

Однако следует отметить, что границы зоны разделов имеют неустойчивый характер и определенная масса воды постоянно переходит с одной стороны в другую вдоль «линии» раздела, о чем свидетельствуют и распределения значения коэффициента асимметрии поперечной составляющей скорости по глубине потока в зонах раздела продольных вихрей.

Несмотря на то, что величина поперечные скорости вторичных течений незначительны по сравнению с продольной составляющей, они существенно влияют на распределение изотак продольной скорости, сильно искривляя и уплотняя их на местах с восходящими и нисходящими токами. На рис.3 и рис.4 показаны графики распределения изотак продольной скорости в поперечном сечении русла.

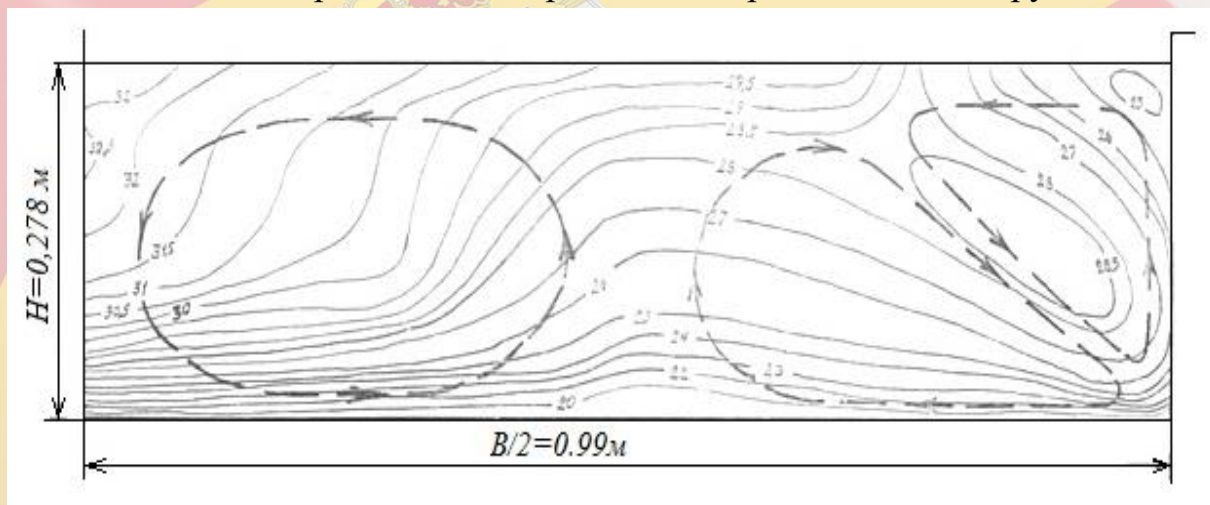


Рис.3. Влияние вторичных течений на распределение осредненной продольной скорости в поперечном сечении прямоугольного русла.

По данным измерений построены изотак продольной осредненной скорости в поперечном сечении русла (рис.3), откуда видно, что наличие в потоке вторичных течений оказывает существенное влияние на распределение изотак продольной скорости, сильно искривляя и уплотняя их на местах с восходящими и с нисходящими токами. Следовательно, по данным измерений осредненной продольной скорости путем построения изотак можно судить о наличии в потоке вторичных течений. С увеличением параметра формы русла (B/H) и коэффициента заложения откоса (τ) влияние вторичных течений на распределение продольной скорости в поперечном сечении уменьшается.

