

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ СТРОЕНИЯ ГАЗОВЫХ ФАКЕЛОВ

Д. Дорж, П.Ю. Худяков, Б.П. Жилкин

Изучалась эффективность применения разных методов обработки оптической информации: полученные результаты по прямым и закрученным высокотемпературным струям с химическими реакциями. Для создания прямооточных факелов применялась классическая эжекционная горелка с круглым смесительным каналом. Для создания закрученных струй в том же канале размещались специальные аксиальные завихрители с плоскими лопатками. Рассматривались обычно применяемые способы, а также новый подход – применение вейвлет-анализа. Выявлены различия в структуре упомянутых потоков и особенности термомеханики газовых факелов, установленные с помощью разных методик. Делается вывод о том, что не существует какого-либо предпочтительного метода компьютерной идентификации турбулентных структур: каждый из апробированных методов давал новую оригинальную информацию о структурообразовании в факеле.

Ключевые слова: вейвлет-анализ, газовый факел, завихритель, тепловизор, структурное образование.

Введение

Для точного управления процессом горения необходимо провести идентификацию структуры факела. Строению различных видов факелов посвящено большое количество работ [1–5], но все они основаны на квазистационарном подходе. Однако квазистационарные представления о строении факелов исчерпали себя, и поэтому стали развиваться методы изучения динамической структуры таких турбулентных объектов.

Из них наиболее эффективными являются: метод анализа главных компонент (МАГК), PIV-метод, дисперсионный и частотный анализ, вейвлет-анализ.

МАГК (PCA – Principal Component Analysis) нашел широкое применение при обработке многомерных данных в разных отраслях: в криминалистике при распознавании человеческих лиц, при сжатии изображений и т. п. [6].

Основное свойство главных компонент состоит в том, что при сохранении свойства ортогональности для них главные компоненты расположены в пространстве так, что соответствуют направлениям максимальной вариации первоначальных данных. Однако физическая интерпретация результатов МАГК затруднена. Также необходимо помнить, что МАГК не обеспечивает полного разделения информации о структурах и шумах.

Метод PIV (Particle Image Velocimetry) состоит в обнаружении перемещения частиц на последовательности изображений. Его современная интерпретация заключается в том, что PIV является наиболее быстрым методом нахождения кросс-корреляции [7]. К недостаткам PIV-метода следует отнести трудность физической интерпретации его результатов, а также большие временные затраты при вычислениях.

При дисперсионном и частотно-фазовом анализе обрабатывается последовательность оптических изображений, полученных путем фоторегистрации контрольной области турбулентного потока. Фоторегистрация может производиться в различном диапазоне длин волн излучения в зависимости от задачи исследований.

При излучении явлений теплопереноса фоторегистрацию производят в инфракрасной части спектра, чтобы выявить структуры, участвующие в теплообмене.

При дисперсионном анализе [7] для каждой точки (пикселя) оптического изображения вычисляется дисперсия (стандартное отклонение) контрольного параметра. При этом под когерентным турбулентным образованием, точнее под областью потока, где оно существует, понимается зона, в которой дисперсия имеет одинаковую величину. Эта область визуализируется цветом или черно-белым шаблоном заливки, чтобы получить видимую структурную картину потока. Основным недостатком дисперсионного анализа является отсутствие информации о частоте пульсаций контрольного параметра, что не позволяет строить структурно-иерархические модели турбулентности.

При частотно-фазовом анализе, основанном на быстром преобразовании Фурье, обработка оптической информации в случае тепловизионного фильма производится по следующему алгоритму [7, 8]: для каждой точки матрицы строится временной ряд, состоящий из отдельных элементов (число которых равняется количеству кадров съемки), после чего этот ряд обрабатывается по быстрому преобразованию Фурье.

