ISSN 1814-1196
Научный вестник НГТУ
том 55, № 2, 2014, с. 132–138

http://journals.nstu.ru/vestnik
Scientific Bulletin of NSTU
Vol. 55, No. 2, 2014, pp. 132–138

УДК 535.8

Расширение функциональных возможностей *PIV*-систем с низким временным разрешением*

А.П. БЕЛОУСОВ

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, к. ф.-м. н., доцент, e-mail: abelousov@ngs.ru

Полевые измерители скорости *PIV* (Particle Image Velocimetry) хорошо зарекомендовали себя в гидромеханическом эксперименте. Основные преимущества таких систем – простота, доступность, надежность, отсутствие контакта с объектом, возможность получения значений 2D- и 3D-полей скорости, изменения температуры, концентрации примесей и т. д. К недостаткам можно отнести невысокую точность измерения параметров, низкое временное разрешение, адаптацию только к однофазным потокам большинства коммерческих систем. Тем не менее, получаемые данные удобны для верификации теоретических моделей. В рамках данного исследования расширены функциональные возможности полевых систем диагностики с низким временным разрешением на область турбулентных потоков. На базе измерительной системы Dantec Dynamics с программным обеспечением Dantec Flow Manager 4.0 созданы алгоритмы обработки экспериментальной информации. Тестовый объект – осесимметричная затопленная импактная струя. Диаметр сопла 15 мм. Расстояние между срезом сопла и поверхностью H = 30 мм. Число Струхаля 0,5. Число Рейнольдса 25000. На основе экспериментально измеренных мгновенных полей скорости получена информация об энергетических свойствах крупномасштабных вихревых структур, а также их пространственной локализации. Проведена оценка точности работы алгоритма. Полученные данные хорошо согласуются с современными теоретическими моделями.

Ключевые слова: полевая диагностика, *PIV*-системы, мгновенные поля скоростей, идентификация вихревых структур, турбулентные течения, струйные течения, импактные струи, крупномасштабные вихревые структуры, энергия, пространственная локализация, алгоритмы обработки экспериментальных данных

ВВЕДЕНИЕ

Системы полевой диагностики PIV наиболее перспективны и востребованы в современной однофазной гидромеханике. Несмотря на очевидные недостатки (низкое временное разрешение, затрудненный оптический доступ, невысокая точность и т. д.), скорость и качество получения информации открывает широкие возможности контроля и оптимизации работы промышленных установок, а также верификации теоретических моделей физических явлений. Ввиду доступности и распространенности системы актуальная задача – развитие методов обработки данных, позволяющих улучшить характеристики базовых систем.

Кратко рассмотрим метод измерения поля скоростей. Система заключает в себе нескольких структурных единиц: трассеры, импульсный/непрерывный световой источник, цифровая/пленочная фотокамера, устройство хранения и обработки информации. Перед началом эксперимента в поток добавляются трассеры (мелкие частицы с плотностью равной плотности среды). Световое излучение анаморфотной оптической системой преобразуется в плоскость (световой нож), выделяя в потоке исследуемую область. Рассеянное трассерами излучение фиксируется пленочной или цифровой камерой. При использовании пленочных камер проводится последующая оцифровка изображения. Трассеры, находящиеся в световом ноже, освещаются дважды. Временная задержка между импульсами зависит от средней скорости потока и увели-

* *Статья получена 28 марта 2014 г.*

чения оптической системы. Полагают, что трассеры между импульсами перемещаются равномерно.

Для обработки цифровое изображение разбивается на области, называемые «расчетными». Вектор локального смещения для изображений трассеров на первом и втором кадре определяется для каждой расчетной области статистическими (авто- и кросскорреляционными) методами.

Процесс обработки повторяется для всех расчетных областей изображений. С использованием современных фоточувствительных полупроводниковых матриц CCD-камер (1000×1000 и более чувствительных элементов) существует возможность записывать более 100 изображений в минуту. Высокоскоростная фиксация при помощи взаимодополняющих МОП-структур (CMOS) позволяет фиксировать изображения с частотой порядка килогерца. Расчет нескольких тысяч мгновенных векторов скорости (в зависимости от размера изображения и алгоритма обработки) занимает порядка секунды на стандартных компьютерах. Существуют коммерческие системы, которые позволяют проводить мониторинг потока в реальном времени [1].

