

УДК 626.8

Метод определения расхода воды в открытых каналах

Кушер А.М.

ГНУ ВНИИГиМ Россельхозакадемии, г. Москва, Россия

Среди существующих бесконтактных методов измерения расхода воды в открытых искусственных и естественных руслах наиболее перспективными с точки зрения точности, универсальности и информативности являются ультразвуковые методы, основанные на измерении доплеровского сдвига частот излучаемого и отраженного от взвешенных в водном потоке частиц с плотностью отличной от плотности воды.

Для измерения расхода в малых водотоках могут применяться устанавливаемые на дне однолучевые доплеровские измерители, например Взлет ЗБП (ЗАО Взлет), ADS 3600 (FlowShark, Великобритания), Mainstream III (Mainstream Measurements Ltd, Великобритания) и GrayLine AVFM 5.0 (Grayline Instrumens Inc., США). Характерной особенностью однолучевых измерителей является необходимость задания геометрии русла и, главное, заранее неизвестного коэффициента коррекции показаний прибора, учитывающего профиль скорости потока вне рабочей зоны ультразвукового луча. Предварительные испытания измерителей расхода ADS 3600 и GreyLine AVFM 5.0 на экспериментальной установке лаборатории гидрометрии ВНИИГиМ показали зависимость показаний (и, соответственно, задаваемого вручную корректирующего расход коэффициента), от профиля скорости потока. Так, различие максимальных скоростей, измеренных микровертушкой и ADS 3600 на одноименных вертикалях, не превышало 3%, а разность заданного и измеренного расхода, вычисленного на основе принятого по МВИ 208/613-03 постоянного коэффициента $K_d = 1,5$, достигала 5,9%. Аналогичный вывод можно сделать из сообщения о влиянии подпора нижнего бьефа на показания расходомера данного типа [1].

Новой технологией измерения расхода в естественных руслах и каналах водохозяйственных систем является акустический доплеровский измеритель с расходящимся в форме веера пучком лучей (Acoustic Doppler Current Profiler-ADCP). В базовом варианте датчик включает две или три керамические антенны, формирующие узкие (1-3°) ультразвуковые лучи с фиксированным углом отклонения от центральной оси (25° для системы RiverSurveyor (SonTek, США), 20° - Rio Grande (RDI, США)) [2,3]. Предполагается, что скорость потока воды в пределах каждой ячейки по вертикали в пределах конуса, усеченного горизонтальными плоскостями постоянна, т.е. каждый луч измеряет скорость одного и того же объема воды. Расстояние измеренных значений скорости от датчика вычисляется по скорости ультразвука в воде и времени поступления отраженного сигнала. Для повышения точности измерений и расширения рабочего диапазона глубин разработаны датчики с увеличенным числом лучей (до 5-9) и с переменной частотой излучения (SonTek Inc).

Компоненты скорости потока в декартовой системе координат вычисляются по найденным скоростям вдоль лучей и известному углу отклонения лучей от центральной оси. Данные измерений преобразуются из аппаратной системы координат в местную или географическую систему с применением встроенного магнитного компаса или данных спутникового GPS приемника. Для точного учета

скорости ультразвука в воде используются датчики температуры и проводимости (солености).

Датчик системы может быть стационарно установлен вертикально на дне, горизонтально на стенке канала (на опоре моста) или на движущейся поперек потока платформе (судне). Горизонтальная установка, при которой используется двухлучевой датчик, имеет ряд существенных ограничений, касающихся места установки, допустимой глубины и ширины потока, что связано с V-образной геометрией лучей.

Наибольшее распространение получили ADCP системы, установленные на подвижной платформе. В процессе движения в направлении нормальном оси потока непрерывно измеряются глубина, профиль скоростей по вертикали и плановые координаты датчика. Для позиционирования платформы используется спутниковая GPS навигация. Расход вычисляется методом скорость - площадь по найденным значениям скорости и глубины при перемещении платформы поперек потока. На широких реках и каналах применяются каяки, ПВХ-лодки и катера, а на малых - датчик и платформа объединяются в единый блок, перемещаемый поперек потока с помощью троса.

