

Определение скорости течения водного потока с использованием методов визуализации

Д.А. Антоненков ¹

ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН»

¹ ORCID: 0000-0003-2601-7751, dmitry_science@mail.ru

Аннотация

Несмотря на многообразие средств измерения скорости течения, остается актуальным разработка новых и модификация существующих методов, которые позволят получать больше информации о динамике водного потока. В настоящее время все большую популярность набирают исследования потоков с использованием методов визуализации. В статье рассматривается разработанный автором измеритель скорости течения водного потока на основе PIV-метода, способный работать в натуральных условиях.

Использование в качестве трассеров природных частиц взвеси позволяет существенно ускорить выполнения экспериментов и снизить затраты на их выполнение, что является важным при работе в полевых условиях. Дано описание разработанной методики и технических средств для проведения измерений скорости течения. Приведены результаты, полученные в ходе натуральных испытаний.

Благодаря применению современных методов визуализации, созданный измеритель имеет ряд преимуществ по сравнению с другими приборами для исследований течений. В частности, он позволяет получать мгновенные и осредненные поля распределения скорости течения в широком пространственном и временном диапазоне.

Ключевые слова: скорость течения, динамика водного потока, обработка видеоизображений, PIV-метод, анемометрия по изображениям, методы визуализации.

Измерение скорости течения является важной задачей в области экологического мониторинга водных ресурсов. Такие данные необходимы при проектировании и строительстве гидротехнических сооружений, для исследований динамики водного потока, механизмов эрозии и движения наносов, анализе экологической ситуации.

Существует большое количество методов и технических средств для изучения структуры водного потока, основанных на различных физических принципах, например, акустические доплеровские профилометры ADCP, предназначенные для исследования пространственной и вертикальной структуры течений [1], которые могут применяться как в стационарном положении, так и в режиме буксировки [2, 3], приборы, использующие ультразвуковые технологии измерений [4, 5], измерители на основе электромагнитной индукции [6] и другие, подробный обзор которых сделан в работе [7]. Для рек наиболее распространенными считаются приборы, работа которых основана на регистрации числа оборотов лопастного винта – гидromетрические вертушки [8]. Они позволяют измерять скорость и направление течения на разных горизонтах. Среди экспресс-методов, можно выделить метод, основанный на регистрации скорости плывущего тела, с использованием различных поплавков [9], обладающий самой простой технической реализацией. Однако, несмотря на многообразие средств измерения скорости течения, остается актуальной разработка новых и модификация существующих методов, что позволит избежать некоторых ограничений в их применении, а также получать больше информации о динамике водного потока.

В настоящее время все более актуальным становится исследование потоков с использованием методов научной визуализации, одним из которых является PIV-метод (Particle Image Velocimetry). Данный метод широко применяется во многих областях, таких как автомобильная и авиастроительная промышленность, энергетика, в различных научных задачах, например, при моделировании процессов течений газа на поверхности твердых тел [10], для измерения скорости в выбранном сечении потока в гидро- и аэродинамических экспериментах [11, 12, 13], для изучения динамики векторных полей скорости и завихренности потока с использованием метода дымовой визуализации (SIV) [14, 15, 16]. Однако из-за сложной технической реализации, в большинстве случаев, его использование ограничено лабораторными условиями.

Основная цель работы состоит в том, чтобы показать возможности разработанных автором измерительных средств на основе PIV-метода для исследования водного потока в натуральных условиях.

Измерение скорости потока с помощью PIV-метода основано на анализе перемещения частиц, находящихся в плоскости сечения, за фиксированный интервал времени. Образы частиц подсвечиваются с помощью системы импульсной подсветки и регистрируются на цифровую камеру. Последующая обработка изображений позволяет рассчитать смещения частиц за время между вспышками источника света и построить двумерное векторное поле скорости [17].

Для определения скорости частиц используется кросс-корреляция двух последовательных изображений, которые разделяются на фрагменты. Для каждого такого фрагмента рассчитывается кросс-корреляционная функция (1) и ищется её максимум.

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

где $C(m, n)$ – величина кросс-корреляции для пикселя (m, n) ;

$I_1(i, j)$ – интенсивность пикселя (i, j) первого фрагмента изображения;

$I_2(i + m, j + n)$ – интенсивность пикселя $(i + m, j + n)$ второго фрагмента изображения;

Для расчета корреляционной функции применяется стандартный алгоритм быстрого преобразования Фурье. Для одинаковых по координатам фрагментов двух изображений, снятых через момент времени Δt , находятся их частотные представления с помощью быстрого преобразования Фурье. Далее производится комплексное умножение результатов преобразования, после чего выполняется обратное преобразование Фурье. Затем находится максимум кросс-корреляционной функции [18]. Для более точного определения координат максимума используется стандартная процедура гауссовой интерполяции главного пика [19].