Цель данной работы – расширение функциональных возможностей полевых систем диагностики на область турбулентных потоков, создание алгоритмов обработки экспериментальной информации на базе измерительной системы Dantec Dynamics с программным обеспечением Dantec Flow Manager 4.0.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В качестве тестового объекта была выбрана осесимметричная затопленная импактная струя – основной элемент современных теплообменных систем. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Жидкость (дистиллированная вода t = 25 °C) циркулировала в замкнутом гидродинамическом контуре, который состоял из прямоугольного бака с размерами 200×200×300 мм, изготовленного из органического стекла, резервуара, системы соединительных труб и датчиков для контроля параметров эксперимента. В прямоугольный бак вертикально через дно вводилось сопло (d = 15 мм, профиль соответствует зависимости Витошинского [2], длина сопла 2d, степень поджатия 3), так чтобы поток жидкости натекал на импактную поверхность под углом 90°. Для создания периодического возмущения потока использовался стандартный электродинамический вибратор ESE-201, соединенный с успокоительной камерой через сильфон.

Для измерения поля скорости применялась система *PIV*. Излучение импульсного лазера *Nd*:*YAG* (вторая гармоника λ = 532 нм) преобразовывалось анаморфотной оптической системой в лазерный нож, который выделял в потоке исследуемое сечение. Лазер давал две последовательные вспышки. Вторичное излучение флуоресцентных трассеров (полимерные частицы, плотность близка к плотности воды, диаметр 20 мкм) для улучшения качества изображения проходило через световой фильтр и фиксировалось камерой, что позволяло избавиться от шумовой засветки. Полученные изображения анализировались системой обработки. Трассеры добавлялись в жидкость перед началом эксперимента и были распределены в потоке равномерно. Объемная концентрация составляла величину ~ $8 \cdot 10^{-3}$ %.

Измерения проводились при числе Рейнольдса Re = 25 000, определяемого как

$$\mathrm{Re} = \frac{U_0 d}{\nu},$$

где ν – кинематическая вязкость жидкости; U_0 = 1,6 м/с – среднерасходная скорость потока. Расстояние между срезом сопла и импактной поверхностью H = 30 мм (H/d = 2), что соответствует характерным режимам работы струйных теплообменников [2, 3]. Параметры *PIV*-системы: программное обеспечение (Dantec Flow Manager v. 4.0), время между последовательными вспышками лазера 20 мс, физический размер области измерения 53×30 мм, разрешение

0,67 мм/вектор, размер расчетной области 32×32 пикселя (1,34×1,34 мм), ширина ножа 1 мм. Согласно [1] относительная погрешность измерения скорости не превышала 6 %. Измерения проводились при упорядоченной генерации вихревых образований путем внешнего периодического воздействия, позволяющего создавать в потоке когерентные структуры. Частота воздействия f определялась оптимальным для данной системы значением числа Струхаля

