

УДК 504.064.3

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДА ВОДЫ МАЛЫХ РЕК, ОСНОВАННЫЙ НА ОБРАБОТКЕ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЙ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ¹

© 2024 г. Д. А. Антоненков*

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011 Россия

**e-mail: dmitry_science@mail.ru*

Поступила в редакцию 22.02.2024 г.

После доработки 15.03.2024 г.

Принята к публикации 20.03.2024 г.

Рассмотрен экспресс-метод определения расхода воды, основанный на вычислении поверхностной скорости течения с использованием PIV-метода. Показаны методика выполнения измерений и алгоритм работы программного обеспечения для обработки видеоизображений водного потока. Приведены результаты натурных исследований, выполненных с помощью разработанного метода, а также итоги сличения результатов, полученных с применением стандартных методик. Разработанный метод позволяет получать оперативные данные о расходе воды в реке или канале без наличия дорогостоящих средств измерения и специально подготовленного персонала. Благодаря определению поля скоростей течения по всему поперечному створу исследуемого водного объекта метод дает возможность получить более точные данные о расходе, чем стандартные средства измерения (гидрометрические вертушки, поплавковый метод), работы с которыми выполняются точно на определенных станциях. Полученные данные о расходе воды могут использоваться для научного обоснования работ при проектировании берегозащитных, русло-регулирующих морских и речных сооружений, а также экологической оценки состояния водного объекта при изучении проблемы загрязнения воды. Использование данного метода на действующих гидрологических постах позволит оперативно определять расход воды в реках в дистанционном режиме с применением соответствующего оборудования, что особенно актуально в Крыму для оценки пикового стока в периоды высоких паводков и половодий.

Ключевые слова: расход воды, расчет стока, скорость течения, PIV-метод, методы визуализации, обработка изображений.

DOI: 10.31857/S0321059624060057 **EDN:** VOZVGX

ВВЕДЕНИЕ

При разработке систем рационального управления водными ресурсами, проектировании различных гидротехнических сооружений, расчета количества воды для населенных пунктов и нужд производства необходимы точные, оперативные данные о расходе воды – основной гидрологической характеристики любого водотока [5].

Для устьевой области рек характерно наличие возвратно-поступательного движения водных потоков, направление которых может быстро изменяться во времени. Получение оперативных

данных о количестве воды, протекающее в единицу времени через определенное сечение в обоих направлениях (баланс воды), – одна из задач экологического мониторинга.

Также непрерывный мониторинг расхода воды малых рек может помочь оперативно определить наличие несанкционированного забора воды и образование заторов в устье реки. В частности, это актуально для рек Крыма при разработке мероприятий по предупреждению и предотвращению разливов рек и затоплению прилегающих территорий во время паводков.

Применяемые на сегодняшний день методы определения расхода воды недостаточно оперативны, а также применяются в основном на оборудованных гидрометрических постах [6], сеть которых ограничена. В связи с этим актуально создание новых методов, которые позволят получать оперативную и достоверную информацию

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания (тема FNNN-2024-0016 “Исследование пространственно-временной изменчивости океанологических процессов в береговой, прибрежной и шельфовых зонах Черного моря под воздействием природных и антропогенных факторов на основе контактных измерений и математического моделирования”, шифр “Прибрежные исследования”).

о расходе воды в реках с применением экономически эффективных и простых в использовании технологий.

Для определения расхода воды существуют различные методы [4]. Наиболее распространен метод “скорость—площадь” [2]. Расход определяют как произведение площади его поперечного сечения и средней скорости течения.

Для расчета площади поперечного сечения реки измеряют ширину реки и ее глубину на разных расстояниях от берега с использованием гидрометрических штанг, лотлиней, профилографов [9] и другого оборудования.