По координатам максимума относительно центра фрагмента определяется направление, и величина смещения пикселей D и далее, зная временную задержку между кадрами Δt , рассчитывается скорость перемещения частиц [20]:

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

где S – масштабный коэффициент для пересчета скорости в м/сек.

Технически, классическая схема PIV-метода реализуется с использованием мощных импульсных лазеров (1–10 МВт) и синхронной видеосъемки специально применяемых для этого PIV-камер [21]. Однако реализация таких схем в натуральных условиях затруднительна, в связи с чем PIV-метод в основном применяется в лабораторных условиях.

Для исследования динамики водного потока в натуральных условиях был специально разработан измеритель, состоящий из устройства подсветки, цифровой видеокамеры, элементов крепления/позиционирования и программного обеспечения для обработки данных. Его схема и фотография представлены на рисунке 1.

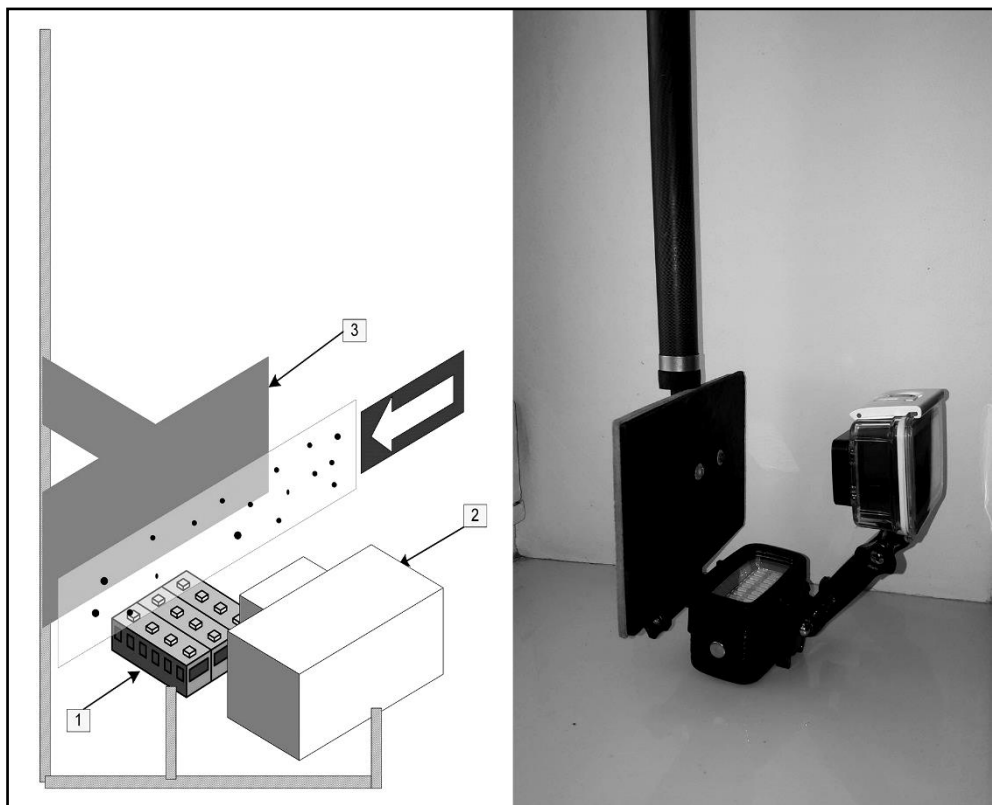


Рисунок 1 – Схема и фотография измерителя скорости течения.

В качестве подсветки использовался герметичный источник света – 1, с 20 светодиодами SMD 5730 общей мощностью 20Вт, обеспечивающих световой поток в 2200 Лм. Движение частиц в потоке регистрировалось с помощью цифровой камеры YI4K+, размещаемой в водонепроницаемом боксе – 2. Основные характеристики, которой представлены в таблице 1 [22].

Таблица 1 – Основные технические характеристики цифровой камеры.

Чипсет:	Ambarella H2 SOC
Процессор:	Cortex-A53 ARM
Рабочая температура:	0 – 45 °С
Время работы от аккумулятора:	120 мин
Тип матрицы:	CMOS
Сенсор:	Sony IMX377
Число пикселей матрицы:	12 мегапикселей
Физический размер матрицы:	1/2,3
Видео 4К:	60 кадров/с
Видео 1080р:	120 кадров/с
Видео 720р:	240 кадров/с
Универсальный разъем:	USB Type-C
Поддержка карт памяти:	MicroSD, MicroSDHC
Крепление камеры:	винт 1/4
Тип батареи:	съемная, 1400 мА·ч

Использование данной камеры обусловлено ее компактными размерами, высоким разрешением и максимальной, для данного класса камер, кадровой частотой в 240 к/с. Штатный объектив был заменен на специализированный, обладающий улучшенными

характеристиками, которые представлены в таблице 2 [23]. Основным его преимуществом является высокое разрешение, минимизация оптических искажений и возможность получить требуемую дистанцию фокусировки в ручном режиме.

