

УДК 629.7.015.3

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТЕЧЕНИЙ С СУБПИКСЕЛЬНОЙ ТОЧНОСТЬЮ

Н. А. Фомин, О. В. Мелеева

*Государственное научное учреждение
«Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова
Национальной академии наук Беларуси»,
Республика Беларусь, 220072, Минск, ул. П. Бровки, 15
E-mail: ollired@yandex.ru*

Описаны новые алгоритмы обработки зашумлённых спеклограмм, позволяющие проводить количественную диагностику микроструктуры ударно-волновых течений с субпиксельной точностью с использованием статистического анализа регистрируемых числовым образом спекл-полей, возмущённых рефракцией в исследуемых течениях. Разработанное программное обеспечение даёт возможность восстановить до 10000 векторов углов отклонения зондирующего излучения в двумерной области размером 20×30 мм при изображении спекл-поля с оптическим увеличением $M = 1$.

Ключевые слова: спекл-фотография, субпиксельное разрешение, пограничный слой, ударные волны.

Введение. Пространственно-временной корреляционный анализ изображений, получаемых при визуализации течений, — простой и надёжный метод статистической обработки изображений. Точность такой обработки значительно увеличивается при переходе к цифровым технологиям ввода изображений в ЭВМ [1]. Использование лазеров для зондирования исследуемых сред является удобным и необходимым во многих оптических конфигурациях, однако неизбежно приводит к появлению спеклов на изображениях, полученных в когерентном свете. Первоначально к появлению таких спеклов (микропятен) на оптических изображениях относились как к нежелательному шуму. Многие исследователи старались подавить этот шум, однако в начале 70-х годов прошлого века, главным образом после публикации результатов экспериментов Бурча и Токарского [2], открылись новые потенциальные возможности практического применения спекл-распределений лазерной интенсивности в измерительных технологиях, несмотря на наличие шумов в спекл-полях. Разработка субпиксельных алгоритмов анализа изображений с сильными шумами имеет ряд особенностей, главной из которых является необходимость фильтрации используемых изображений. В данной работе фильтрация проводится в фурье-плоскости при вычислении корреляционных функций. Широкое распространение получили методы исследования нестационарных сред, основанные на анализе временных флуктуаций рассеянного излучения, часто называемые методами оптического смещения, корреляционной или динамической спектроскопии, а также близкий к ним лазерный доплеровский метод, с помощью которого анализируются флуктуации частоты рассеянного излучения. Методы динамической спекл-интерферометрии включают в себя анализ как временных, так и пространственных флуктуаций рассеянного излучения.

Особой привлекательностью обладают высокоточные цифровые технологии, основанные на компьютерном анализе результатов взаимодействия лазерного излучения малой мощности со средой в масштабе реального и квазиреального времени. Такие методы являются высокоинформативными, бесконтактными и безынерционными и дают возможность

напрямую регистрировать экспериментальную информацию непосредственно в памяти ПЭВМ с использованием высокоразрешающих ПЗС-матриц. В данной работе описаны математические приёмы корреляционного анализа спекл-изображений, позволившие с субпиксельной точностью исследовать структуру течения при взаимодействии ударной волны с пограничным слоем. Актуальность этих методов обуславливается также быстрым прогрессом в развитии вычислительной техники и ПЗС-структур, с помощью которых можно проводить цифровые измерения и диагностику "in-line" в реальном масштабе времени, а также накапливать и обрабатывать экспериментальную информацию в ПЭВМ, включая непосредственную визуализацию результатов обработки на мониторе.

Целью данной работы является создание техники анализа спекл-изображений, основанной на трёхточечной аппроксимации кросскорреляционных функций. При таком подходе удаётся определить положение максимума кросскорреляционной функции с субпиксельной точностью, что значительно повышает чувствительность определения углов отклонения зондирующих световых лучей вплоть до 10^{-6} рад.

Статистический анализ спекл-изображений. Общепринятый способ обработки записанных в память компьютера цифровых изображений предполагает разбиение всего спекл-поля на небольшие подобласти, в каждой из которых вычисляется кросскорреляционная функция в зависимости от координат этой подобласти (m, n) . В случае применения кросскорреляционной функции мы можем получить двумерное поле векторов смещений спеклов, отражающее структурные изменения за время между двумя последовательными кадрами. Присутствующий в реальной записи изображений шум существенно ухудшает качество изображений и надёжность определения расположения пика кросскорреляционной функции. Этим обусловлен выбор статистического способа поиска наилучших локальных совпадений изображений I и I' .