Скорость течения речного потока определяется на разной глубине и на разных расстояниях от берега по поперечному профилю, так как в разных точках сечения она неодинакова [3]. Для определения скорости течения используют в основном гидрометрические вертушки [11]. Вертушку опускают в реку на тросе или на штанге и проводят измерения на разных горизонтах: в основном на глубине 0.2h и 0.8h. При глубине потока до 0.5 м допускается измерять скорость потока в одной точке на расстоянии 0.4h от дна или 0.6h от поверхности воды. При проведении первичной градуировки гидропостов или при плановых поверках, где требуется высокая точность, измерения проводятся пятиточечным способом. Для оперативного определения скорости течения применяется поплавковый метод [1], суть которого заключается в определении времени прохождения поплавка между двумя створами выше и ниже по течению реки. Зная расстояние между ними, определяют поверхностную скорость течения и далее с использованием поправочных коэффициентов вычисляют среднюю скорость по глубине. Помимо указанных выше, применяют и другие методы, например — измерения скорости течения реки с помощью ультразвука [4]. Принцип его заключается в следующем: под водой устанавливают возбудитель ультразвуковых колебаний, ниже по течению на некотором расстоянии от него — приемник этих колебаний. Далее проводят измерения скорости прохождения ультразвука сначала по течению, затем против течения. По разнице времени прохождения ультразвуковых колебаний по течению

реки и против течения вычисляют скорость течения. Ультразвуковой метод позволяет измерять скорость течения с берега и определять расход воды с любой дискретностью, но в одной точке пространства, что снижает точность определения скорости по поперечному сечению.

Реже используют метод смешения или химический метод [7]. Он заключается в том, что в речной поток добавляют определенный объем солевого раствора с известной концентрацией, а ниже по течению, где раствор уже хорошо перемешан с речной водой, отбирают пробу воды и определяют в ней концентрацию соли. По отношению концентрации соли в исходном растворе к концентрации в реке ниже по течению, а также с учетом его объема вычисляют расход воды в реке.

Метод “скорость—площадь” — основной в настоящее время для определения расхода воды в реках, однако используемые способы измерения скорости течения не позволяют оперативно получать натурные данные и требуют значительных финансовых и трудовых затрат.

Основная цель данной работы — показать возможности разработанного метода определения расхода воды в реке, отличительная особенность которого — определение скорости течения при помощи обработки видеоизображений водной поверхности. Данный метод позволяет оперативно получать экспресс-данные о расходе воды в реке с минимальными финансовыми и трудовыми затратами. Большое преимущество также — возможность его применения в дистанционном режиме.

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Сущность метода заключается в получении видеоизображений водной поверхности реки с необходимого ракурса с учетом разбивки створа на местности и профиля глубин для данного створа. Далее полученные видеофайлы обрабатываются при помощи специализированного программного обеспечения, определяется поле поверхностных скоростей течения, площадь створа и вычисляется расход реки по методу “скорость—площадь”.

Методика предполагает последовательное выполнение ряда этапов работ.

Первый этап. Выбор экспериментального участка на местности, разбивка створа, промерные работы

Для гидроствора выбирается прямолинейный бесприточный участок без валунов и водной растительности, с квазиоднородным, расчищенным от завалов профилем дна. Назначаются промерные вертикали, зависящие от ширины реки, но ≥ 20 . При ширине объекта < 5 м число промерных вертикалей выбирается так, чтобы расстояние между ними было ≤ 0.25 м. Также на данном этапе выполняется измерение расстояний (рис. 1), которые требуются при последующей программной обработке видеочертежей. Для этого на местности размечаются четыре реперные точки (рис. 1) с использованием краски, колышков или других подручных материалов.

Эти данные позволяют построить матрицу преобразования для пересчета расстояний и размеров на полученных изображениях в реальные единицы измерения [13] (рис. 2).

Второй этап. Регистрация видеоизображений поверхностного слоя воды

Видеосъемка выполняется камерой либо смартфоном, обеспечивающим минимальное разрешение съемки 1920×1080 точек (пикселей) и частоту кадров ≥ 24 к/с. Выбирается угол съемки $\sim 45^\circ$, чтобы в кадре был отображен полностью размеченный участок реки с реперными

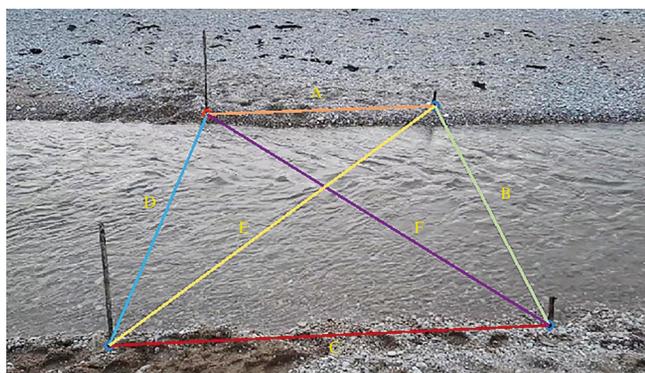


Рис. 1. Определение реперных расстояний на местности.