Таблица 2 – Технические характеристики объектива.

Фокусное расстояние	3,4 мм
Диафрагма	f/2,8
Оптическое разрешение	20 Мп
Угол съемки по горизонтали	90°
Материал линз	стекло
Оптические искажения	без искажений $\leq 0,5\%$
Количество элементов	8
Фокусировка	ручная
Минимальная дистанция фокусировки	0 мм, фокусировка на поверхности линзы
BFL	3 мм
Фильтр	IR

Для позиционирования по направлению потока применялась специальная лопасть-пластина – 3, которая также выполняла роль экрана для получения более контрастных изображений частиц (для этой цели она была покрашена в черный матовый цвет).

Методика выполнения натурального эксперимента заключалась в следующем: первоначально производилась настройка системы, которая включала в себя, фокусировку в заданной области (размер регистрируемой области 150x100 мм), настройку режима работы камеры (выбор параметров съемки: разрешения и частоты кадров), включение подсветки для работы в непрерывном режиме с максимальной мощностью. Также производилась съемка калибровочного кадра, для последующего определения масштабного коэффициента S (2). Далее измеритель опускался в воду на заданный горизонт с использованием телескопической штанги. Для работы на каждой станции выбирались три горизонта: поверхность, середина глубины по станции и придонная область. Благодаря использованию специальной пластины (рисунок 1), выполняющей роль флюгера и размещенного у основания штанги вертлюга, установка разворачивалась по направлению течения потока, позволяя производить видеосъемку в его продольном сечении.

В разработанном измерителе физическим принципом визуализации частиц является регистрация рассеянного ими света. В классический PIV-методе используются специальные частицы – трассеры, однако применение данной технологии в полевых условиях является затруднительным и требует достаточно большого времени на подготовку и выполнение каждого измерения, а также большое количество расходных материалов. В соответствии с этим в качестве трассеров использовались уже имеющиеся в потоке природные частицы взвеси, что позволило значительно упростить технологию выполнения эксперимента и снизить затраты на их выполнение. В качестве примера на рисунке 2 показан фрагмент одного кадра из видеоданных, полученных с помощью созданного измерителя при выполнении экспедиционных исследований в устье р. Черной, 2019 г. Регистрация выполнялась на верхнем горизонте в приповерхностной области. На рисунке виден специальный элемент, который расположен на пластине для дополнительной градуировки при последующем анализе.



Рисунок 2 – Пример кадра полученного видеозображения.

Полученные, с помощью разработанного комплекса, видеоданные подвергались программной обработке в несколько этапов. На первом этапе выполнялась предварительная обработка видеофайла, которая включала гамма-коррекцию, настройку контраста, яркости изображения и выполнение бинаризации для получения резких изображений частиц взвеси находящейся в фокусе. На рисунке 3 показан результат обработки, приведенного выше, кадра видеоряда.



Рисунок 3 – Итоговый кадр после предварительной обработки.

Далее видеофайл разделялся на последовательные кадры с помощью прикладного программного обеспечения. Временной интервал между кадрами составлял 4 мс в соответствии с характеристиками и настройками оборудования. В итоге формировался массив изображений в формате **jpg*. Следующим этапом являлась кросскорреляционная обработка пар последовательных изображений, описанная выше.

С целью увеличения точности измерений применялась итерационная процедура. Ее суть заключалась в следующем: в первой итерации использовались относительно большие фрагменты для более точного расчета смещения (чем больше фрагмент, тем лучше соотношение сигнал/шум и тем более устойчива перекрестная корреляция). Однако большие фрагменты дают низкое векторное разрешение. Поэтому в следующих итерациях брался фрагмент в два раза меньше размером. Информация о смещении фрагмента при первом проходе использовалась для расчета смещения во второй итерации и так далее. Эта процедура обеспечивает высокое векторное разрешение и хорошее соотношение сигнал/шум и соответственно точность измерений.

Для обработки, полученных в ходе экспериментов, изображений использовались фрагменты размером 256×256 пикселя в первой итерации и 128×128 пикселя во второй итерации. В результате были построены мгновенные поля скорости течения для каждого горизонта. В качестве примера на рисунках 4–6 приведены изображения с построенным мгновенным полем скорости течения для трех горизонтов (поверхностный, средний и придонный слой) станции №8, створа №4, полученные в экспедиционных исследованиях в устье р. Черной, г. Севастополь в 2019 г. Исследования выполнялись в области смешения морской и речной воды, для которой характерна нестабильная структура течения. Наибольшие значения скорости наблюдались в поверхностном слое. Кроме того, течение периодически меняло направление на противоположное, что было зафиксировано при выполнении измерений в среднем слое, рисунок 5. Для придонного слоя, характерно наличие турбулентных процессов, которые благодаря применению разработанного измерителя можно визуализировать и описать (рисунок 6).