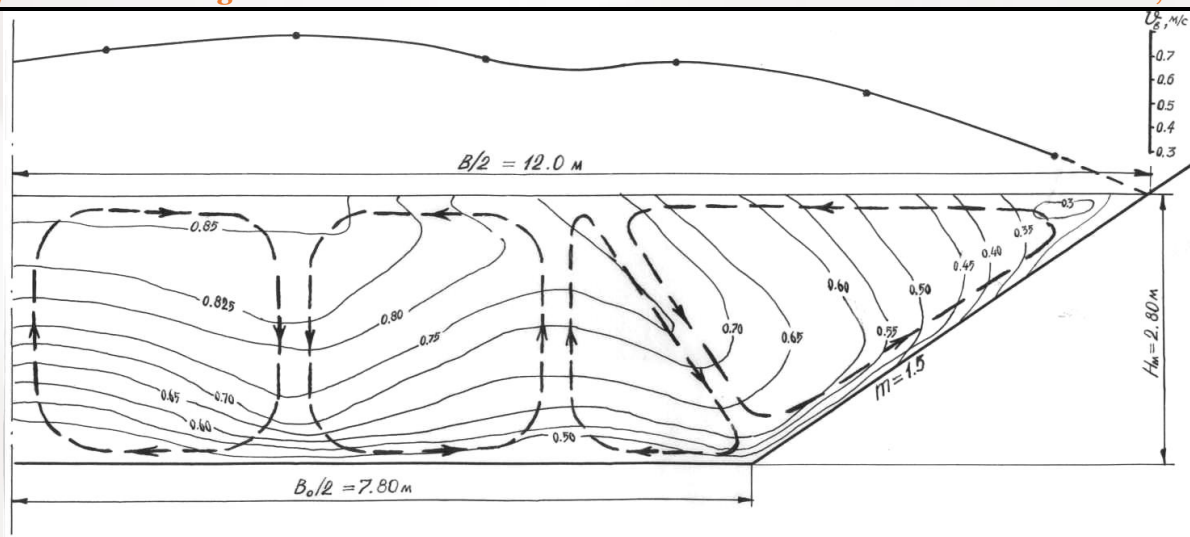


Рис.4. Влияние вторичных течений на распределение осредненной продольной скорости в поперечном сечении трапецеидального русла.

С увеличением относительной скорости потока увеличивается влияние вторичных течений на общую структуру потока достигая максимума при предельно-неразрывающей скорости, о чем свидетельствуют следы (скопление более мелких наносов) в виде «ёлочки» в зонах раздела с восходящими токами. Дальнейшее увеличение скорости течения сопровождается движением наносов, и дно покрывается макрошероховатостью в виде рифелей и гряд, которые существенно изменяют кинематическую структуру течения. В этом случае в потоке преобладают неустойчивые вихревые образования, форма которых близка к эллипсу, а вторичные течения с продольными осями вращения не наблюдаются.

При дальнейшем увеличении скорости течения наблюдается безгрядовое движение наносов, в этом случае опять наблюдается вторичные течения как при неразрывающей скорости, но со значительно большей скоростью вращения. В этом случае наносы движутся по дорожкам.

Графики распределения осредненной продольной скорости на характерных вертикалях по ширине русла (рис.5) свидетельствуют о том, что эпюры в различных зонах вторичных течений (вихрей) существенно отличаются. Наиболее «правильное» (логарифмическое, степенное и др.) распределение наблюдается в зонах раздела с восходящими токами и в середине вихрей (кривые 2, 3, 4).