$$\mathrm{Sh} = \frac{f \cdot d}{U_0} = 0,5 .$$

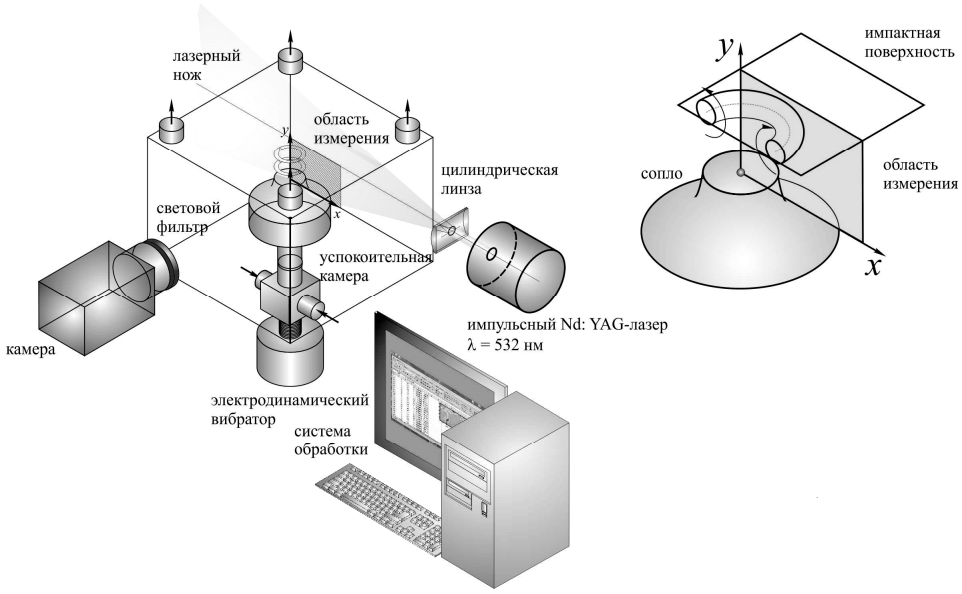


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

2. АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР

Проанализируем мгновенные поля скоростей $\mathbf{V}(x_i, y_i)$ (x_i, y_i – дискретные координаты точек пространства, задаваемые системой PIV в декартовой системе координат). Значение завихренности векторного поля $\mathbf{V}(x_i, y_i)$ скорости для точек (x_i, y_i) вычисляется по формуле

$$\mathrm{rot}\,\mathbf{V} = \left(\frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) \mathbf{k} , \qquad (1)$$

где V_x, V_y – проекции вектора скорости на оси x и y соответственно, $\mathbf{k}$ – единичный вектор в направлении оси z.

Для определения границ области занятой вихревым образованием выбирается некоторое пороговое значение завихренности (выше уровня шума) $I_{\mathrm{tr}} = 0,2 \cdot I_{\max}$, позволяющее четко идентифицировать вихри. Форма вихревых тороидальных структур в плоскости лазерного ножа близка к круговой ($d_V \approx 5$ мм). Положение центров определяется как

$$X = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} X_i , \quad Y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} Y_i ,$$

где X, Y – координаты центра; N – число точек вихревого образования; X_i, Y_i – текущие координаты точки.

Кинетическая энергия, заключенная в сечении вихревого образования толщиной $l = x_i - x_{i-1} = y_i - y_{i-1}$, рассчитывается по формуле

$$E = \frac{1}{8}\rho l^3 \sum_i I^2(x_i, y_i)\left[(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2\right]\frac{1}{2}, \qquad (2)$$

где ρ – плотность жидкости, x_0, y_0 – координаты центра вихревой структуры. Суммирование ведется по области, занимаемой вихрем [3–9].

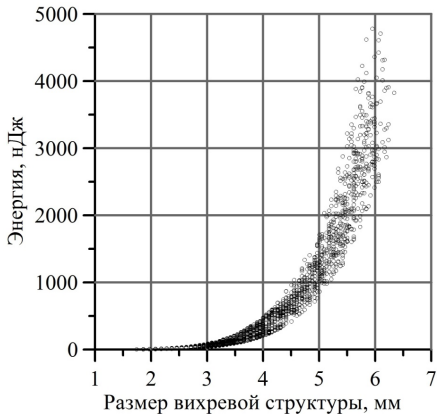


Рис. 2. Зависимость кинетической энергии вихревого движения от размера вихревой структуры

На рис. 2 показано распределение вихрей по энергиям в зависимости от размера, определяемого пороговым значением завихренности. Видно, что в изучаемой области энергия связана с размером вихревой структуры по квадратичному закону, как отмечалось в [4].

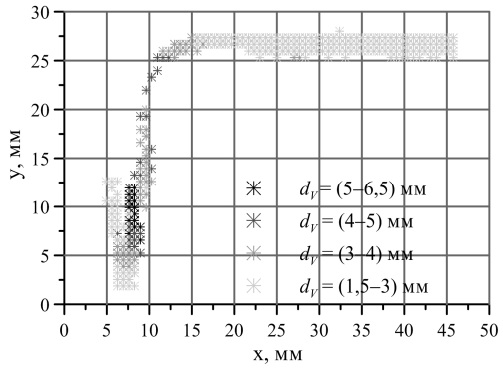


Рис. 3. Пространственная локализация вихревых структур в зависимости от диаметра d_V

На рис. 3 приведено пространственное распределение областей локализации вихревых структур. Вследствие симметрии струи рассматривается только ее правая половина. Центр струи соответствует координате x = 0 мм; импактная поверхность – y = 30 мм; край сопла – координатам x = 7,5 мм, y = 0 мм.