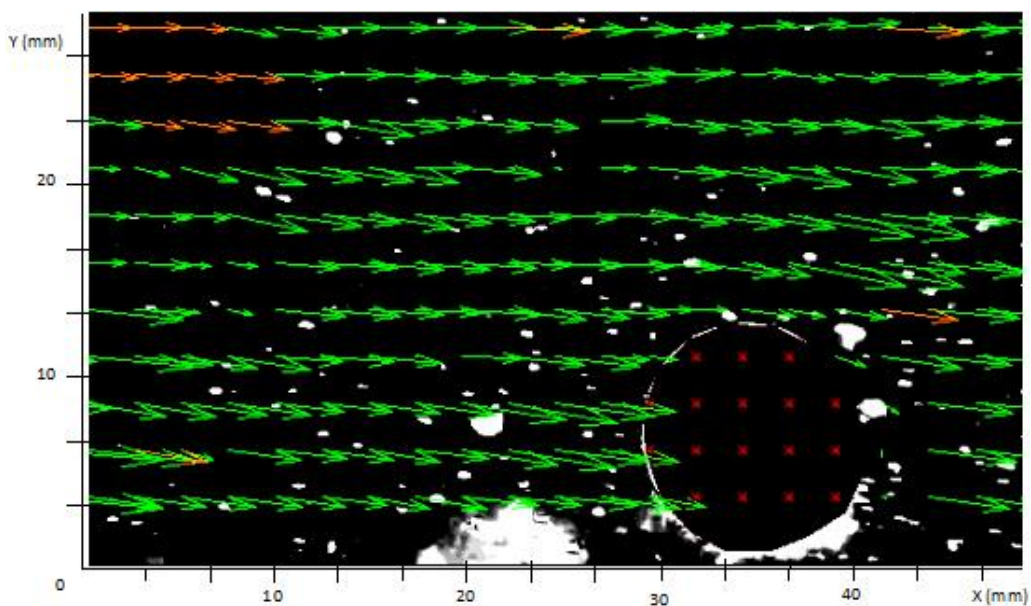


Рисунок 4 – Построенное мгновенное поле скорости течения в поверхностном слое.

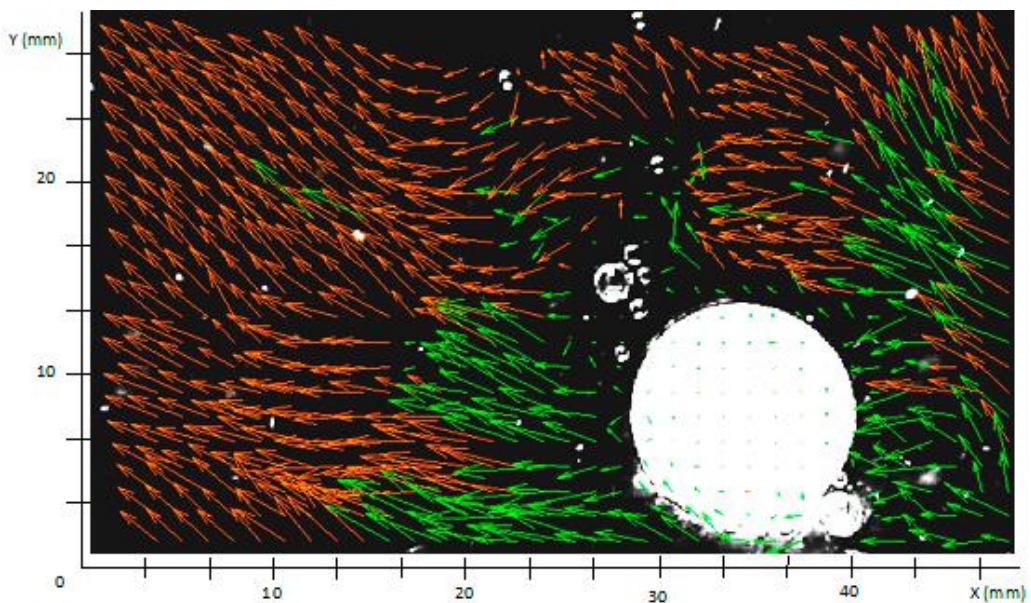


Рисунок 5 – Построенное мгновенное поле скорости течения в среднем слое.

