

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ ВОДНОГО ПОТОКА В ПРИБРЕЖНОЙ МОРСКОЙ ЗОНЕ

Д. А. АНТОНЕНКОВ

*Морской гидрофизический институт РАН, 299011, Севастополь, Россия  
E-mail: dmitry\_science@mail.ru*

Разработан измерительный комплекс, предназначенный для исследования структуры течения водного потока, основанный на использовании метода анемометрии по изображениям частиц. Дано описание основных элементов комплекса и показан принцип его работы. Благодаря использованию современных методов визуализации созданный комплекс дает возможность получать не только скорость в определенной точке водного пространства, но и поля распределения скорости течения в различном пространственном и временном диапазоне.

**Ключевые слова:** *скорость течения, поля распределения скорости, PIV-метод, анемометрия по изображениям*

В настоящее время, в условиях возрастания антропогенной нагрузки на прибрежные территории, все большее внимание уделяется экологическому мониторингу водной среды. Выполняются комплексные исследования различных процессов, определяющих функционирование экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей [1, 2]. Для этой цели разрабатываются мультипараметрические комплексы. Одними из основных компонентов таких комплексов являются модули, основной задачей которых является определение скорости течения. Разработаны различные методы и приборы, предназначенные для выполнения данных задач. Так, например, существуют акустические доплеровские профилометры ADCP, предназначенные для исследования пространственной структуры течений [3, 4], приборы, на основе ультразвуковых измерений [5, 6], а также электромагнитной индукции [7] и др. При исследовании рек наиболее часто применяют гидрометрические вертушки [8] либо экспресс-методы, в основе которых лежит определение параметров движения различных поверхностных поплавков [9]. Детальный обзор существующих приборов и методов для исследования течений приведен в [10].

Для более глубокого понимания процессов, происходящих в прибрежной зоне, необходима детальная информация о структуре потока и его динамических характеристиках. Существующие технические средства не позволяют в полной мере обеспечить получение таких данных, а потому необходимы новые методы и технические средства, способные решать подобные задачи.

Цель настоящей статьи заключается в разработке измерительного комплекса, который позволит получать детальную информацию о структуре течения водного потока и его динамических характеристиках в прибрежной морской зоне.

Работа измерительного комплекса основана на использовании метода анемометрии по изображениям частиц (PIV-метод) [11]. Суть метода заключается в следующем: в поток вносятся специальные частицы-трассеры, которые освещаются в течение определенного промежутка системой подсветки, состоящей из лазера и фокусирующей линзы, формирующей световую плоскость. Одновременно с этим происходит регистрация видеоизображения на цифровую камеру (рис. 1).

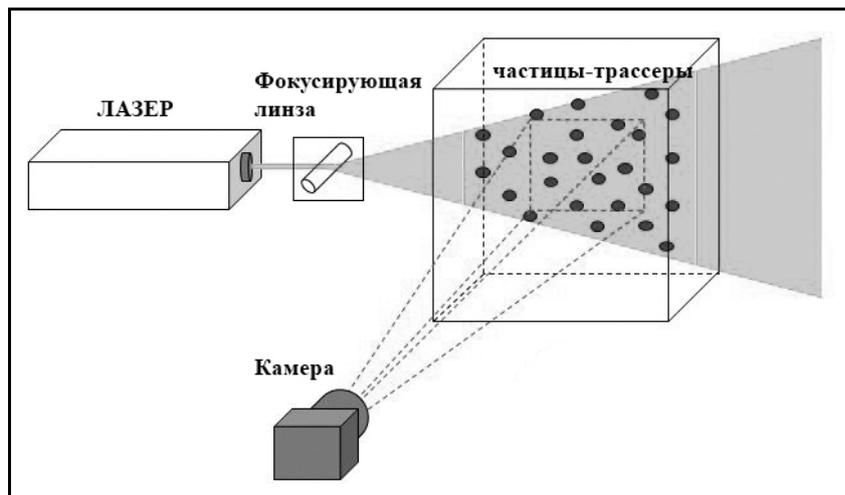


Рис. 1

Полученные данные обрабатываются при помощи специализированного программного обеспечения [12]. Его работа основана на использовании кросскорреляции двух последовательных изображений, которые разделяются на области. Для каждой области вычисляется кросскорреляционная функция и находится ее 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 кросскорреляции для пиксела  $(m, n)$ ;  $I_1(i, j)$  — интенсивность пиксела  $(i, j)$  первого фрагмента изображения;  $I_2(i + m, j + n)$  — интенсивность пиксела  $(i + m, j + n)$  второго фрагмента изображения.