При обработке спекл-изображений типичные размеры окна усреднения составляют от 8×8 до 64×64 пиксела, т. е. охватывают несколько тысяч пикселей, так что для формирования кросскорреляционной плоскости потребуются миллионы операций умножения и сложения. Для реализации описанных выше алгоритмов создан специальный пакет компьютерных программ. Он предусматривает процедуру записи и хранения спекл-изображений в цифровом виде, а также последующую обработку изображений с использованием методов статистического анализа. С помощью этих программ можно проводить анализ контрастов изображений с последующей фильтрацией, кросс- и автокорреляционный анализ, а также построение полей смещений изображений с применением кросскорреляционных функций и метода минимизации среднеквадратичной разности матриц интенсивности изображений (метод наименьших квадратов).

«Сырой» формат записи изображений (.raw) в память компьютера зависит от типа камеры. В наших экспериментах спекл-фотографирование осуществлялось камерами "Fuji FinePixS2Pro", "Nikon D70", "Canon". Для чтения изображений при регистрации камерой "Nikon D70" (формат .nef) применяется программный пакет NikonCapture 4.0, который позволяет считывать изображение из камеры и конвертировать в один из известных графических форматов .tiff или .bmp.

Для предварительной обработки полученных изображений спекл-полей использовалась программа Nikon View 6.2, в которую встроены модули для обработки файлов, записанных в формате .raw. За счёт большего числа битов в цифровом представлении сигнала raw-файл содержит гораздо больше полутонов, что позволяет оптимальнее корректировать изображения без появления дефектов. Камера "Nikon D70S" имеет 12-битный аналого-цифровой преобразователь, и при съёмке в формате .nef можно назначать файлу большую часть съёмочных параметров непосредственно с компьютера, а также более аккуратно «вытягивать» тени и свет. В программу Nikon View 6.2 встроены редактор RAW [3] (рис. 1).

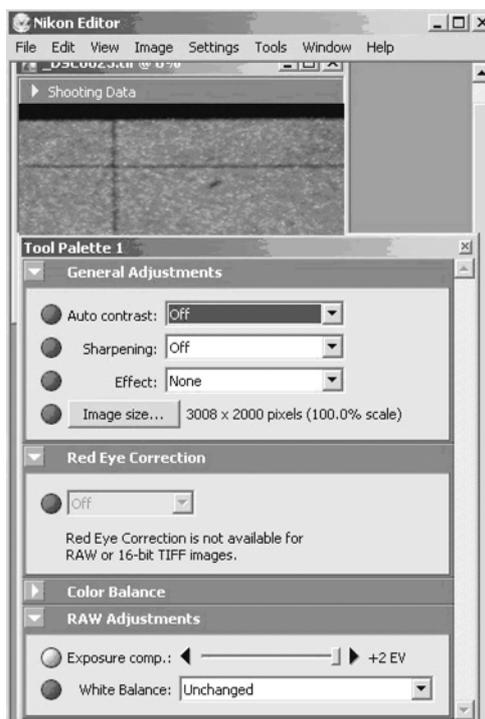


Рис. 1. Стандартный вид окна редактора RAW в программе Nikon View версии 6.2 при обработке спеклограммы течения в сверхзвуковой трубе при исследовании взаимодействия ударной волны с пограничным слоем

Улучшить качество изображений для их последующей обработки позволяет также предварительная фильтрация. Одним из способов фильтрации является предложенный в работе [4] анализ плотности вероятности распределения интенсивности в фильтруемом спекл-поле. Учитывая, что плотность вероятности в идеальном спекл-поле описывается отрицательной экспоненциальной зависимостью от величины интенсивности, при фильтрации спекл-поля вычитается его «пьедестал» с тем, чтобы выполнялось соотношение

$$P(I) = \frac{1}{\langle I \rangle} \exp \left[-\frac{I}{\langle I \rangle} \right]. \quad (1)$$

Такая фильтрация эффективна для широкого диапазона параметров оптической схемы, существенно увеличивает контраст поля, улучшает качество кросскорреляционной функции и значительно уменьшает погрешности описанной выше обработки.