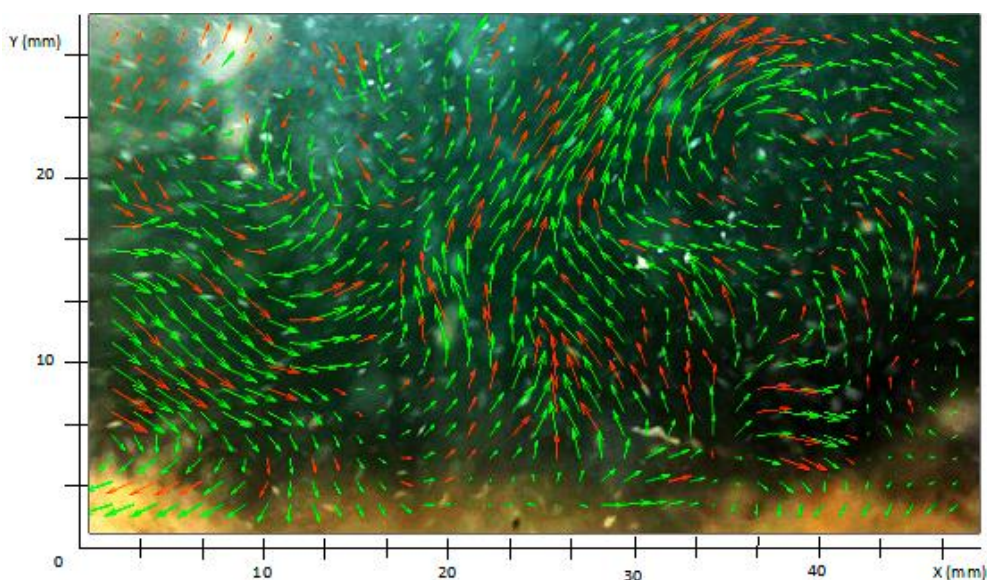


Рисунок 6 – Построенное мгновенное поле скорости течения в придонном слое.

Статистическое осреднение полученных полей позволяет получить среднее значение скорости течения для каждого горизонта, что необходимо для решения различных задач экологического мониторинга. На рисунке 7 представлена гистограмма распределения средней скорости течения водного потока для придонного слоя. По результатам расчетов значение средней скорости составило 0,05 м/с.

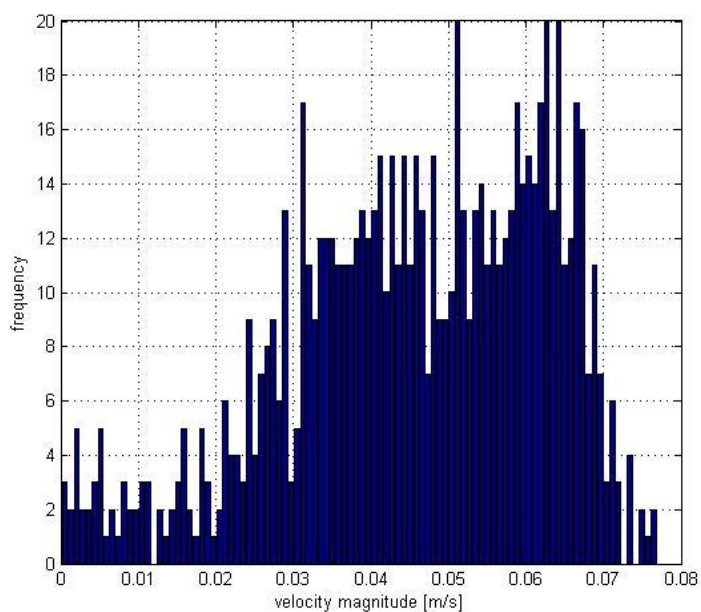


Рисунок 7 – Гистограмма распределения средней скорости течения водного потока.

Для верификации полученных данных, параллельно выполнялись аналогичные эксперименты по определению скорости течения с использованием биофизического комплекса «Кондор» («НПП «Аквастандарт», ТУ 431230-006-00241904-2015; код ТН ВЭД ЕАЭС 9027 50 000 0. Декларация соответствия ЕАЭС N RU Д-РУ.ЭМ03.А.00096/19) [24, 25], имеющего в своем составе гидрометрическую вертушку.

Результаты исследований обоими методами хорошо совпадают, расхождения не превышают 9 %. Это подтверждает достоверность и достаточно высокую точность получаемых данных.

Таким образом, разработанный измеритель, позволяет выполнять натурные эксперименты по определению скорости течения и получать данные о динамике водного потока с амплитудами скоростей до 2 м/с. Применение в его составе стандартных комплектующих делает его более простым в обслуживании и эксплуатации. Проведенные натурные испытания в рамках экспедиционных исследований в устье р. Черной, г. Севастополь показали хорошие результаты.

Благодаря применению современных методов визуализации, созданный измеритель имеет ряд преимуществ по сравнению с другими приборами для исследований течений. В частности, он позволяет получать мгновенные и осредненные поля распределения скорости течения в широком пространственном и временном диапазоне, благодаря чему его можно использовать для исследования сложных турбулентных течений, процессов переноса донных наносов, что в свою очередь дает возможность получить более детальное представление о характере природных процессов и их особенностях.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2019-0004 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей».