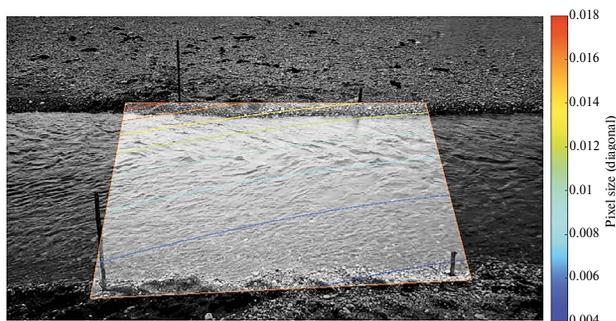


Рис. 2. Вычисление размера пикселя для исследуемой области.

ми точками. С учетом освещения место съемки выбирается так, чтобы колебания поверхности реки были визуально наиболее различимы (наилучшие результаты показала съемка против света). При слабом течении и в отсутствие видимых колебаний поверхности воды (когда поверхность “гладкая”) применяются маркеры, которые запускаются выше по течению по всей ширине створа.

Третий этап. Программная обработка видеоизображений с использованием программного обеспечения Matlab

Видеофайл разделяется на отдельные изображения, далее проводится их обработка для вычисления поля поверхностной скорости течения с помощью PIV-метода [12]. Данный метод основан на анализе смещения паттернов, представляющих собой неровности водной поверхности, за фиксированный интервал времени. Для определения скорости их смещения используется кросс-корреляция двух последовательных изображений, которые разделяются на фрагменты. Для каждого такого фрагмента рассчитывается кросс-корреляционная функция (1) и ищется ее максимум [10]:

$$C(m, n) = \sum_i \sum_j I_1(i, j) I_2(i + m, j + n), \quad (1)$$

$C(m, n)$ – величина кросс-корреляции для пикселя (m, n) ; $I_1(i, j)$ – яркость пикселя (i, j) первого фрагмента изображения; $I_2(i + m, j + n)$ – яркость пикселя $(i + m, j + n)$ второго фрагмента изображения.

По координатам максимума относительно центра фрагмента определяются направление

и величина смещения пикселей D ; далее, зная временную задержку между кадрами Δt , рассчитывают скорость течения [8]:

$$V = S \frac{D}{\Delta t}, \quad (2)$$

S – масштабный коэффициент для пересчета скорости пкс/с–м/с, который берется из матрицы преобразования.

Четвертый этап. Определение расхода воды по методу “площадь–скорость”

Расход воды Q в створе определяется как сумма расходов воды q_i между промерными вертикалями по формуле:

$$Q = \sum_{i=0}^n q_i, \quad q_i = k S_i v_i, \quad (3)$$

S_i – площадь поперечного сечения потока i -го участка, м²; v_i – поверхностная скорость течения для i -го участка, м/с. Для учета изменения скорости течения по глубине применяется коэффициент $k = 0.8$ [4], учитывающий шероховатость подстилающей поверхности.

Площадь S_i для участков в центральной части створа рассчитывается следующим образом:

$$S_i = \frac{(h_{k-1} + h_k) b_{k-1}}{2}, \quad (4)$$

у берегов вычисляется по формулам:

$$S_R = \frac{(h_0 + h_1) b_0}{2}, \quad S_L = \frac{h_k b_k}{2}, \quad (5)$$

где h – глубина на промерных вертикалях; b – расстояние между промерными вертикалями; b_0 и b_k – расстояния между крайними промерными вертикалями и урезами воды; k – номер промерной вертикали.

Апробация метода проходила при экспедиционных исследованиях на реках юго-западного Крыма: Черной, Бельбек, Каче – в течение 2020–2023 гг. Определение расхода воды в реках проводилось с использованием гидрометрической вертушки, поверхностных поплавков и разработанным методом видеорегистрации.