Вблизи сопла размер вихрей минимален, минимальна и их энергия. Вниз по потоку вихри увеличиваются в размерах, достигая максимума при y = (5 – 12,5) мм. Далее вихри постепенно уменьшаются в размерах [3].

3. ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР

Проведем оценку точности работы алгоритма. Характерный диаметр вихря ~ 5 мм, $x_i - x_{i-1} = y_i - y_{i-1} = 0{,}67$ мм. Среднерасходная скорость потока 1,6 м/с.

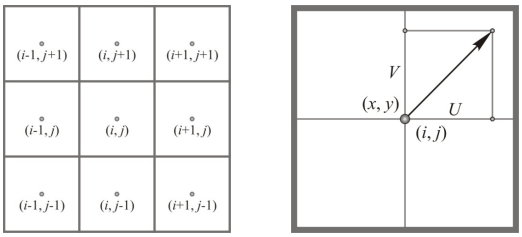


Рис. 4. К оценке точности определения параметров вихревых структур

Согласно (1) величина завихренности определяется как

$$\mathbf{I} = \left[\frac{V_{i+1,j} - V_{i-1,j}}{x_{i+1,j} - x_{i-1,j}} - \frac{U_{i,j+1} - U_{i,j-1}}{y_{i,j+1} - y_{i,j-1}} \right] \mathbf{k} ,$$

где U и V – x-, y – компоненты скорости (рис. 4). Погрешность косвенных измерений [10]

$$\Delta \mathbf{I}\left(x_1, ..., x_n\right) = \sqrt{\sum_{m=1}^{n} \left[\left(\frac{\partial I\left(x_1, ..., x_n\right)}{\partial x_m} \right)^2 \left(\Delta x_m\right)^2 \right]} .$$

Таким образом,

$$\left[\frac{\Delta I}{I}\right]^2 = \frac{1}{I^2} \left[\left(\frac{1}{x_{i+1,j} - x_{i-1,j}} \Delta V_{i+1,j} \right)^2 + \left(\frac{1}{x_{i+1,j} - x_{i-1,j}} \Delta V_{i-1,j} \right)^2 + \right.$$

$$+ \left(\frac{V_{i+1,j} - V_{i-1,j}}{\left(x_{i+1,j} - x_{i-1,j}\right)^2} \Delta x_{i+1,j} \right)^2 + \left(\frac{V_{i+1,j} - V_{i-1,j}}{\left(x_{i+1,j} - x_{i-1,j}\right)^2} \Delta x_{i-1,j} \right)^2 +$$

$$+ \left(\frac{1}{y_{i,j+1} - y_{i,j-1}} \Delta U_{i,j+1} \right)^2 + \left(\frac{1}{y_{i,j+1} - y_{i,j-1}} \Delta U_{i,j-1} \right)^2 +$$

$$\left. + \left(\frac{U_{i,j+1} - U_{i,j-1}}{\left(y_{i,j+1} - y_{i,j-1}\right)^2} \Delta y_{i,j+1} \right)^2 + \left(\frac{U_{i,j+1} - U_{i,j-1}}{\left(y_{i,j+1} - y_{i,j-1}\right)^2} \Delta y_{i,j-1} \right)^2 \right].$$

Для простоты примем, что наибольший градиент скорости направлен поперек слоя смешения, тогда

$$\begin{cases} V_{i+1,j} - V_{i-1,j} = \left(x_{i+1,j} - x_{i-1,j}\right) \dfrac{U_0}{d_V} = 2 \cdot 0{,}67 \text{мм} \dfrac{1{,}6 \text{м/с}}{4 \text{мм}} = 0{,}54 \text{ м/с}, \\ \mathrm{U}_{i,j+1} - U_{i,j-1} = 0 \text{ м/с} \end{cases}$$