Наряду с очевидными достоинствами ADCP-системы имеют существенный недостаток, связанный с наличием “мертвых зон”, то есть невозможностью выполнения измерений вблизи дна, на малом расстоянии от датчика и в прибрежной зоне. При измерениях с плавающей платформы высота слепой зоны у свободной поверхности, зависящая от заглубления датчика, длины области формирования луча и времени задержки переключения режимов работы (передача-прием), составляет 0.3-0.5 м. Искусственно формируемая придонная мертвая зона необходима для исключения области интерференции между сигналами основного и боковых лепестков диаграммы направленности. Для ADCP системы, предназначенной для работы в потоках глубиной до 20 м, её высота равна ~0.4 м. По результатам проведенных полевых испытаний потока общая площадь слепых зон в зависимости от реальной глубины может составлять 10-20% общей площади живого сечения потока.

Общим недостатком всех кросс-корреляционных и доплеровских измерителей расхода является зависимость результатов измерения расхода от задаваемого вручную профиля скоростей в мертвых зонах (для ADCP) или коэффициента коррекции (для однолучевых измерителей). Например, в ADCP всех производителей независимо от режима течения и формы русла предусмотрены только линейный и параболический (1/6) законы распределения скоростей, что не позволяет реализовать потенциальную точность измерителя и ограничивает область его применения. Для повышения точности оценки расхода необходим учет реального профиля скоростей в слепых зонах. Это требование особенно актуально при определении расхода в каналах водохозяйственных систем с более высокими, по сравнению с естественными водотоками, требованиями к точности измерений

Основным параметром, определяющим профиль скоростей в канале, является касательное напряжение на стенке. Экспериментальные исследования касательного напряжения на стенке и поля скоростей в прямоугольных, трапециевидных, треугольных закрытых и открытых водотоках показали наличие вторичных течений в зонах сопряжения боковых стенок с дном и свободной поверхностью. Заглубление максимума скорости в открытых каналах является следствием вторичных течений в зонах сопряжения боковых стенок и свободной поверхности.

Отсутствие влияния боковых стенок на профиль продольных скоростей имеет место только в осевом сечении канала при соотношении ширина-глубина канала больше 5-6.

Из экспериментальных исследований Гесснера следует, что главным источником вторичных потоков в зоне сопряжения дна и стенки является градиент касательного напряжения в направлении основного потока [4]. В настоящее время наиболее теоретически разработанной является модель Shiono и Knight'a (SKM), учитывающая вторичные вихревые течения [5]. Модель основана на решении осредненного уравнения Рейнольдса для равномерного течения в призматическом русле. Однако сопоставление расчета и эксперимента показало недостаточную точность указанной модели.

Основным положением второго направления исследований является допущение, что рассеивание избыточной энергии турбулентных пульсаций происходит на ближайшей к рассматриваемой точке стенке канала. Вторичные потоки в угловых зонах в расчете касательного напряжения не учитываются. Эта концепция подразумевает разделение поперечного сечения трапецеидального русла на две независимые в гидравлическом смысле области некоторой линией (часто биссектрисой угла при основании трапеции). Впервые этот прием для расчета гидравлики осредненного потока применили Keulegan С.Н. (1938 г.) и Einstein Н.А. (1942 г.). Y.Zheng и Yee-Chung Jin предложили полуэмпирическую модель расчета касательного напряжения, включая зону сопряжения дна и боковой стенки, на основе уравнения завихренности в продольном направлении и экспериментальных данных Tominaga, Nezu, Rajaratnam'a и Ahmadi [6]. Модель не учитывает заглабление максимума скорости при малых B/H . Аналогичный подход использован в работе A.R. Zarrati, Y.C. Yin и S.Karimporou для расчета касательного напряжения в прямом русле с трапецеидальным и комбинированным профилем поперечного сечения [7]. J. Guo и P. Julien для определения среднего касательного напряжения на дне и стенке канала применили метод конформного преобразования [8]. Для учета заглабления максимума скорости и уточнения касательного напряжения на стенке введен эмпирический корректив.

Указанная концепция наиболее полно реализована в работе S.Q. Yang'a [9]. Согласно Yang'у локальное местное касательное напряжение пропорционально соотношению площади между нормальными к периметру и длины элементарного участка периметра. Выражение для поля скоростей имеет вид

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \left[\ln \left(f \cdot \frac{h-y}{k_1} \right) + \alpha_1 \cdot \ln \left(\frac{y}{d} \right) \right], \quad (1)$$

где u - локальная скорость, κ - постоянная Кармана, α_1 - корректирующий коэффициент для учета заглабления максимума скорости, f - отношение локальной и динамической скорости на оси канала, u_* - динамическая скорость, вычисленная по энергетическому уклону канала, k_1 - расстояние от стенки при $u=0$, y - расстояние от свободной поверхности.

$$f = \frac{u_{*(z)}}{u_{*(2d)}}, \quad u_{*(z)} = \sqrt{\frac{\tau_z}{\rho}} - \text{ локальная динамическая скорость, } u_{*(2d)} - \text{ то же}$$

на оси канала, $k_1 = \frac{v}{9.9 \cdot u_{*(2d)}}$ - для гидравлически гладкого русла, $k_1 = \frac{k_s}{30}$ - для гидравлически шероховатого русла, k_s - эквивалентная высота выступов

шероховатости, $\alpha_1 = 1.3 \cdot e^{-\frac{z}{h}}$, где h - локальная глубина.

