

Д.А. Антоненков

*Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь***МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ  
ВЛЕКОМЫХ НАНОСОВ, ОСНОВАННЫЙ  
НА ПРОГРАММНОЙ ОБРАБОТКЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВОДНОЙ СРЕДЫ**

Описан метод определения скорости и направления движения влекомых наносов, основанный на обработке видеоизображений водной среды. Выполнен анализ существующих методов обработки изображений, позволяющих определять скорость движения объектов. Приведены результаты экспериментов по определению скорости движения влекомых наносов, выполненные в лабораторных и натуральных условиях. Сделаны выводы о возможности использования существующих методов обработки изображений и технических средств фото- и видеосъемки для реализации задачи определения скорости движения влекомых наносов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *скорость движения частиц, влекомые наносы, транспорт наносов, обработка видеоизображений*

Надёжные измерения скорости движения влекомых наносов в море остается одной из нерешенных задач океанологии. Данные о переносе донного материала и связанных с ним изменениях береговой линии и рельефа дна необходимы для выполнения работ по укреплению и сохранению берегов и пляжей в курортных зонах, обеспечения безопасности навигации в условиях интенсификации морского транспорта и хозяйственной деятельности на побережьях, контроля динамики загрязнённости воды в прибрежных районах. В соответствии с этим, разработка и создание новых методов определения скорости движения влекомых наносов является актуальной и важной задачей.

В ряде опубликованных работ, посвящённых измерениям влекомых наносов, в основном рассматриваются только те способы, которые используются при исследовании рек. Наиболее широко используется способ измерения расхода влекомых наносов с помощью батометров, погружаемых на дно реки. Батометры для измерения расхода донных наносов представляют собой металлические ловушки различных конструкций, устанавливаемые на дно потока. Одним из первых удачных приборов являлся батометр, сконструированный в Государственном гидрологическом институте в 1947 г. Г.И.Шамовым [1]. Большое количество батометров-ловушек появилось за рубежом, среди которых следует признать наиболее удачными венгерский батометр Кароли и батометр Новака [2], разработанный в ЧССР. Однако точность измерения расхода донных наносов такими приборами невысока, так как установленный на дно реки батометр, имеющий относительно большие размеры, изменяет поле скоростей в придонном слое и, следовательно, режим движения наносов. В настоящее время применяются также приборы, основанные на применении активной акустической локации движущихся донных наносов, например, акустический измеритель профиля дна МТА (США), *Correlation sonar system* (США) [3]. Также при исследовании

динамики донных аккумулятивных форм, процессов образования и перемещения морских насосов на шельфе применяются датчики донных форм (патент РФ № 2072539). Такие приборы позволяют в режиме реального времени отследить динамику профиля дна в фиксированной области, не изменяя поле скоростей в придонном слое, однако не дают возможности получить траекторию и направление движения отдельных частиц, что является их недостатком.

Основная цель данной работы заключается в том, чтобы показать возможности применения видеорегистрации и различных способов обработки изображений для определения скорости движения влекомых наносов.

Существуют различные подходы к выделению движущихся объектов на видеоизображениях, среди которых можно выделить несколько наиболее эффективных методов. Один из них это метод, основанный на определении оптического потока [4]. Оптический поток – изображение видимого движения, представляющее собой сдвиг каждой точки между двумя изображениями. По сути, он представляет собой поле скоростей (т.к. сдвиг с точностью до масштаба эквивалентен мгновенной скорости). Для вычисления оптического потока на основе уравнений потока разработаны и реализованы различные алгоритмы [5 – 7]. Один из самых широко используемых дифференциальных методов оценки оптического потока является метод Лукас-Канаде [8], основанный на частных производных сигнала. Алгоритм Лукас-Канаде менее чувствителен к шуму на изображениях, чем поточечные методы, однако является сугубо локальным и не может определить направление движения пикселей внутри однородных областей. Данный алгоритм является достаточно простым и быстрым. Во многих случаях метод Лукас-Канаде достаточно эффективен. Среди недостатков алгоритма следует отметить, что данный метод эффективен только при небольших смещениях объекта между кадрами (до 1 – 2 пикселей). Для решения указанных проблем на практике используется модификация метода Лукас-Канаде: итеративный метод, иерархический (пирамидальный) метод.