и оценка примет вид

$$\left[\frac{\Delta I}{I}\right]^2 = \frac{1}{I^2}\left[\left(\frac{1}{x_{i+1,j}-x_{i-1,j}}\Delta V_{i+1,j}\right)^2 + \left(\frac{1}{x_{i+1,j}-x_{i-1,j}}\Delta V_{i-1,j}\right)^2 + \right.$$
$$\left. + \left(\frac{V_{i+1,j}-V_{i-1,j}}{\left(x_{i+1,j}-x_{i-1,j}\right)^2}\Delta x_{i+1,j}\right)^2 + \left(\frac{V_{i+1,j}-V_{i-1,j}}{\left(x_{i+1,j}-x_{i-1,j}\right)^2}\Delta x_{i-1,j}\right)^2\right]. \quad (3)$$

Величина завихренности

$$I \approx \frac{V_{i+1,j}-V_{i-1,j}}{x_{i+1,j}-x_{i-1,j}} \approx \frac{0,54\text{м/с}}{0,67\cdot 10^{-3}\text{м}} \approx 806 \text{ рад/с}.$$

$\Delta V_{i+1,j} \approx \Delta V_{i-1,j} \approx 1$ м/с $\cdot$ 0,06 $\approx 6\cdot 10^{-2}$ м/с. Точность измерения координаты определяется параметрами CCD-матрицы и не превышает величину 0,01%, таким образом, $\Delta x = 0,67\cdot 10^{-3}$ м $\cdot$ 10^{-4} = $= 0,67\cdot 10^{-7}$ м. Подставляя приведенные величины в формулу (3), получим величину относительной погрешности измерения завихренности на уровне 15 %.

Проведем оценку погрешности определения энергии. Согласно (2) $E \sim kI^2$, откуда следует

$$\frac{\Delta E}{E} = 2\cdot\left(\frac{\Delta I}{I}\right) = 31\ \%.$$

Относительная погрешность расчета энергии всего вихря не превышает величины $\Delta E/E$. Согласно экспериментальным данным (рис. 2), для вихревой структуры размером 5 мм погрешность составляет величину ~ 30 %, что близко к теоретическим оценкам. Следует отметить, что использование алгоритмов «сглаживания» пульсаций путем осреднения по соседним векторам скорости позволяет повысить точность измерений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен алгоритм определения энергетических свойств вихревых структур, расширяющий функциональные возможности *PIV*-систем с низким временным разрешением на область турбулентных потоков. Проведен тестовый эксперимент. Построена зависимость энергии от размера вихревой структуры. Пространственная локализация вихревых структур в зависимости от размера соответствует современным теоретическим моделям гидромеханики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] **Raffel M., Willert C., Kompenhance J.** Particle Image Velocimetry: a practical guide. – Berlin: Springer, 1998. – 252 p.

[2] **Дыбан Е.П., Мазур А.И.** Конвективный теплообмен при струйном обтекании тел. – Киев: Наукова думка, 1982. – 303 с.

[3] **Лойцянский Л.Г.** Механика жидкости и газа: учеб. для вузов. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.

[4] **Agrawal A., Prasad A.K.** Measurements within vortex cores in a turbulent jet // J. of Fluids Engineering. – 2003. – Vol. 3, № 125. – P. 561–568.

[5] **Chhabra S., Hug P., Prasad A.K.** Characteristics of small vortices in a turbulent axisymmetric jet // J. of Fluids Engineering. – 2006. – Vol. 3, № 128. – P. 439–445.

[6] **Белоусов А.П.** Пространственное распределение газовой фазы в осесимметричной затопленной импактной струе // Прикл. механика и техн. физика. – 2009. – № 4 (50). – С. 33–38.

[7] **Белоусов А.П.** Влияние дисперсной фазы на турбулентную структуру осесимметричной затопленной импактной струи // Теплофизика и аэромеханика. – 2008. – Т. 15, № 3. – С. 435–440.

[8] **Белоусов А.П.** Влияние дисперсной фазы на энергетические свойства крупномасштабных вихревых структур // Прикл. механика и техн. физика. – 2011. – № 5 (52). – С. 80–84.

[9] **Белоусов А.П.** Оптическая диагностика многофазных потоков: учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 227 с.

[10] **Зайдель А.Н.** Элементарные оценки ошибок измерений. – Л.: Наука, 1967. – 88 с.