Как показали расчеты по модели Янга для трапецеидального канала, функция изменения местного касательного напряжения по периметру имеет пилообразный вид и не определена в области сопряжения дна и боковых стенок. Профиль скорости имеет нефизический вид. Учитывая, что в выражении (2) не учитывается расстояние до боковой стенки в точке расчета скорости, что противоречит принятой концепции, было принято решение о совершенствовании метода Yang'a [10]. В принятой модели профиль скорости вычисляется по нормальям к стенкам канала в зависимости от локального касательного напряжения. Затем производится интерполяция вычисленных скоростей в узлы координатной сетки, интегрирование скоростей в отдельных ячейках в пределах периметра канала и, далее, расчет профиля относительных скоростей, как отношений скорости в ячейках исходной сетки к средней скорости по сечению.

Для каналов водохозяйственных систем, имеющих преимущественно трапецеидальную форму, локальное касательное напряжение τ_y равно

$$\tau_y = \rho g i R_y,$$

где для нормалей между боковой стенкой и свободной поверхностью локальный гидравлический радиус R_y равен (α - внутренний угол между стенкой и поверхностью, β - внутренний угол между стенкой и дном, B_t - ширина канала по урезам воды):

$$R_y = \frac{(0.5B_t - y) \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{\cos(\alpha)}, \quad (2)$$

для нормалей между боковой стенкой и биссектрисой угла β :

$$R_y = \left(\frac{1}{\sin(\alpha)} - \frac{0.5B_t - y}{H \cdot \cos(\alpha)} \right) \cdot \operatorname{tg}(\beta) \cdot H, \quad (3)$$

для нормалей между дном и биссектрисой угла β :

$$R_y = \left(\frac{0.5B_t - y}{H} - \frac{1}{\operatorname{tg}(\alpha)} \right) \cdot \operatorname{tg}(\beta) \cdot H, \quad (4)$$

для нормалей между дном и свободной поверхностью:

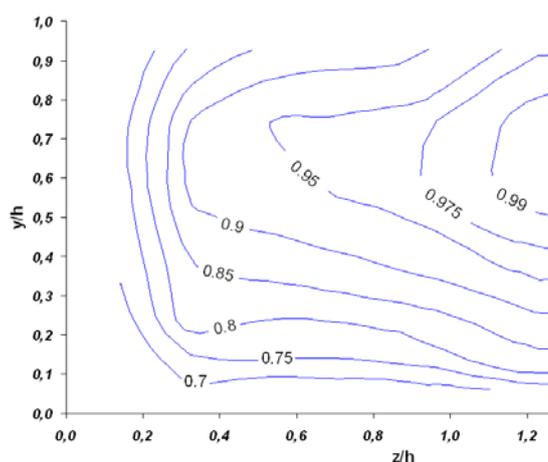
$$R_y = H. \quad (5)$$

Методика применения описанной модели для расчета расхода зависит от типа измерителя. Например, для одноканальной системы ADS 3600, измеряющей максимальную скорость на оси потока, поле скоростей и расход воды вычисляется по измеренной максимальной скорости и найденному расчетом профилю относительных скоростей. Для одноканальных измерителей, позволяющих определять одномерный профиль скорости вдоль луча, расчетными скоростями заполняются боковые слепые зоны. При измерениях с помощью ADCP профиль и значения скорости в слепых зонах вычисляются по нормальям к стенкам с учетом значений скорости на измерительных вертикалях и величин производных в точках сопряжения расчетных и измеренных скоростей. На рисунке 1 показаны результаты выполненных расчетов и экспериментальные профили скорости в прямоугольном и трапецеидальном канале из сторонних источников, подтверждающие достоверность разработанного метода [9,11]. Лабораторная проверка описанного метода выполнялась путем сопоставления экспериментального расхода воды в гидрометрическом лотке критической глубины

и расхода, найденного численным расчетом с учетом профиля потока в верхнем бьефе сооружения. Для анализа влияния формы профиля скоростей расчеты выполнялись в следующих режимах: 1) задана глубина в верхнем бьефе, профиль скорости не задан; 2) равномерный профиль; 3) параболический (1/7) профиль; 4) профиль относительных скоростей, найденный выше описанным методом. В первых трех случаях вычисленный расход отличался от экспериментального на 4-10%. При учете предыстории потока по описанной методике относительная погрешность расчета расхода составила 0.71%.