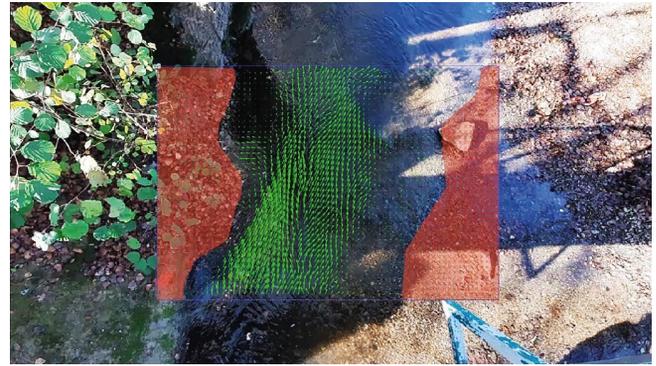
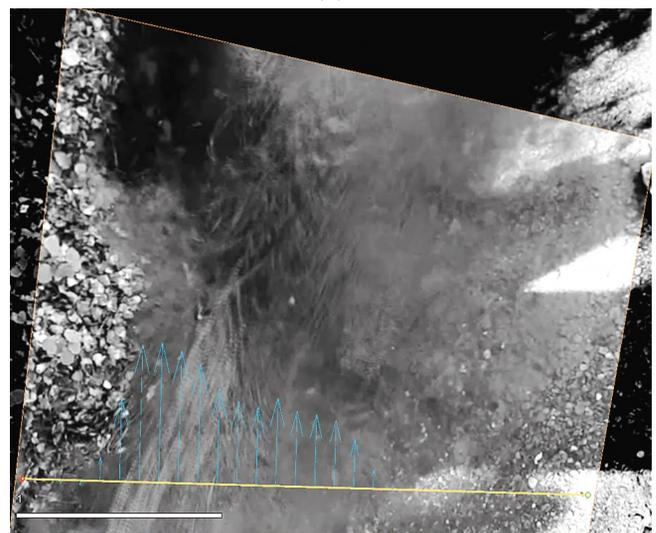


Рис. 3. Распределение скоростей потока р. Качи у гидропоста с. Суворово.

(а)



(б)

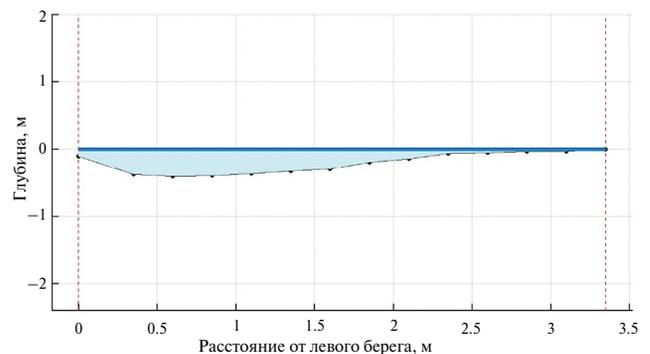


Рис. 4. Векторы средней скорости течения по каждому участку створа (а), профиль глубин (б) в створе р. Качи у с. Суворово.

Для примера на рис. 3 показано поле скоростей течения, построенное по результатам программной обработки видеоданных, полученных в ходе экспедиции в 2023 г.

Таблица 1. Расход воды, определенный разными методами

Метод измерения скорости потока	Расход воды, м ³ /с			
	р. Кача, у с. Суворово	р. Бельбек, у с. Фруктового	р. Бельбек, пляж	р. Черная, у с. Хмельницкого
Метод 1 (гидрометрической вертушкой)	0.25	0.42	0.55	1.25
Метод 2 (поверхностными поплавками)	0.30	0.49	0.42	2.09
Метод 3 (с помощью видеорегистрации)	0.27	0.37	0.48	1.29
Отклонение метода 3 от 1, %	8	11	12	3
Отклонение метода 2 от 1, %	20	17	23	67

На рис. 4 изображен размеченный створ, в котором проводились промерные работы. Выполнены расчеты средней скорости течения для каждого участка створа (рис. 4а), и построен профиль его глубин (рис. 4б). Определенный с помощью разработанного метода расход воды составил 0.27 м³/с, средняя скорость потока – 0.33 м/с.

Также в ходе данной экспедиции расход воды измерялся с помощью других методов с использованием гидрометрической вертушки и поверхностных поплавков. Сравнение результатов, полученных с помощью разных методов, показано в табл. 1. Разница результатов разработанного метода и стандартного, аттестованного метода с использованием гидрометрической вертушки – в среднем $\leq 12\%$ – это хороший результат, он может свидетельствовать о работоспособности нового метода. При этом измерения, выполненные с использованием поверхностных поплавков, показали худшие результаты.