Так, например, в иерархическом (пирамидальном) методе берут два изображения – исходное и следующее – и строят пирамиду масштабов – гауссову пирамиду. Рассматривают изображение с самым низким разрешением. Максимальное движение на самом низком разрешении происходит в пределах одного пикселя. Далее с помощью итеративного варианта метода Лукас-Канаде вычисляют оптический поток для изображения с самым низким разрешением. Полученное значение используют в изображениях с более высоким разрешением и т.д. [9].

Эти алгоритмы не являются единственными вариантами вычисления оптического потока. Так, например, в *OpenCV* кроме потока Лукас-Канаде есть еще поток *Farneback* и *SimpleFlow*, также часто ссылаются на алгоритм *Horn-Schunck*. Для вычисления оптического тока можно использовать библиотеку *MatLab* «*Computer vision system toolbox*» или функции *OpenCV*.

В *OpenCV* классический метод Лукас-Канаде реализован с пирамидой в процедуре *calcOpticalFlowPyrLK*. Алгоритм рассчитывает *sparse*-поток, то есть для заданного набора точек на первом изображении оценивает их положение на втором. Результат работы – успешно и стабильно обнаружива-

ются как малые, так и большие сдвиги, устойчив к довольно большим шумам, время работы – порядка 10 мс для 400 точек с 5-слойной пирамидой (на *core i7 950*) [10].

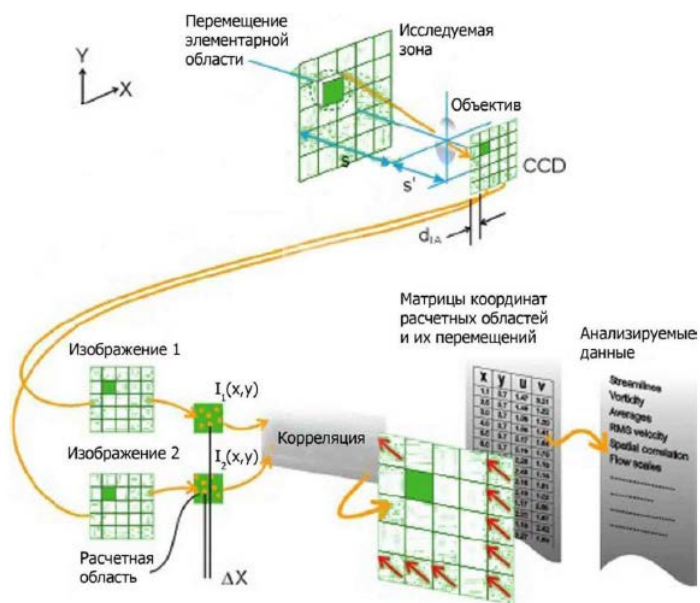
Поток *Farneback* реализуется процедурой *calcOpticalFlowFarneback*, рассчитывается *dense*-поток, то есть сдвиг каждой точки. Этот алгоритм менее стабилен, дает больше погрешностей на довольно равномерных картинках (существует проблема, связанная с отсутствием фильтрации неудачных точек), плохо определяет большие сдвиги [10].

Поток *SimpleFlow* реализует процедура *calcOpticalFlowSF* (рассчитывается также *dense*-поток). Алгоритм работает значительно медленнее других, порядка 9 – 12 секунд на картинку  $512 \times 512$ . Результат работы его более точный, чем *Farneback*, лучше определяется сдвиг на равномерных картинках, заметно лучше срабатывает с большими сдвигами.

Таким образом, для решения поставленной задачи, при условии использования оптического потока, возможно применить классический метод Лукас-Канаде реализованный с пирамидой с использованием процедуры *OpenCV – calcOpticalFlowPyrLK*.

Однако, как показал выполненный анализ существующих методов обработки изображений, наиболее эффективным для решения поставленной задачи является метод, основанный на пространственной кросс-корреляции двух последовательных изображений (метод трассерной визуализации) [11]. Структурная схема метода показана на рис.1 [12].

Данный метод дает возможность регистрировать мгновенные пространственные распределения скорости. Измерение мгновенного поля скорости потока в заданном сечении основано на измерении перемещения частиц, находящихся в плоскости сечения, за фиксированный интервал времени. Образы частиц регистрируются на электронный носитель (цифровую камеру).



Р и с . 1 . Структурная схема метода трассерной визуализации.