Применимость данного метода для повышения точности измерений расхода в естественном русле проверялась сопоставлением результатов расчета расхода описанным методом по данным измерений ADP Riversurveyor и расхода, вычисленного по данным измерений гидрометрической вертушкой ГР-21, выполненных на одном и том же контрольном створе. Место испытаний - р. Иртыш. Ширина реки по створу - ~0.4 км. При измерениях вертушкой вычисленный согласно нормативным документам Гидрометслужбы расход составил $Q=1860 \text{ м}^3/\text{с}$.

Измерение расхода с применением ADP проводилось на движущемся судне (катере) с GPS позиционированием на створе по заранее проложенному треку на компьютерной карте (рис.2). Расстояние исходной (стартовой) точки от берега определялось в моменты старта и финиша как разность ранее полученных плановых координат уреза воды и GPS-координаты датчика ADP. Общий расход через гидроствор является суммой измеренного расхода и 4-х дополнительных величин - расходов через участки между урезами воды и конечными точками галса, расходов через две слепые зоны: слой воды между поверхностью и верхней измерительной плоскостью высотой 0.4 метра и придонную область высотой 0.5 м. Значения скоростей в слепых зонах вычислены в соответствии с описанным выше методом. Расход через поперечник вычислялся как среднее по нескольким проходам в противоположных направлениях. Измеренный ADP расход (без слепых зон) $Q=1499.5 \text{ м}^3/\text{с}$, вычисленный расход в слепых зонах $Q=367.6 \text{ м}^3/\text{с}$, полный расход через гидроствор $Q=1867.1 \text{ м}^3/\text{с}$.