ВЫВОДЫ

Таким образом, разработанный метод позволяет получать оперативные натурные данные о расходе воды в реке без использования специализированного, дорогостоящего оборудования. Данный метод может быть технически реализован для дистанционного, непрерывного мониторинга расхода воды в малых реках Крыма для оценки пикового сброса в условиях паводков и половодий. Выполненная апробация метода показала его работоспособность, расхождения со стандартными применяемыми методами в целом были $\leq 12\%$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бибенина Т.П.* Основы гидрометрии и гидрологии. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2010. 138 с.
2. *Лучшева А.А.* Практическая гидрометрия. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 424 с.
3. *Макаревич А.А., Яротов А.Е.* Речной сток и русловые процессы: пособие. Минск: БГУ, 2019. 115 с.
4. Методы измерения расхода воды на реках и каналах, в напорных трубопроводах насосных станций и оросительных систем. <http://cawater-info.net/library/rus/watlib/watlib-11-2015.pdf>. (дата обращения: 14.02.2024)
5. *Миньковская Р.Я.* Комплексные исследования разнотипных морских устьев рек (на примере морских устьев рек Северо-Западной части Черного моря). Севастополь: Морской гидрофизический ин-т РАН, 2020. 364 с. doi: 10.22449/978-5-6043409-2-9
6. Определение расхода воды методом смешения. https://ozlib.com/875808/tehnika/opredelenie_rashoda_vody_metodom_smesheniya#286 (дата обращения: 14.02.2024)
7. РД 52.10.842-2017. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 9. Гидрометеорологические наблюдения на морских станциях и постах. Ч. 1. Гидрологические наблюдения на береговых станциях и постах. М., 2017. 375 с.
8. *Сергеев Д.А.* Использование современных методов анемометрии по изображениям частиц (PIV-методов) при лабораторном моделировании геофизических течений // Вестн. Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4 (2). С. 522–524.
9. *Слабожанин Г.Д.* Гидрометрия: учебное пособие к самостоятельной работе по гидрологии по направлению подготовки бакалавров 270800 “Строительство”. Томск: Изд-во ТГАСУ, 2014. 58 с.

10. Хмелевой С.В. Использование GPU для расчетов скоростей газо-жидкостных сред с помощью метода PIV // Радиоэлектронные и компьютерные системы. 2012. № 6 (58). С. 124–129.
11. Dykman V.Z. Technical tools for studying structure and dynamics of water masses// Phys. Oceanogr. 2016. № 6 (192). P. 43–55.
doi: 10.22449/1573-160X-2016-6-43-55
12. Jahanmiri M. Particle Image Velocimetry: Fundamentals and Its Applications. Research Rep. 2011:03. Göteborg, Sweden: Department of applied mechanics, Chalmers Univ. Technol., 2011. 58 p.
13. Patalano A., García C.M., Rodríguez A. Rectification of Image Velocity Results (RIVeR): A simple and user-friendly toolbox for large scale water surface Particle Image Velocimetry (PIV) and Particle Tracking Velocimetry (PTV) // Computers Geosci. V. 109. December 2017. P. 323–330.

A METHOD FOR DETERMINING THE WATER DISCHARGE OF SMALL RIVERS BASED ON WATER SURFACE VIDEO IMAGES PROCESSING

D. A. Antonenkov

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, 299011 Russian Federation

e-mail: dmitry_science@mail.ru

An express method for determining water discharge based on calculating the surface flow velocity using the PIV method is considered. The method of performing measurements and the software operation algorithm for video images processing of a water stream are shown. The results of field studies performed using the developed method are presented, as well as the collation results obtained using standard techniques. The developed method makes it possible to obtain operational data on the water discharge data in a river or canal without expensive measuring instruments and specially trained personnel. Due to the determination of the flow velocity field along the entire transverse alignment of the studied water body, the method makes it possible to obtain more accurate water discharge data than standard measuring instruments (hydrometric turntables, float method), which are operated point-by-point at certain stations. The obtained data on water discharge can be used for scientific justification of work in the design of coastal protection, channel-regulating marine and river structures, as well as environmental assessment of the water body condition when studying the problem of water pollution. The use of this method at existing hydrological stations will make it possible to quickly determine the water discharge in rivers remotely using appropriate equipment, which is especially important in Crimea to assess peak runoff during the periods of high-water and floods.

Keywords: water discharge, calculation of river flow, flow velocity, PIV method, visualization methods, image processing