Список литературы

1. *Morozov A.N., Lemeshko E.M.* Methodical aspects of the application of acoustic doppler current profilers in the black sea // *Physical Oceanography*, 2006. №16 (4). P. 216–233.
2. *Сабинин К.Д., Серебряный А.Н.* Применение акустических доплеровских профилеметров течений для изучения пространственной структуры морской среды // *Акустический журнал*. 2012, т.58, № 5. С. 639–648.
3. *Gartner J.* Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay // *California: Marine Geology*. 2004, v.211. P. 169–187.
4. *Чанг Х.С.* Ультразвуковой способ измерения скорости течения (варианты). Патент на изобретение RU 2193208 С2, 20.11.2002. Заявка № 99118673/28 от 25.08.1999.
5. *Бендерский Г.П., Вылежанин И.С., Вылежанина О.В., Корнеев А.Н., Пономаренко А.И., Пушкин А.А.* Ультразвуковой способ измерения скорости течения и расхода воды в открытых водоемах. Патент на изобретение RU 2664456 С2, 20.08.2018. Заявка № 2016145752 от 22.11.2016.
6. *Дыкман В.З., Ефремов О.И., Барабаш В.А.* Устройство для измерения пульсаций скорости потока электропроводной жидкости. Патент на изобретение RU 2548126 С1, 10.04.2015. Заявка № 2014151935/93 от 18.12.2014.
7. *Dykman V.Z.* Technical tools for studying structure and dynamics of water masses // *Physical oceanography*. 2016, № 6 (192). P. 43–55.
8. *Клименко Д.Е.* Развитие гидрометрических вертушек в России и за рубежом // *Географический вестник*. 2010, № 2 (13). С. 64–76.
9. *Быков В.Д.* Гидрометрия / В.Д. Быков, А.В. Васильев // Л.: Гидрометеиздат, 1977. 448 с.
10. *Мошаров В.Е., Радченко В.Н.* Новый метод визуализации течений на поверхности аэродинамических моделей // *Датчики и системы*. 2010, № 5. С. 48–53.
11. *Скорнякова Н.М., Сычев Д.Г., Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э.* Визуализация вихревых структур методом анемометрии по изображениям частиц // *Научная визуализация*. 2015, Т. 7. № 3. С. 15–24.
12. *Гобызов О.А., Ложкин Ю.А., Ганиев Ю.Х., Захаров Е.П., Филиппов С.Е.* Исследование поля потока в рабочей части сверхзвуковой аэродинамической трубы методом анемометрии по изображениям частиц // *Космонавтика и ракетостроение*. 2014, № 4 (77). С. 26–33.

13. *Евтихиева О.А., Шашкова И.А., Скорнякова Н.М.* Визуализация пленочного течения жидкости методом анемометрии по изображениям частиц // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. 2015, № 3. С. 71–73.
14. *Biswas S.* Schlieren Image Velocimetry (SIV). In: Physics of Turbulent Jet Ignition. Springer Theses (Recognizing Outstanding Ph.D. Research). Springer, Cham. 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76243-2_3
15. *Hargather, M.J., et al.*: Seedless velocimetry measurements by Schlieren Image Velocimetry. AIAA J. 2011, 49(3), P. 611–620.
16. *Знаменская И.А., Коротеева Е.Ю., Глазырин Ф.Н.* Методы цифрового анализа изображений жидких и газоплазменных потоков на основе кросскорреляционной обработки // Научная визуализация. 2018, т. 10, № 4. С. 100–108.
17. *Jahanmiri M.* Particle Image Velocimetry: Fundamentals and Its Applications. Research report 2011:03. Department of applied mechanics, Chalmers university of technology, Göteborg, Sweden. 2011. 58 p.
18. *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.
19. *Сергеев Д.А.* Измерительный комплекс для исследования течений жидкости методом пробы частиц на основе твердотельного лазера с диодной накачкой // Приборы и техника эксперимента. 2009, №3. С. 138–144.
20. *Ахметбеков Е.К., Бильский А.В., Ложкин Ю.А., Маркович Д.М., Токарев М.П., Тюрюшкин А.Н.* Система управления экспериментом и обработки данных, полученных методами цифровой трассерной визуализации (ActualFlow) // Вычислительные методы и программирование. 2006, №7. С. 79–85.
21. *Сергеев Д.А.* Использование современных методов анемометрии по изображениям частиц (PIV-методов) при лабораторном моделировании геофизических течений // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011, № 4 (2). С. 522–524.
22. Технические характеристика камеры Yi4k+ [Электронный ресурс]. URL: <http://yitechnology.ru/actioncamera/specs/id/11> (дата обращения 09.06.2020).
23. Объектив 3,4mm DUO с регулировкой фокуса для Yi4K/4K+ [Электронный ресурс]. URL: https://www.pixaero.pro/catalog/pixaerolens/dlya_yi/obektiv_3_4mm_duo_s_regulirovkoj_rezkosti_dlya_ekshn_kamer_yi (дата обращения 09.06.2020).
24. *Chepyzhenko A. A., Chepyzhenko A. I.* Methods and device for in situ total suspended matter (TSM) monitoring in natural waters' environment, Proc. SPIE 10466, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 104663G (30 November 2017); doi: 10.1117/12.2287127
25. *Chepyzhenko A. I., Chepyzhenko A. A.* Methods and device for in situ dissolved organic matter (DOM) monitoring in natural waters' environment, Proc. SPIE 10466, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 104663S (30 November 2017); doi: 10.1117/12.2287797