Для аппроксимации пика кросскорреляционной функции с субпиксельной точностью могут использоваться различные известные функции. Некоторые способы аппроксимации подробно рассмотрены в [5] при описании поиска среднего смещения частиц в исследованиях методом PIV. Такие же аппроксимации справедливы и для кросскорреляции спекл-изображений. Одна из них — функция центроида, которая определяется как отношение моментов первого и нулевого порядков. Этот метод работает хорошо, когда корреляционный пик широкий, т. е. многие значения корреляционной функции вносят вклад в расчёт момента.

При трёхточечной оценке подбирается подходящая функция, которая аппроксимирует кросскорреляционный пик с учётом известных значений в ближайших соседних точках в обоих направлениях (x и y). С этой целью применяется гауссовская функция, потому что световые пятна — спеклы — имеют примерно гауссовский профиль, а так как корреля-

ция двух гауссовских функций также приводит к гауссовской функции, предполагается, что корреляционный пик тоже должен иметь гауссовскую форму. Трёхточечные оценки работают лучше в случае узкого корреляционного пика, когда размеры спекла составляют порядка 1,5–3 пиксела. Тогда погрешность определения корреляционного пика лежит в пределах $\pm(0,05-0,1)$ пиксела.

Далее приведены функции для трёхточечной оценки.

1. Гауссовская аппроксимация:

$$f(x) = C \exp \left[\frac{-(x_0 - x)^2}{k} \right], \quad f(y) = C \exp \left[\frac{-(y_0 - y)^2}{k} \right],$$

$$x_0 = i + \frac{\ln R_{(i-1, j)} - \ln R_{(i+1, j)}}{2 \ln R_{(i-1, j)} - 4 \ln R_{(i, j)} + 2 \ln R_{(i+1, j)}}, \quad (2)$$

$$y_0 = j + \frac{\ln R_{(i, j-1)} - \ln R_{(i, j+1)}}{2 \ln R_{(i, j-1)} - 4 \ln R_{(i, j)} + 2 \ln R_{(i, j+1)}}.$$

2. Аппроксимация центроидом:

$$f(x) = f(y) = \frac{\text{момент первого порядка}}{\text{момент нулевого порядка}},$$

$$x_0 = \frac{(i-1)R_{(i-1, j)} + iR_{(i, j)} + (i+1)R_{(i+1, j)}}{R_{(i-1, j)} + R_{(i, j)} + R_{(i+1, j)}}, \quad (3)$$

$$y_0 = \frac{(j-1)R_{(i, j-1)} + jR_{(i, j)} + (j+1)R_{(i, j+1)}}{R_{(i, j-1)} + R_{(i, j)} + R_{(i, j+1)}}.$$

3. Параболическая аппроксимация:

$$f(x) = A(x - x_0)^2 + B(x - x_0) + C, \quad f(y) = A(y - y_0)^2 + B(y - y_0) + C,$$

$$x_0 = i + \frac{R_{(i-1, j)} - R_{(i+1, j)}}{2R_{(i-1, j)} - 4R_{(i, j)} + 2R_{(i+1, j)}}, \quad (4)$$

$$y_0 = j + \frac{R_{(i, j-1)} - R_{(i, j+1)}}{2R_{(i, j-1)} - 4R_{(i, j)} + 2R_{(i, j+1)}}.$$

Координаты (x_0, y_0) описывают среднее по подобласти смещение спеклов с высокой точностью одновременно на большом количестве точек даже для сильно зашумлённых течений, что позволяет количественно определить двумерное поле скоростей течения с субпиксельным разрешением.

Известна и хорошо зарекомендовала себя ещё одна альтернативная поиску максимума кросскорреляционной функции $R_{II'}(x, y)$ техника, предложенная в [6], которую назвали методом минимизации среднеквадратичной разности матриц интенсивности изображений. Этот метод основан на поиске минимума квадратных разностей между элементами векторов или матриц для исследования существующего подобия между ними. Такой принцип является, по сути, алгоритмом слежения и подобен так называемому принципу наименьших квадратов, который часто используется при анализе погрешностей численных аппроксимаций или в математической статистике.

Полученные цифровые поля спекл-изображений представляются в виде матриц размера $M \times N$ каждая, а I_{ij}, I'_{ij} — интенсивности изображений на выбранном пикселе изображения.