Последующая обработка изображений позволяет рассчитать смещения частиц за время между вспышками источника света и построить двухкомпонентное поле скорости. Измеренные двухкомпонентные значения векторов являются проекциями реальных (трехмерных) векторов на плоскость, перпендикулярную оптической оси аппаратуры. Для измерения трех компонент скорости используют, как правило, два регистрирующих модуля, оптические оси которых ориентированы под определенным углом относительно друг друга.

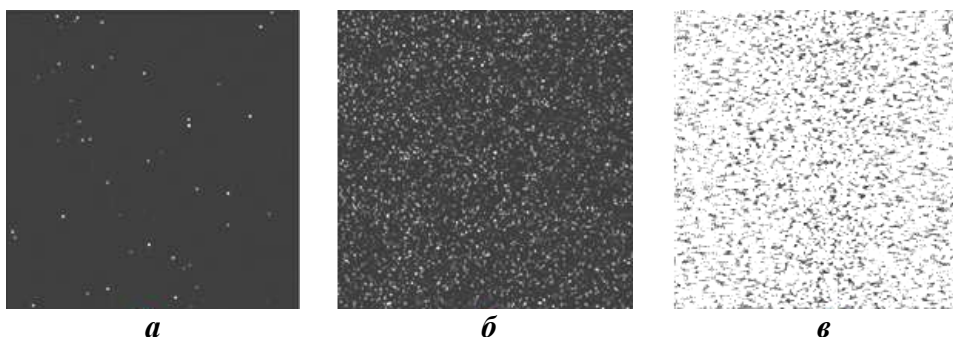
При выборе метода анализа определяющую роль играет параметр, называемый оптической плотностью (*ImageDensity*) [13]. Он определяется средним числом частиц в области анализа.

Различают три основных значения оптической плотности. При малых значениях отдельные частицы хорошо различимы и можно легко сопоставить пары частиц на двух последовательных кадрах (рис.2, а). В данном случае применяются так называемые траекторные методы анализа (*ParticleTrackingVelocimetry*). При средних значениях оптической плотности отдельные частицы еще можно различить, но сопоставить пары частиц на двух последовательных кадрах уже намного сложнее (рис.2, б). В данном случае обычно применяется корреляционная обработка фрагментов изображения (*ParticleImageVelocimetry*). При больших значениях оптической плотности отдельные частицы на изображениях различить уже не удастся (рис.2, в). В данном случае анализируются картины лазерных спеклов (*LaserSpeckleVelocimetry*).

Математическое определение скоростей частиц основано на пространственной кросс-корреляции двух последовательных изображений. Изображения разделяются на несколько так называемых областей интереса. В каждой области интереса выполняется кросс-корреляция:

$$R(x, y) = \frac{1}{N_x N_y} \times \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} (I'(i, j) - \bar{I})(I''(i + x, j + y) - \bar{I}), \quad (1)$$

где  $R(x, y)$  – величина кросс-корреляции для пикселя  $(x, y)$ ;  $I'(i, j)$  – интенсивность пикселя  $(i, j)$  первого региона изображения;  $I''(i + x, j + y)$  – интенсивность пикселя  $(i + x, j + y)$  второго региона изображения;  $\bar{I}$  – среднее значение интенсивности пикселей изображения.



Р и с . 2 . Типы оптической плотности частиц на изображении.

По величине кросс-корреляции определяется её максимум для данного региона. По координатам максимума относительно центра региона определяется направление и величина смещения пикселей региона  $D$ . Зная временную задержку между вспышками лазера  $\Delta t$  в данной элементарной области, можно рассчитать скорость:

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

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

Стандартный алгоритм включает следующую процедуру:

- разбиение пары изображений на элементарные расчетные области равного размера;
- расчет кросскорреляционной функции;
- нахождение максимума корреляционной функции;
- подпиксельная интерполяция максимума корреляционной функции.

Нахождение максимума корреляционной функции является основной задачей, так как его положение будет соответствовать наиболее вероятному сдвигу частиц в данной области. При этом в идеальном случае предполагается, что все частицы в элементарной области имеют одинаковое перемещение, т.е. у корреляционной функции существует один наиболее ярко выделенный максимум на фоне шума. Для более точного определения координат максимума используется подпиксельная интерполяция корреляционной функции в окрестности ее максимума. Интерполяция может проводиться независимо по обеим координатам, а интерполирующая функция может быть самой различной (например, полином второй степени или Гауссиан).