Water flow speed determining using visualization methods

D.A. Antonenkov¹

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

¹ ORCID: 0000-0003-2601-7751, dmitry_science@mail.ru

Abstract

Despite the variety of means for measuring the flow velocity, it remains relevant to develop new methods and modify the existing ones that will make it possible to obtain more information about the dynamics of the water flow. Currently, flows studies using visualization methods are gaining more and more popularity. The article discusses the developed by the author of the water velocity meter based on the PIV method, capable of working in natural conditions.

The use of natural suspended matter particles as tracers can significantly accelerate the experiments performance and reduce the cost of there implementation, which is important while working in the field. A description of the developed methodology and technical means for measuring the flow velocity is given. The results obtained during field tests are presented.

Owing to the modern visualization methods use, the created meter has a number of advantages in comparison with other devices for flow studies. In particular, it makes it possible to obtain instantaneous and averaged fields of the flow velocity distribution in a wide spatial and temporal range.

Keywords: flow velocity, water flow dynamics, video processing, PIV method, image anemometry, visualization methods.

References

26. *Morozov A.N., Lemeshko E.M.* Methodical aspects of the application of acoustic doppler current profilers in the Black sea // *Physical Oceanography*, 2006. №16 (4). P. 216–233.
27. *Sabinin K.D., Serebryany A.N.* The use of acoustic Doppler current profilometers for studying the spatial structure of the marine environment // *Akusticheskiy zhurnal [Acoustic Journal]*, 2012, Vol. 58, No. 5. pp. 639–648. (in Russian)
28. *Gartner J.* Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay // *California: Marine Geology*. 2004, Vol. 211. P. 169–187.
29. *Chang H.S.* Ul'trazvukovoy sposob izmereniya skorosti techeniya [Ultrasonic method for measuring the flow velocity (options)]. Patent RF 2193208 C2, 11.20.2002. Application No. 99118673/28 of 08/25/1999. (in Russian)
30. *Bendersky G.P., Vylegzhanin I.S., Vylegzhanina O.V., Korneev A.N., Ponomarenko A.I., Pushkov A.A.* Ul'trazvukovoy sposob izmereniya skorosti techeniya i raskhoda vody v otkrytykh vodoyemakh. [Ultrasonic method for measuring the flow velocity and water flow in open waters]. Patent RF 2664456 C2, 08.20.2018. Application No. 2016145752 dated 11/22/2016. (in Russian)
31. *Dykman V.Z., Efremov O.I., Barabash V.A.* Ustroystvo dlya izmereniya pul'satsiy skorosti potoka elektroprovodnoy zhidkosti. [A device for measuring the pulsations of the conductive fluid flow velocity]. Patent RF 2548126 C1, 04/10/2015. Application No. 2014151935/93 dated 12/18/2014. (in Russian)
32. *Dykman V.Z.* Technical tools for studying structure and dynamics of water masses// *Physical oceanography*. 2016, № 6 (192). P. 43–55.