Для вычисления корреляционной функции используется алгоритм быстрого преобразования Фурье. Для одинаковых по координатам областей двух изображений определяются их частотные представления с помощью быстрого преобразования Фурье, после чего выполняются комплексное умножение результатов преобразования и обратное преобразование Фурье. Затем находится максимум кросскорреляционной функции [13]. По координатам максимума относительно центра области определяются направление и величина смещения пикселей  $D$  и далее на основе временного интервала между кадрами  $\Delta t$  рассчитывается скорость движения частиц:

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

где  $S$  — коэффициент для пересчета скорости в м/с.

Как правило, для технической реализации метода анемометрии по изображениям частиц используются мощные импульсные лазеры и специализированные PIV-камеры с системой синхронизации [14], потому метод применяется в основном в условиях лабораторий либо производственных помещений. Однако получение с помощью PIV-метода векторных полей

распределения скорости течения для исследования мелкомасштабных процессов в прибрежной морской зоне является очень перспективным направлением.

Для этой цели разработан измерительный комплекс, состоящий из устройства подсветки, цифровой видеокамеры, элементов крепления/позиционирования и программного обеспечения для обработки данных. Его схема представлена на рис. 2.

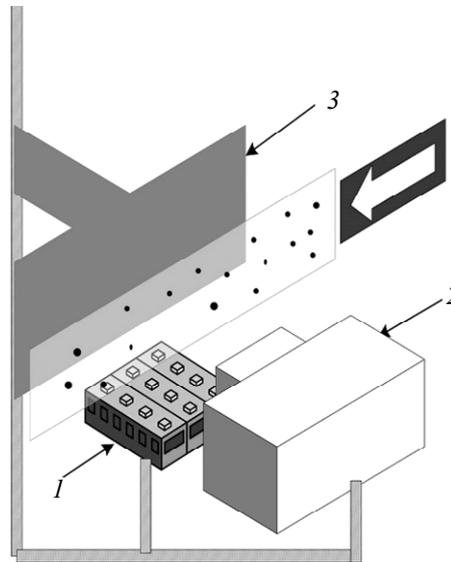


Рис. 2

Роль подсветки выполняет герметичный источник света *1*, собранный на LED-диодах 5730 (общей мощностью 20 Вт), обеспечивающих достаточную освещенность исследуемой области. Для регистрации применялась цифровая камера YI4K+, размещаемая в специальном боксе, обеспечивающем герметичность *2*. Основными преимуществами ее являются компактный размер, высокое разрешение и хорошая скорость съемки — 240 кадров/с. Для фокусировки использовался специализированный объектив, характеристики которого представлены ниже [15], он обладает высоким разрешением и обеспечивает требуемую дистанцию фокусировки.

#### Технические характеристики объектива

Фокусное расстояние .....	3,4 мм
Диафрагма.....	$f/2,8$
Оптическое разрешение.....	20 Мп
Оптические искажения.....	без искажений $\leq 0,5 \%$
Фокусировка .....	ручная
Минимальная дистанция фокусировки.....	0, фокусировка на поверхности линзы

С целью выравнивания комплекса по направлению потока изготовлена специальная пластина *3*, которая также являлась экраном для получения более контрастных изображений частиц.

Методика измерений с использованием комплекса состояла в последовательном выполнении ряда этапов.

1. Настройка системы. Включает в себя фокусировку в заданной области (размер регистрируемой области  $150 \times 100$  мм), настройку параметров съемки камеры: разрешения и частоты кадров, активацию подсветки для работы в непрерывном режиме с максимальной мощностью.

2. Калибровка. Выполняется съемка калибровочного кадра для последующего определения коэффициента  $S$  (2).