Координатой максимума считается координата максимума интерполирующей функции. Обычно бикубическая интерполяция позволяет (в зависимости от алгоритмов обработки) получить точность 0,1 пикселя, а при использовании итерационных методов до 0,03 пикселя [10]. Для повышения точности расчета векторов перемещений и увеличения динамического диапазона в современных *PIV* системах используют адаптивные подходы расчета поля перемещений, которые по своей сути являются итерационными методами с компенсацией смещения частиц.

Основная идея итерационных методов состоит в обработке одной и той же области несколько раз, при этом используя результат предыдущей итерации в качестве оценки для параметров обработки на следующей итерации. Таким образом, можно добиться сходимости результатов обработки и получить некоторое увеличение точности получаемых данных. При расчете корреляционной функции используются элементарные области, смещенные на вектор, найденный на предыдущей итерации. При этом на каждой итерации проводится отсев ошибочных векторов, их интерполяция, а также повторное разбиение изображения на расчетные области меньшего размера. Целью смещения окон является желание добиться максимального совпадения между ними.

Смещение расчетных областей позволяет существенно уменьшить эффект «потери пары» за счет лучшего совпадения трассерных картин и тем самым повысить отношение сигнал/шум. Кроме того, высокая степень

«совпадения» частиц на изображениях позволяет (при достаточной концентрации частиц) уменьшить размеры конечной элементарной области, повысив тем самым разрешающую способность метода без ущерба для качества получаемых данных. Главным недостатком алгоритма является увеличенное время обработки по сравнению со стандартными методами. Основы адаптивных алгоритмов можно найти в [14].

Для выявления и исправления ошибочных векторов используют процедуры коррекции ошибок [11]. Выделяют два вида коррекции ошибок. Первый метод заключается в отсеивании векторов, не удовлетворяющих определенным критериям, и замещении их интерполированными. Интерполяцию выполняют по соседним векторам, которые прошли отбор. Это – так называемый «*post-interrogation*» метод, когда на выходе получаются не точные значения, а приближенные, интерполированные по какому-либо закону (*median* фильтр, *local median* фильтр). Второй, «*non-post-interrogation*» метод, в отличие от первого, дает точное положение максимума, соответствующего наиболее вероятному смещению в данной области, и позволяет получить более высокое отношение сигнал/шум.

Для улучшения качества обработки изображений могут применяться также различные фильтры [15, 16]: по соотношению сигнал/шум, по локальному среднему, статистическая фильтрация и др.

Таким образом, основным достоинством метода трассерной визуализации является его высокая надежность и повторяемость, особенно при низких отношениях сигнал/шум. Это достигается благодаря статистической обработке изображений посредством корреляционного анализа. К тому же в результате получается регулярная сетка векторов, что облегчает последующую обработку векторного поля. Основным недостатком данного метода является уменьшение его точности при увеличении шума на изображениях. Влияние негативных факторов на итоговый результат можно уменьшить, используя различные методы фильтрации, адаптивные подходы расчета поля скорости, которые по своей сути являются итерационными методами с компенсацией смещения частиц и т.д.

В рамках лабораторной отработки метода определения скорости движения влекомого наноса, основанном на кросскорреляционных алгоритмах, была разработана специальная установка и проведены серии экспериментов. Экспериментальная установка представляла собой предметный стол, в форме белого диска, вращающийся с регулируемой скоростью, и системы видеорегистрации, состоящей из фотоаппарата *Sony NEX5N*, специальной подсветки и штатива.