33. *Klimenko D.E.* Razvitiye gidrometricheskikh vertushek v Rossii i za rubezhom [The development of hydrometric turntables in Russia and abroad] // *Geograficheskiy vestnik* [Geographical Bulletin]. 2010, No. 2 (13). pp. 64–76. (in Russian)
34. *Bykov V.D.* *Gidrometriya* [Hydrometry] / V.D. Bykov, A.V. Vasiliev // L.: *Gidrometeoizdat*, 1977, 448 p. (in Russian)
35. *Mosharov V.E., Radchenko V.N.* Novyy metod vizualizatsii techeniy na poverkhnosti aerodinamicheskikh modeley [A new method for visualizing flows on the surface of aerodynamic models] // *Datchiki i sistemy* [Sensors and Systems]. 2010, No. 5. pp. 48–53. (in Russian)
36. *Skorniyakova N.M., Sychev D.G., Varaksin A.Yu., Romash M.E.* Vizualizatsiya vikhrevykh struktur metodom anemometrii po izobrazheniyam chastits [Visualization of vortex structures by anemometry using particle images] // *Nauchnaya vizualizatsiya* [Scientific Visualization]. 2015, Vol. 7. No. 3. pp. 15–24. (in Russian)
37. *Gobyzov O.A., Lozhkin Yu.A., Ganiev Yu.Kh., Zakharov E.P., Filippov S.E.* Issledovaniye polya potoka v rabochey chasti sverkhzvukovoy aerodinamicheskoy trubyy metodom anemometrii po izobrazheniyam chastits [Investigation of the flow field in the working part of a supersonic wind tunnel by anemometry using particle images] // *Kosmonavtika i raketostroyeniye* [Cosmonautics and rocket science]. 2014, No. 4 (77). pp. 26–33. (in Russian)
38. *Evtikhieva O.A., Shashkova I.A., Skorniyakova N.M.* Vizualizatsiya plenochnogo techeniya zhidkosti metodom anemometrii po izobrazheniyam chastits [Visualization of the film fluid flow by anemometry using particle images] // *Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute. Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta* [Bulletin of MPEI]. 2015, No. 3. pp. 71–73. (in Russian)
39. *Biswas S.* Schlieren Image Velocimetry (SIV). In: *Physics of Turbulent Jet Ignition. Springer Theses (Recognizing Outstanding Ph.D. Research)*. Springer, Cham. 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76243-2_3
40. *Hargather, M.J., et al.*: Seedless velocimetry measurements by Schlieren Image Velocimetry. *AIAA J.* 2011, 49(3), P. 611–620.
41. *Znamenskaya I.A., Koroteeva E.Yu., Glazyrin F.N.* Metody tsifrovogo analiza izobrazheniy zhidkikh i gazoplazmennyykh potokov na osnove krosskorrelyatsionnoy obrabotki [Methods for digital analysis of images of liquid and gas-plasma flows based on cross-correlation processing] // *Nauchnaya vizualizatsiya* [Scientific visualization]. 2018, Vol. 10, No. 4. P. 100–108. (in Russian)
42. *Jahanmiri M.* Particle Image Velocimetry: Fundamentals and Its Applications. Research report 2011:03. Department of applied mechanics, Chalmers university of technology, Göteborg, Sweden. 2011. 58 p.
43. *Khmelevoy S.V.* Ispol'zovaniye GPU dlya raschetov skorostey gazo-zhidkostnykh sred s pomoshch'yu metoda PIV [Using GPU for calculating the velocities of gas-liquid media using the PIV method] // *Radioelektronnyye i komp'yuternyye sistemy* [Radio-electronic and computer systems]. 2012, № 6 (58). pp. 124–129. (in Russian)
44. *Sergeyev D.A.* Izmeritel'nyy kompleks dlya issledovaniya techeniy zhidkosti metodom probny chastits na osnove tverdotel'nogo lazera s diodnoy nakachkoy [A measuring complex for studying fluid flows by the particle probe method based on a diode-pumped solid-state laser] // *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and experimental technique]. 2009, №3. pp. 138–144. (in Russian)
45. *Akhmetbekov E.K., Bilskiy A.V., Lozhkin Yu.A., Markovich D.M., Tokarev M.P., Tyuryushkin A.N.* Sistema upravleniya eksperimentom i obrabotki dannykh, poluchennykh metodami tsifrovoy trassernoy vizualizatsii [Experiment control system and data processing obtained by digital tracer visualization methods (ActualFlow)] // *Vychis-*

- litel'nyye metody i programmirovaniye [Computational methods and programming]. 2006, No. 7. pp. 79–85. (in Russian)
46. *Sergeyev D.A.* Ispol'zovaniye sovremennykh metodov anemometrii po izobrazheniyam chastits (PIV-metodov) pri laboratornom modelirovanii geofizicheskikh techeniy [The use of modern methods of anemometry from particle images (PIV methods) in laboratory modeling of geophysical currents] // Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo [Bulletin of Nizhny Novgorod University. N.I. Lobachevsky]. 2011, No. 4 (2). pp. 522-524. (in Russian)
 47. The Yi4k+ camera technical specifications Available at: <http://yitechnology.ru/actioncamera/specs/id/11> (accessed 09.06.2020). (in Russian)
 48. The 3.4 mm DUO lens with focus adjustment for Yi4K / 4K +. Available at: https://www.pixaero.pro/catalog/pixaerolens/dlya_yi/obektiv_3_4mm_duo_s_regulirovkoy_rezkosti_dlya_ekshn_kamer_yi (accessed 09.06.2020).
 49. *Chepyzhenko A. A., Chepyzhenko A. I.* Methods and device for in situ total suspended matter (TSM) monitoring in natural waters' environment, Proc. SPIE 10466, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 104663G (30 November 2017); DOI: 10.1117/12.2287127
 50. *Chepyzhenko A. I., Chepyzhenko A. A.* Methods and device for in situ dissolved organic matter (DOM) monitoring in natural waters' environment, Proc. SPIE 10466, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 104663S (30 November 2017); DOI: 10.1117/12.2287797