3. Измерения. Комплекс с помощью телескопической штанги опускается в воду. Далее на каждой станции назначаются три горизонта: поверхность, середина глубины по станции и придонная область. На каждом горизонте для получения осредненных данных выполняется съемка с экспозицией в 200 с. Благодаря использованию специальной пластины (рис. 2), выполняющей роль флюгера, и размещенного у основания штанги вертлюга, установка развора-

чивалась по направлению течения потока, позволяя производить регистрацию видеоизображений в его продольном сечении.

4. Программная обработка. Полученные видеоданные обрабатывались с использованием адаптированного программного обеспечения на базе Matlab.

В стандартном PIV-методе для регистрации применяются специальные частицы — трассеры, которые искусственно вносятся в среду, однако использование этой технологии в полевых условиях достаточно трудоемко, так как требует дополнительного времени на подготовку каждого измерения. Кроме того, добавляются расходные материалы. В разработанном комплексе вместо трассеров регистрировались уже имеющиеся в потоке природные частицы взвеси, что позволило значительно упростить технологию выполнения эксперимента и снизить затраты на их выполнение. На рис. 3 показан фрагмент изображения из видеоданных, полученных с помощью созданного измерителя при выполнении экспедиционных исследований. Регистрация выполнялась в придонной области. Для получения итоговых данных, содержащих распределение скоростей, видеофайлы обрабатывались с помощью адаптированного программного обеспечения, алгоритм работы которого состоял из последовательного выполнения ряда подпрограмм. Первоначально осуществлялась предобработка, которая состояла из гамма-коррекции, настройки контраста, яркости изображения и выполнения бинаризации. Далее исходный видеофайл делился на последовательные кадры с определенным интервалом времени между ними, из которых формировался массив изображений в формате \*.jpg. Заключительным этапом являлась кросскорреляционная обработка, описанная выше.



Рис. 3

Результатом работы программного обеспечения являются мгновенные поля скорости течения для каждого горизонта. В качестве примера на рис. 4 приведено изображение с построенным мгновенным полем скорости течения, на котором хорошо видна структура течения в придонной области.

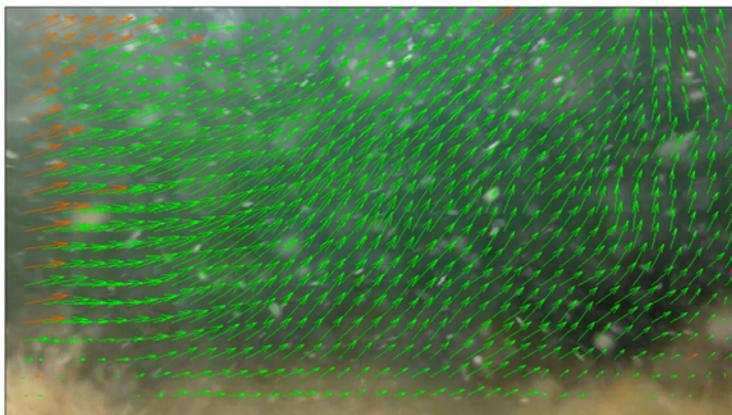


Рис. 4

Статистическое осреднение полученных полей позволяет получить распределение средней скорости для каждого установленного горизонта и построить гистограммы распределения средней скорости течения водного потока, пример которой представлен на рис. 5.

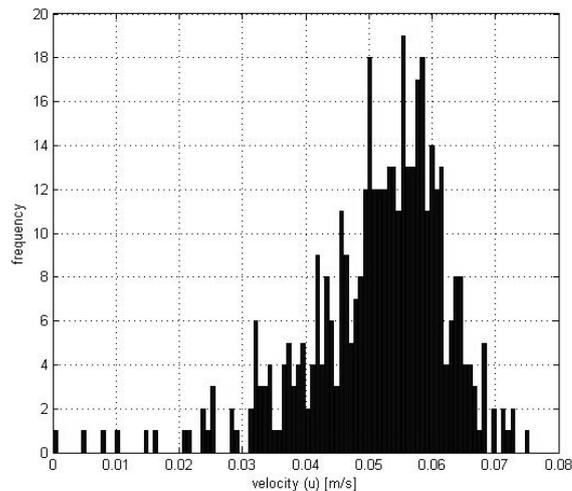


Рис. 5

Верификация получаемых данных выполнялась с использованием стандартных средств измерения, а именно гидрометрической вертушки. Полученные обоими приборами средние значения скорости течения хорошо совпадают, расхождение не превышает 10 %. Это подтверждает достоверность и достаточно высокую точность измерений с использованием созданного комплекса.