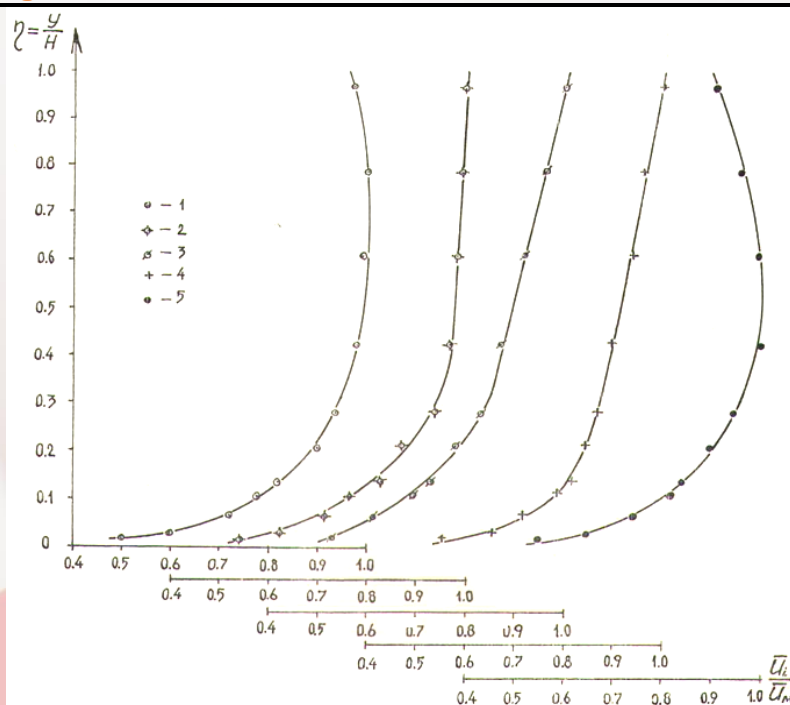


Рис. 5. Распределение осредненной продольной скорости по глубине потока на характерных вертикалях. 1, 2, 3, 4, 5 – номера вертикали (см. рис.2).

В зонах раздела с восходящими токами распределение продольной скорости по всей глубине потока достаточно хорошо описывается степенным законом, степень которого практически совпадает с законом $1/7$. Такое же значение показателя степени получено и другими авторами (Е.К.Рабкова, В.К.Дебольский и др.).

В зонах раздела с нисходящими токами распределение продольных скоростей не подчиняется существующим законам, имеет бочкообразную форму, здесь наблюдается погружение максимальной на вертикали скорости под уровень (кривые 1, 5). Наиболее сильное погружение (до половины глубины) наблюдается на вертикалях, расположенных в зонах пересекающих биссектрисы угла сечения.

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Кинематическая структура потока в прямолинейном призматическом русле трапецеидального сечения свидетельствует о наличии в нем вторичных течений, оси вращения которых параллельны оси основного течения. Размеры и количество этих течений зависят от параметра русла, коэффициента заложения откоса, относительной скорости потока и т.д.
2. Вторичные течения в потоке существенно влияют на распределение осредненных и турбулентных характеристик течения по глубине и ширине потока, сильно искривляя и уплотняя изотакс продольной скорости в зонах восходящих и нисходящих токов. Следовательно и на выбор устойчивого места забора воды из открытых источников.

3. Графики распределения осредненной продольной скорости на характерных вертикалях по ширине русла в различных зонах вторичных течений существенно отличаются. Наиболее «правильное» (степенное, логарифмическое и др.) распределение наблюдается в зонах раздела с восходящими токами и в середине вихрей.
4. В зонах раздела с нисходящими токами распределение продольных скоростей не подчиняется существующим законам, имеет бочкообразную форму, здесь наблюдается погружение максимальной на вертикали скорости под уровень (кривые 1, 5). Наиболее сильное погружение (до половины глубины) наблюдается на вертикалях, расположенных в зонах пересекающих биссектрисы угла сечения.

Литература

1. Б.А.Фидман. Основные результаты экспериментального изучения структуры турбулентных потоков. Проблемы русловых процессов. – Л.: Гидрометеиздат. 1953. С138-150.
2. Н.И.Зайцев. Контактный метод измерения характеристик пространственной структуры макротурбулентности руслового потока. Труды ГГИ. Вып.306. -Л.: 1983. С. 15-35.
3. A.M.Mukhamedov, H.H.Ishanov, Kh.A.Kurbanov. Evaluation of the influence of river bed section shape and roughness upon stream kinematics characteristics and their consideration in hydraulic calculations of canals and models. XXIV JAHR CONGRESS Proctid. Madrid. Spain, 1991. С. p.139-148
4. A.M.Mukhamedov, H.H.Ishanov, Kh.A.Kurbanov. Kinematics effect of the stream secondary currents in the prismatic stable beds of the canals. International symposium East-West, North-South Encounter on the State-of-the-art in River Engineering Methods and Design Philosophies. State Hydrological Institute, St. Petersburg Russia, May 16-20, 1994
5. Х.А.Курбанов. Устойчивая форма поперечного сечения русла земляных каналов. В кн.: Актуальные проблемы гражданской защиты в современных условиях. Материалы научно-практической конференции., Ташкент, 5-6 декабря 2001 г., стр. 151-153.
6. Х.А.Курбанов. “Повышение огнестойкости многостержневых трубчатых металлических конструкций”. Пожаровзрывобезопасность, Ташкент. №1 2018 г. с.113-116.