Как и в кросскорреляционном методе, изображение разбивается на небольшие участки — образцы, или окна усреднения, и целью является отследить образец, смещённый на средний вектор (m^*, n^*) за интервал времени Δt . Это смещение можно найти, определив минимум структурной функции при различных значениях m и n :

$$D_{1,2}(m, n) = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I_1(i, j) - I_2(i + m, j + n)]^2. \quad (5)$$

Индексы i, j в уравнении (5) относятся к одной и той же системе координат в плоскости, где расположены оба образца I и I' . Максимальная степень подобия между матрицами I и I' будет наблюдаться при минимуме функции $D(m, n)$. Равенство $I(i, j) = I'(i - m^*, j - n^*)$ может наблюдаться лишь при одинаковом целом смещении (m^*, n^*) всех точек и идентичных условиях освещения и записи двух последовательных изображений I и I' .

Вид структурных функций для двух последовательных одноэкспозиционных спеклограмм для I и I' показан на рис. 2. Как можно видеть, $D(m, n)$ обратно пропорциональна кросскорреляционной функции и её один минимум находится в тех же координатах (m^*, n^*) , что и максимум кросскорреляционной функции. Авторы [6] назвали этот метод поиска максимума кросскорреляционной функции методом минимизации среднеквадратичной разности матриц интенсивности изображений. Такая минимизация хорошо выполняется методом градиентного спуска, широко применяемым при спектральных измерениях и поиске расчётных спектров, наиболее близко соответствующих экспериментальным [1].

Результаты экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования сверхзвуковых течений при взаимодействии ударной волны с пограничным слоем проводились в Институте проточных машин Польской академии наук при исследовании на трансзвуковой установке [3]. Спеклограммы были записаны с помощью цифровой ПЗС-камеры "Сanon" с высоким разрешением. Запись осуществлялась дважды: первый снимок делался без потока, а второй — во время прохождения потока по трубе через некоторый промежуток времени Δt . Таким образом, второе спекл-поле получается смещённым относительно первого из-за рефракции лазерного луча на градиентах плотности потока.

Рис. 3, $a-d$ иллюстрирует один из таких экспериментов: две последовательные спеклограммы потока (a, b); результат обработки данных спеклограмм с помощью анализа кросскорреляционных плоскостей (c) и метода минимизации структурной функции (d).

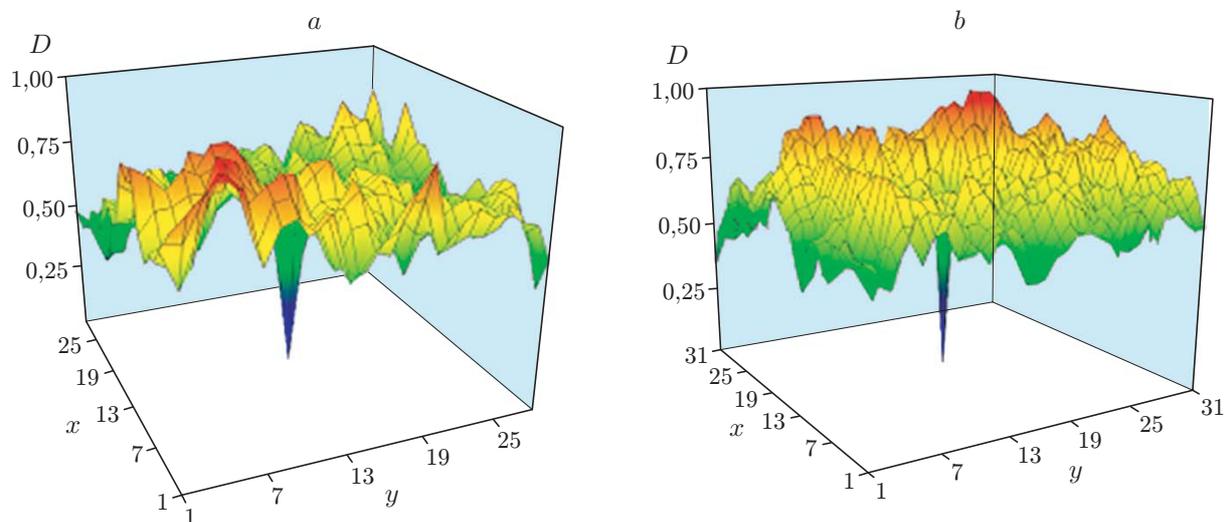


Рис. 2. Примеры полей структурной функции $D(m, n)$ с ярко выраженной точкой минимума, соответствующей среднему смещению спекл-поля в заданных областях