Таким образом, разработанный измерительный комплекс 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. Иванов В. А., Пластун Т. В., Маркова Н. В., Багаев А. В. Статистические характеристики глубинных течений в Черном море по данным инструментальных измерений // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2019. Т. 12, № 4. С. 49—58. DOI:10.7868/S2073667319040063
2. Совга Е. Е., Ерёмкина Е. С., Латушкин А. А. Экспедиционные исследования, проведенные Морским гидрофизическим институтом в акватории залива Сиваш весной и осенью 2018 года // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 2(212). С. 176—185. DOI:10.22449/0233-7584-2020-2-176-185.
3. 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.
4. Сабинин К. Д., Серебряный А. Н. Применение акустических доплеровских профилометров течений для изучения пространственной структуры морской среды // *Акустический журнал*. 2012. Т. 58, № 5. С. 639—648.
5. Пат. РФ 2193208 С2. Ультразвуковой способ измерения скорости течения (варианты) / Х. С. Чанг. Заявка № 99118673/28 от 25.08.1999. 20.11.2002.

6. Пат. РФ 2664456 С2. Ультразвуковой способ измерения скорости течения и расхода воды в открытых водоемах / Г. П. Бендерский, И. С. Вылегжанин, О. В. Вылегжанина, А. Н. Корнеев, А. И. Пономаренко, А. А. Пушков. Заявка № 2016145752 от 22.11.2016. 20.08.2018.
7. Пат. РФ 2548126 С1. Устройство для измерения пульсаций скорости потока электропроводной жидкости / В. З. Дыкман, О. И. Ефремов, В. А. Барабаиш. Заявка № 2014151935/93 от 18.12.2014. 10.04.2015.
8. Клименко Д. Е. Развитие гидрометрических вертушек в России и за рубежом // Географический вестник. 2010. № 2(13). С. 64—76.
9. Быков В. Д., Васильев А. В. Гидрометрия. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 448 с.
10. Дыкман В. З. Технические средства для исследования структуры и динамики водных масс // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 6(192). С. 49—62.
11. Particle Image Velocimetry: Fundamentals and Its Applications [Электронный ресурс]: <<http://publications.lib.chalmers.se/publication/138219-particle-image-velocimetry-fundamentals-and-its-applications>> (дата обращения 07.09.2020).
12. 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.
13. Сергеев Д. А. Измерительный комплекс для исследования течений жидкости методом пробных частиц на основе твердотельного лазера с диодной накачкой // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 3. С. 138—144.
14. 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.
15. Объектив 3,4 mm DUO с регулировкой фокуса для Yi4K/4K+ [Электронный ресурс]: <[https://www.pixaero.pro/catalog/pixaerolens/dlya\\_yi/obektiv\\_3\\_4mm\\_duo\\_s\\_regulirovkoj\\_rezkosti\\_dlya\\_ekshn\\_kamer\\_yi](https://www.pixaero.pro/catalog/pixaerolens/dlya_yi/obektiv_3_4mm_duo_s_regulirovkoj_rezkosti_dlya_ekshn_kamer_yi)>.

#### Сведения об авторе

**Дмитрий Александрович Антоненков** — канд. техн. наук; Морской гидрофизический институт РАН, отдел гидрофизики шельфа; научный сотрудник;  
E-mail: dmitry\_science@mail.ru

Поступила в редакцию  
05.10.2020 г.

**Ссылка для цитирования:** Антоненков Д. А. Измерительный комплекс для исследования динамических характеристик и структуры течения водного потока в прибрежной морской зоне // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 12. С. 1112—1118.

#### MEASURING COMPLEX FOR STUDYING THE DYNAMIC CHARACTERISTICS AND STRUCTURE OF THE WATER FLOW IN THE COASTAL SEA ZONE

**D. A. Antonenkov**

*Marine Hydrophysical Institute of the RAS, 299011, Sevastopol, Russia*  
E-mail: dmitry\_science@mail.ru

A measuring complex is been developed for studying the structure of a water flow, based on the use of the anemometry data from particle images. The description of the main elements of the complex is given and the principle of its operation is presented. Thanks to the use of modern visualization methods, the created complex makes it possible to obtain not only the velocity at a certain point in the water space, but also the distribution of the current velocity in different spatial and temporal ranges.