Белоусов Андрей Петрович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – оптические методы исследования потоков. Имеет более 50 публикаций. E-mail: abelousov@ngs.ru

*Enhancement of possibilities of low time resolution PIV systems**

A.P. BELOUSOV

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospect, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Ph.D., associate professor, e-mail: abelousov@ngs.ru

Field velocimeters PIV (Particle Image Velocimetry) are well-established devices in hydromechanical experiments. Simplicity, availability, validity, lack of contact with object, a possibility of receiving 2D and 3D field velocity values, temperature or impurity alterations, etc. are the main advantages of such systems. However, a low accuracy of parameter measurements, a low temporal resolution, and adaptation to only monophasic flows are the limitations of most commercial systems. Nevertheless the data obtained are convenient for the verification of theoretical models. Within the framework of the present investigation functional capabilities of the field velocimeters were expanded in the turbulent flow domain. Processing algorithms were developed on the basis of the Dantec Dynamics measuring system using the Dantec Flow Manager 4.0 software. An axisymmetrical submerged impact jet was used as a test object, with nozzle diameter d being 15 mm, the distance between nozzle and surface H being 30 mm, the Strouhal number Sh being 0.5, and the Reynolds number Re being 25000. Energy properties of large-scale vortical structures and their spatial locality were determined based on experimentally measured instant velocity fields. The algorithm operation accuracy has been estimated. The data obtained are in good agreement with recent theoretical models.

Keywords: field diagnostics, PIV system, instantaneous velocity filed, vortical structures identification, turbulent flow, jet flow, impact jet, large-scale vortex structure, energy, spatial localization, data processing algorithm

REFERENCES

[1] Raffel M., Willert C., Kompenhans J. Particle image Velocimetry: A practical guide. Berlin, Springer Publ., 1998. 252 p.

[2] Dyban E.P., Mazur A.I. *Konvektivnyi teploobmen pri struinom obtekanii tel* [Convective heat transfer in a jet flow tel]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1982. 303 p.

[3] Loitsyansky L.G. *Mehanica zidkosti i gasa* [Fluid mechanics]. Moscow, Drofa Publ., 2003. 840 p.

[4] Agrawal A., Prasad A.K. Measurements within vortex cores in a turbulent jet. J. of Fluids Engineering, 2003, no 3 (125), pp. 561-568.

[5] Chhabra S., Hug P., Prasad A.K. Characteristics of small vortices in a turbulent axisymmetric jet. J. of Fluids Engineering, 2006, no. 3 (128), pp. 439-445.

[6] Belousov A.P. Prostranstvennoe raspredelenie gazovoi fazy v osesimmetrichnoi zatoplennoi impaktnoi strue [Spatial distribution of the gas phase in an axisymmetric submerged impact jet]. *Prikladnaia mekhanika i tekhnicheskaia fizika – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2009, Vol. 50, no. 4, pp. 570-575.

[7] Belousov A.P. Vliyanie dispersnoi fazy na turbulentnuyu strukturu osesimmetrichnoi zatoplennoi impaktnoi strui [Influence of dispersed phase on the turbulent structure of submerged axisymmetric impact jet]. *Teplofizika i aeromekhanica – Thermophysics and Aeromechanics*, 2008, Vol. 15, no. 3, pp. 409-414.

[8] Belousov A.P. Vliyanie dispersnoi fazy na energeticheskye svoistva krupnomasshtabnykh vihrevykh struktur [Impact of the disperse phase on the energetic properties of large-scale vortex structures]. *Prikladnaia mekhanika i tekhnicheskaia fizika – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2011, Vol. 52, no. 5, pp. 744-747.

[9] Belousov A.P. Opticheskaya diagnostika mnogofaznykh potokov [Optical diagnostics of multiphase flows]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011. 227 p.

[10] Zaidel A.N. *Elementarnye otsenki oshibok izmerenii* [Elementary evaluation of errors of measurements]. Leningrad, Nauka Publ., 1967. 88 p.

ISSN 1814-1196, http://journals.nstu.ru/vestnik
Scientific Bulletin of NSTU
Vol. 55, No. 2, 2014, pp. 132–138

* *Manuscript received March 28, 2014.*