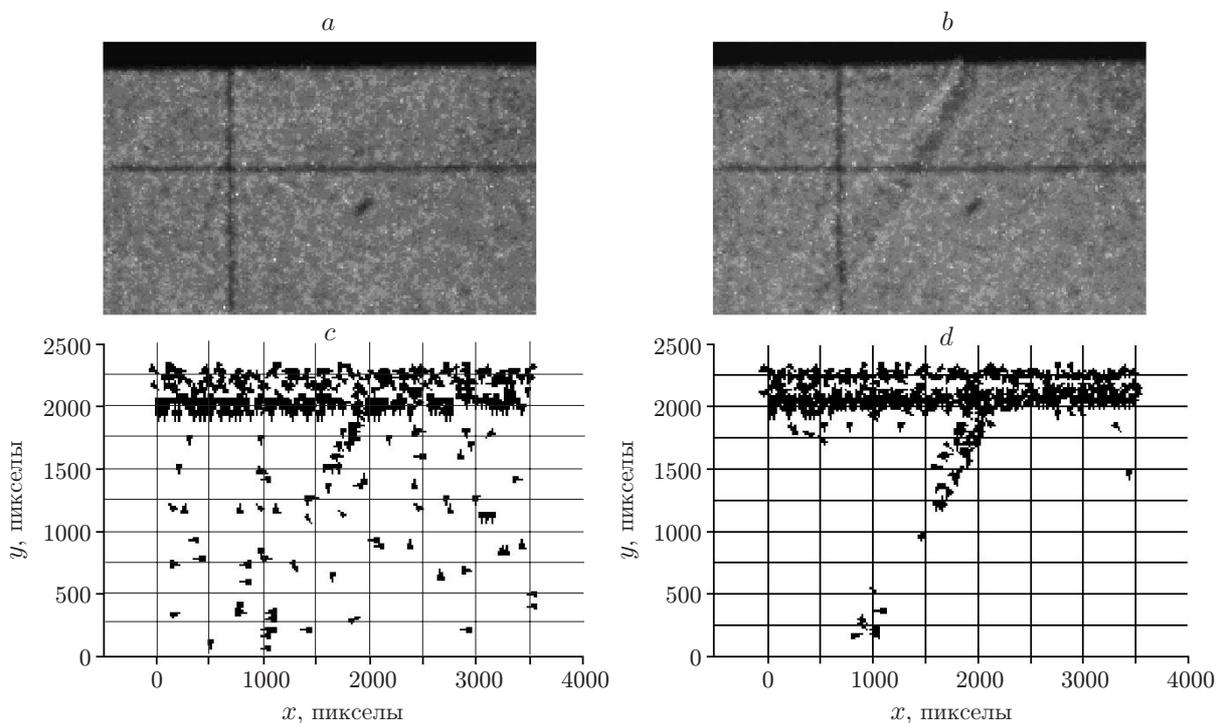


Рис. 3. Результаты исследования сверхзвукового течения при взаимодействии ударной волны с пограничным слоем: два последовательных спекл-изображения потока воздуха размером 3504×2336 пикселей (*a*, *b*); обработка данных изображений методом кросскорреляции (*c*) и методом наименьших квадратов (*d*). Размер окна усреднения 32×32 пиксела. Стрелки показывают направление градиента плотности и нанесены в точках, в которых угол отклонения световых лучей больше 10^{-6} рад