**Keywords:** flow velocity, velocity distribution fields, PIV method, anemometry by images

#### REFERENCES

1. Ivanov V.A., Plastun T.V., Markova N.V., Bagaev A.V. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*, 2019, no. 4(12), pp. 49–58, DOI:10.7868/S2073667319040063
2. Sovga E.E., Eremina E.S., Latushkin A.A. *Physical Oceanography*, 2020, no. 2(36), pp. 161–170, DOI:10.22449/0233-7584-2020-2-176-185.

3. Morozov A.N., Lemeshko E.M. *Physical Oceanography*, 2006, no. 16(4), pp. 216–233.
4. Sabinin K.D., Serebryanyi A.N. *Acoustical Physics*, 2012, no. 5(58), pp. 586–595.
5. Patent RU 2193208 C2, *Ul'trazvukovoy sposob izmereniya skorosti techeniya (varianty)* (Ultrasonic Method for Measuring Current Velocity (Options)), Chang Kh.S., Patent application no. 99118673/28, Priority 25.08.1999, Published 20.11.2002. (in Russ.)
6. Patent RU 2664456 C2, *Ul'trazvukovoy sposob izmereniya skorosti techeniya i raskhoda vody v otkrytykh vodoyemakh* (Ultrasonic Method for Measuring the Flow Rate and Water Discharge in Open Water Bodies), Benderskiy G.P., Vylegzhanin I.S., Vylegzhanina O.V., Korneyev A.N., Ponomarenko A.I., Pushkov A.A., Patent application no. 2016145752, Priority 22.11.2016, Published 20.08.2018. (in Russ.)
7. Patent RU 2548126 C1, *Ustroystvo dlya izmereniya pul'satsiy skorosti potoka elektroprovodnoy zhidkosti* (Device for Measuring Pulsations of the Flow Rate of an Electrically Conductive Liquid), Dykman V.Z., Efremov O.I., Barabash V.A., Patent application no. 2014151935/93, Priority 18.12.2014, Published 10.04.2015. (in Russ.)
8. Klimenko D.E. *Geograficheskiy vestnik*, 2010, no. 2(13), pp. 64–76. (in Russ.)
9. Bykov V.D. *Gidrometriya* (Hydrometry), Leningrad, 1977, 448 p. (in Russ.)
10. Dykman V.Z. *Physical Oceanography*, 2016, no. 6(192), pp. 43–55. (in Russ.)
11. *Particle Image Velocimetry: Fundamentals and Its Applications*, <http://publications.lib.chalmers.se/publication/138219-particle-image-velocimetry-fundamentals-and-its-applications>.
12. Akhmetbekov E.K., Bilskiy A.V., Lozhkin Yu.A., Markovich D.M., Tokarev M.P., Tyuryushkin A.N. *Numerical methods and programming*, 2006, no. 7, pp. 79–85. (in Russ.)
13. Sergeev D.A. *Instruments and Experimental Techniques*, 2009, no. 3(52), pp. 438–444.
14. Sergeev D.A. *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*, 2011, no. 4(2), pp. 522–524. (in Russ.)
15. [https://www.pixaero.pro/catalog/pixaerolens/dlya\\_yi/obektiv\\_3\\_4mm\\_duo\\_s\\_regulirovkoy\\_rezkosti\\_dlya\\_ekshn\\_kamer\\_yi](https://www.pixaero.pro/catalog/pixaerolens/dlya_yi/obektiv_3_4mm_duo_s_regulirovkoy_rezkosti_dlya_ekshn_kamer_yi).

**Data on author**

**Dmitry A. Antonenkov** — PhD; Marine Hydrophysical Institute of the RAS, Department of Shelf Hydrophysics; Scientist; E-mail: dmitry\_science@mail.ru

**For citation:** Antonenkov D. A. Measuring complex for studying the dynamic characteristics and structure of the water flow in the coastal sea zone. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 12. P. 1112–1118 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-12-1112-1118