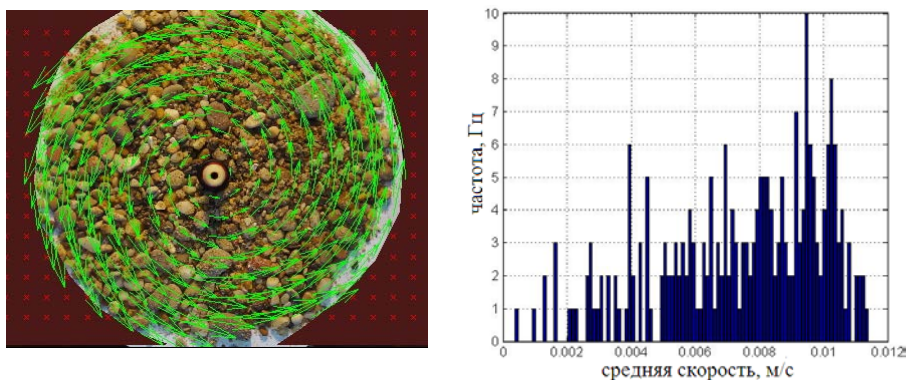
Описание эксперимента: на предметный стол, подсоединенный к двигателю, насыпается песок с различным гранулометрическим составом. С помощью системы управления задается определенная скорость вращения диска, имитируя движения частиц. Далее на фотоаппарат, размещенный на штативе, фиксируется видеоизображение песка и с помощью модифицированного программного обеспечения вычисляется скорость движения частиц. В качестве базового программного обеспечения применялся модуль для среды математического моделирования *Matlab*.

Алгоритм работы программного обеспечения заключается в следующем:

1. Загрузка изображений.
2. Назначение сетки расчетных областей.
3. Наложение масок для исключения из расчета ненужных зон.
4. Выполнение калибровки (определение границ калибровочных мишеней, задание истинных размеров калибровочных мишеней).
5. Выбор метода расчета корреляционной функции.
6. Расчет поля перемещений.
7. Фильтрация результатов для исключения случайных векторов.
8. Расчет итоговых полей векторов скорости.

В результате выполненных экспериментов определено направление и величина смещения частиц, построено поле векторов скорости, вычислены проекции скорости для каждого региона и среднее значение. На рис.3 показано изображение предметного стола экспериментальной установки с частицами песка, построенным полем векторов скоростей и гистограммой средней скорости движения частиц.

Очевидно, что частицы, располагающиеся на границе предметного стола, движутся с максимальной скоростью. Скорость данных частиц, определенная при помощи описываемого метода, составила 0,009 – 0,011 м/с.



Р и с . 3 . Результаты обработки двух последовательных изображений с частицами взвеси. Гистограмма скорости движения частиц.

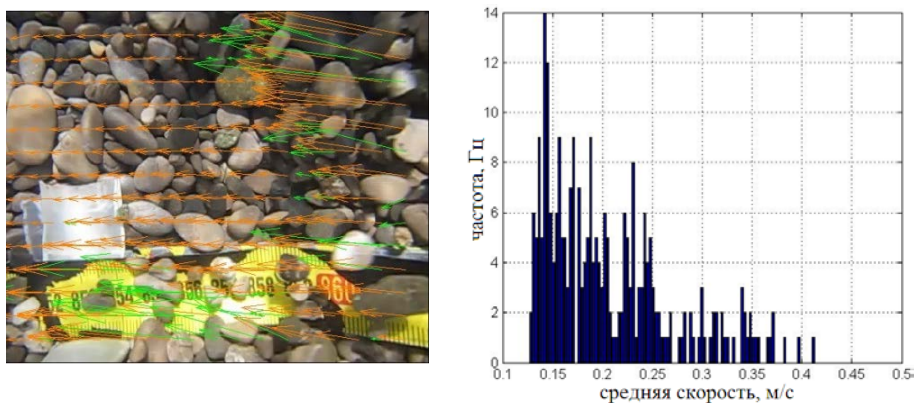


Рис. 4. Результат обработки двух кадров видеоряда с построенными векторами скорости. Гистограмма средней скорости движения частиц.

Вычисленная на основе стандартных соотношений скорость частиц, расположенных на краю предметного стола составила 0,0097 м/с. Хорошее совпадение данных результатов позволяет надеяться на работоспособность метода в части определения скорости движения влекомых наносов.

С целью оценки применимости метода для выполнения измерений скорости влекомых наносов *in situ* были выполнены тестовые эксперименты с использованием стандартной техники для подводной фотосъемки, а именно фотоаппарата *Canon Powershot D30*. С помощью данного фотоаппарата, размещенного под водой, проводилась видеосъемка участка дна, на котором визуально наблюдались возвратно поступательные движения донных наносов. Фотоаппарат размещался на расстоянии порядка 20 см от дна в прибойной зоне. Съемка выполнялась в автоматическом режиме, без штатива, с частотой кадров 120 и 240 к/с. Далее полученные видеоряды были обработаны специализированным программным обеспечением, построены векторные поля скоростей для каждого кадра, определены значения средней скорости движения частиц. Для удобства анализа брался участок видеоряда, на котором визуально фиксировалось движение частиц в одном направлении, и выполнялась его обработка, далее выделялся следующий участок и т.д. Результаты обработки с построенными векторами скорости и определенными значениями средней скорости частиц представлены на рис.4.