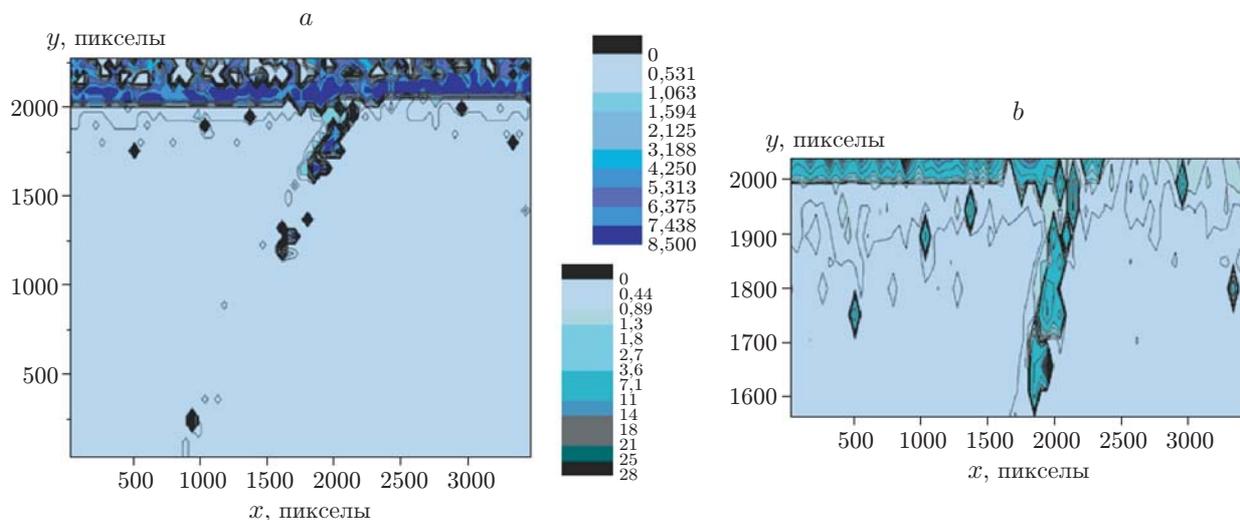


Рис. 4. Детализированный расчёт углов отклонения световых лучей (в 10^{-6} рад) в пограничном слое: *a* — фрагмент течения размером 20×30 мм, полученный с коэффициентом оптического увеличения $M = 1$; *b* — увеличенный фрагмент течения, полученный с $M = 4$

На рис. 4 приведено поле углов отклонения световых лучей в виде изолиний. Представленные данные показывают, что предельная чувствительность оптической схемы измерений при использовании как кросскорреляционных функций, так и минимизации структурной функции составляет 10^{-6} рад, а пространственное разрешение — около 30 мкм. На рис. 4, *a* показаны углы отклонения световых лучей во фрагменте течения 20×30 мм, полученные с оптическим увеличением $M = 1$. Так как наибольший интерес для исследования представляет область вблизи стенки канала, были проведены более детальные расчёты течения в приграничной области с субпиксельной точностью с использованием гауссовской аппроксимации. На рис. 4, *b* изображены результаты расчёта в небольшом фрагменте течения, взятом с оптическим увеличением $M = 4$. С заданным размером окна усреднения 32×32 пиксела можно получить мгновенное поле течения, содержащее до 10000 векторов смещения. Это позволяет отслеживать пограничный слой течения с точностью до 30 мкм. Следует подчеркнуть, что результаты анализа изображений дают не только качественные, но и количественные картины полей течений в канале, причём с достаточной точностью, так как с помощью известных соотношений можно восстановить поле градиентов плотности в течении [3].

Заключение. Результаты применения метода анализа спекл-изображений с субпиксельной точностью позволяют количественно определить углы отклонения зондирующих световых лучей в газодинамических неоднородностях порядка 10^{-6} рад. При фотографировании фрагмента течения размером 20×30 мм и для окна усреднения 32×32 пиксела возможно получение мгновенного поля течения, содержащего до 10000 векторов углов отклонения с пространственным разрешением порядка 30 мкм.

Проведённые исследования показали, что предлагаемый метод является надёжным инструментом для мониторинга структуры нестационарного течения при взаимодействии ударной волны с пограничным слоем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fomin N. A. Speckle Photography in Fluid Mechanical Measurements. Berlin: Springer, 1998. 228 p.

-
2. **Burch J. M., Tokarski J. M. J.** Production multiple beam fringes from photographic scatterers // *Opt. Acta.* 1968. **15**, N 2. P. 101–111.
 3. **Fomin N., Lavinskaya E., Doerffer P. et al.** Quantitative diagnostics of shock wave-boundary layer interaction by digital speckle photography // *Shock Waves.* Berlin — Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. Vol. 1. P. 457–462.
 4. **Briers J. D., Webster S.** Laser speckle contrast analysis (LASCA): a non-scanning, full-field technique for monitoring capillary blood flow // *Journ. Mod. Opt.* 1996. **1**, N 2. P. 174–179.
 5. **Raffel M., Willert C. E., Kompenhans J.** Particle Image Velocimetry. A Practical Guide. Berlin: Springer, 1998. 253 p.
 6. **Gui L., Merzkirch W.** A method of tracking ensembles of particle images // *Experiments in Fluids.* 1996. **21**, N 6. P. 465–468.

Поступила в редакцию 6 февраля 2012 г.