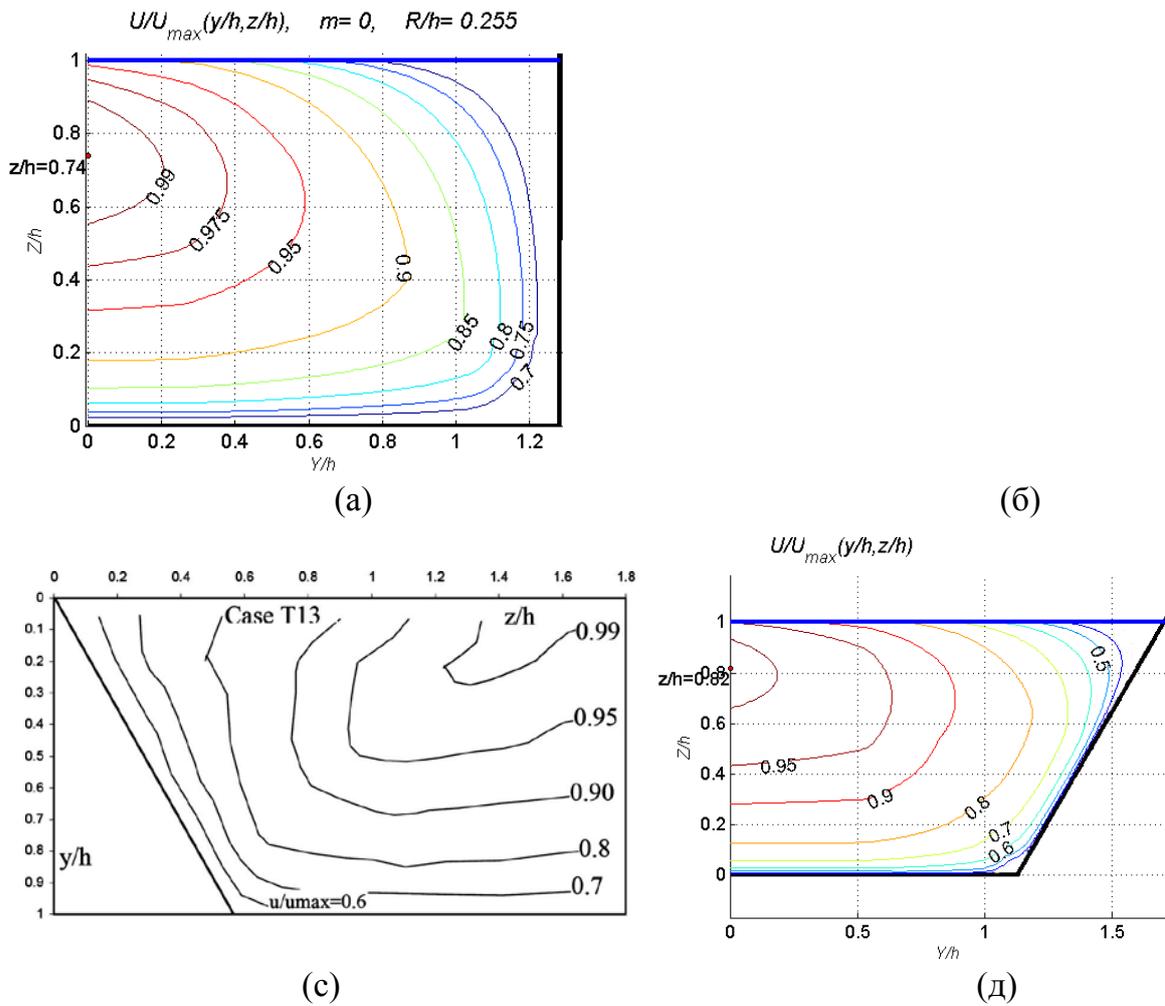


Рисунок 1 - Экспериментальный (а [9], с [11]) и расчетный (б, д) профиль скорости в прямоугольном и трапецидальном канале с идентичными гидравлическими и геометрическими параметрами



Рисунок 2 - Система ADP RiverSurveyor установлена на моторной лодке. На верхнем конце штанги - антенна GPS приемника, на нижнем - датчик системы

Выводы

1. Основным фактором, влияющим на точность измерения расхода воды в открытых руслах современными бесконтактными ультразвуковыми средствами,

является существование слепых зон, наличие которых обусловлено физическими причинами.

2. Разработанный способ и алгоритм для его реализации позволяет повысить точность определения расхода воды существующими ультразвуковыми средствами измерений путем учета профиля скоростей в слепых зонах.

3. Наиболее универсальным и точным средством измерения расхода воды в открытых руслах в настоящее время является акустический доплеровский профилограф течения ADCP на подвижной платформе, обеспечивающий максимальное соотношение измеренной и полной площади обследуемого поперечного сечения русла.

4. По сравнению со стандартным методом с применением гидрометрической вертушки использование ADCP многократно уменьшает трудоемкость определения расхода воды в открытом русле.

5. Проведенные расчеты и экспериментальные исследования на лабораторной модели и в речном русле подтвердили эффективность разработанного метода для повышения точности определения расхода воды в естественных и искусственных руслах, в том числе с помощью гидрометрического лотка и в комплексе с ADCP.

Литература

1. Вязьмин Ю. А., Фомин И. С. О границах применения рекомендаций МИ 2220-96. Водоснабжение и канализация, 1-2, 2011.
2. ADP Principles of Operation, SonTek Inc.
3. Workhorse Rio Grande ADCP, Teledyne RD Instruments.
4. Gessner F.B. "The Origin of Secondary Flow in Turbulent Flow Along a Corner". J. Fluid Mech., 1973, 58(1), 1-25.
5. Knight, D. W., Shiono, K. "Turbulent measurements in a shear layer region of a compound channel". J. Hydraul. Res., 1990, 28(2), 175-196.
6. Y.Zheng и Yee-Chung Jin. "Boundary Shear in Rectangular Ducts and Channels". J. Hydraul. Eng., 1998, 124(1), 86-89.
7. A.R. Zarrati, Y.C. Yin, S.Karimpour. "Semyanalytical Model for Shear Stress Distribution in Simple and Compound Open Channels". J. Hydraul. Eng., 2008, 134(2), 205-214.
8. J. Guo, P.Julien. "Shear Stress in Smooth Rectangular Open-Channel Flows". J. Hydraul. Eng., 2005, 131(1), 30-37.
9. . S.Q. Yang. "Depth-Averaged Shear Stress and Velocity in Open-Channel Flows". J. Hydraul. Eng., 2010, 136(11), 952-958.
- 10.A.M. Kusher. : Discussion of "Depth-Averaged Shear Stress and Velocity in Open-Channel Flows". J. Hydr. Eng., vol. 138, issue 10, 2012.
- 11.I.Nezu, A.Tominaga, H.Nakagawa "Field Measurements of Secondary Currents in Strait Rivers", J.Hydr.Eng., 1993, 119(5), 598-614.