Эксперименты выполнялись на полигонах с разным составом донных наносов: галька различного размера, песчаные наносы с диапазоном размеров частиц: 1 – 20 мм.

**Выводы.** В результате выполненных экспериментов и проведенного анализа существующих методов обработки изображений можно сделать вывод, что для решения задачи определения скорости влекомых наносов с помощью обработки изображений, наиболее эффективным является применение методов основанных на пространственной кросс-корреляции, дающих возможность, при использовании адаптированного программного обеспечения, определять среднюю скорость и направление движения частиц.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2014-0010 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей на основе современных методов контроля состояния морской среды и гридтехнологий».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поздняков Ш.Р., Романовский В.В. Методы измерения транспорта влекомых наносов // Труды ГГИ.–1983.– вып.297.– С.55-62.
2. Шаффернак Ф. Гидрология.– М: Гидрометеиздат, 1938.– 371 с.
3. Sutton et al. Acoustic bedload velocity estimates using a broadband pulse-pulse time correlation technique // J. Acoust. Soc. America.– 1992.– v.92, № 3.– P.1692-1698.
4. Щербатов В.В., Гарганеев А.Г., Шакиров И.В. Алгоритм расчета оптического потока в задачах оценки параметров геометрических преобразований // Доклады ТУСУР.– 2012.– № 2 (26).– С.265-268.



5. *Horn B.K.* Determining optical flow // *Artificial Intelligence*.– 1981.– v.17.– P.185-203.
6. *Barron J.L.* Performance of optical flow techniques // *Intern. J. Computer Vision*.– 1994.– v.12, № 1.– P.43-77.
7. *Anandan P.A.* Computational framework and an algorithm for the measurement of visual motion // *Intern. J. Computer Vision*.– 1989.– v.2.– P.283-310.
8. *Singh A.* Optic Flow Computation: A Unified Perspective // *IEEE Computer Society Press*.– 1991.– P.168-177.
9. *Lucas B., Kanade. T.* An iterative image registration technique with an application to stereo vision // *DARPA Image Understanding Workshop*.– 1981.– P.121-130.
10. *Онтический поток* [Электронный ресурс]. URL: <http://habrahabr.ru/post/201406> (дата обращения 03.11.2016)
11. *Particle Image Velocimetry: Fundamentals and Its Applications* [Электронный ресурс]. URL: <http://publications.lib.chalmers.se/publication/138219-particle-image-velocimetry-fundamentals-and-its-applications> (дата обращения 03.11.2016)
12. *Ложкин В. А., Ложкин Ю. А., Токарев М. П.* Использование высокопроизводительных вычислительных платформ в задачах томографической цифровой трассерной визуализации // *Вычислительные методы и программирование*.– 2012.– т.13.– С.20-27.
13. *Raffel M.* Particle image velocimetry: a practical guide.– Berlin: Springer, 2007.– 468 p.
14. *Токарев М.П., Маркович Д.М., Бильский А.В.* Адаптивные алгоритмы обработки изображений частиц для расчета мгновенных полей скоростей // *Вычислительные технологии*.– 2007.– т.12, № 3.– С.109-131.
15. *Scarano F.* Iterative image deformation methods in PIV. Review article // *Meas. Sci. Technol*.– 2002.– № 1, v.13.– P.1-19.
16. *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.

Материал поступил в редакцию 21.02.2017 г.  
После доработки 01.03.2017 г.

D.A.Antonenkov

### **THE BEDLOAD SEDIMENT VELOCIMETRY METHOD BASED ON AQUATIC ENVIRONMENT PROGRAM IMAGES PROCESSING**

The method for determining bedload motion direction and speed based on aquatic environment video processing is described. The existing image processing methods for determining the motion speed of objects are estimated. The results of experiments for bedload sediment velocimetry obtained by laboratory and full-scale tests are presented. The applicability of the existing image processing methods and photo and video recording technical means for bedload sediment velocimetry is estimated.

**KEYWORDS:** particles motion speed, bedload sediment, load transport, video processing