При этом под структурным образованием в турбулентном потоке (факеле) понимается область, где контрольные параметры пульсируют с

одинаковой характеристической частотой и в одной фазе [7, 8]. Под характеристической понимается частота, соответствующая главному максимуму в собственном спектре пульсаций контрольного параметра. Таким образом, пиксели исходных матриц, в которых контрольный параметр пульсирует с одинаковой частотой и фазой, считаются относящимися к одному турбулентному образованию. Такая интерпретация имеет явное физическое обоснование, в чем и состоит её достоинство. К существенному недостатку частотно-фазового анализа следует отнести отсутствие возможности получения информации об изменении частоты пульсации во времени.

При структурном подходе к изучению турбулентности и, в том числе, иерархическом её построении, целесообразно применение вейвлет-преобразования для получения новой информации о закономерностях структурообразования.

Вейвлет – это математическая функция, позволяющая анализировать различные частотные компоненты данных. График этой функции выглядит как волнообразные колебания с амплитудой, уменьшающейся до нуля вдали от начала координат. Однако это частное определение; в общем случае анализ сигналов производится в плоскости вейвлет-коэффициентов.

Вейвлет-преобразование является интегральной операцией, представляющей собой свертку сигнала вейвлет-функцией, и таким образом, служит способом преобразования функции (или сигнала) в форму, которая делает некоторые величины исходного сигнала более поддающимися изучению или позволяет сжать исходный набор данных. В принципе, вейвлет-преобразование сигналов является обобщением спектрального анализа [8, 9].

Описание экспериментальной установки

Для изучения строения факелов применялась экспериментальная установка, схема которой показана на рис. 1.

Для создания прямоточных факелов использовалась классическая инжекционная горелка, внутренний диаметр смесительного канала которой равнялся 17 мм, а его длина составляла 50 мм.

Для создания закрученной струи в том же канале размещался специальный аксиальный завихритель с плоскими лопатками. Отличие этого завихрителя в том, что у него отсутствует центральная втулка, как в традиционных конструкциях. Применение такого завихрителя обусловлено тем, что он создает более мощную зону обратных токов, которая позволяет значительно расширить диапазон устойчивого горения. Массовый расход газа G определялся с помощью электронных весов.

Для измерения поля температур факелов использовался тепловизор NEC TH9100. Данные с тепловизора по интерфейсу FireWire передавались на персональный компьютер и записывались на жесткий диск при помощи программного обеспечения, поставляемого комплектно с тепловизором.

Тепловизор передавал экспериментальные данные о поле температур в программу NEC Image Processor. При помощи этой программы записывался тепловизионный фильм с частотой 30 Гц, каждый кадр которого переводился в матрицу с расширением «csv». Таким образом, тепловизионный фильм преобразовывался в массивы температур, с размерностью 240×320×970 (240 и 320 означают длину и ширину в пикселях, а 970 – число кадров).

Обработка этих массивов производилась с помощью специальной программы, которая была написана в среде MathWorks – MATLAB версии

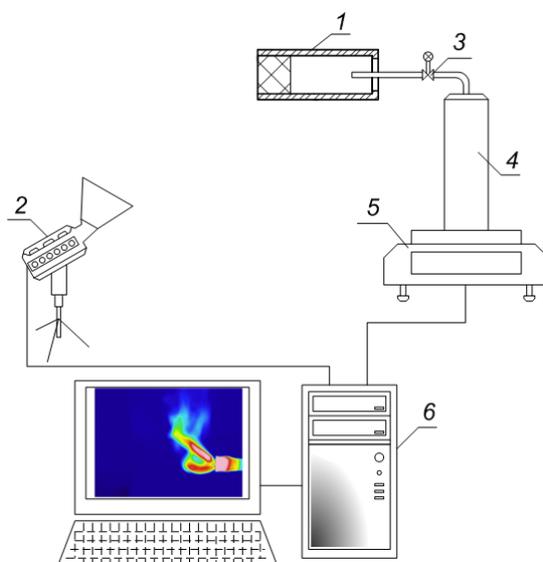


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для изучения газовых факелов: 1 – опытная горелка; 2 – тепловизор; 3 – газовый вентиль; 4 – баллон с топливом; 5 – электронные весы; 6 – персональный компьютер

R2012b. Для минимизации вычислительных затрат и увеличения точности, массив температуры был разделен на временные фрагменты, которые были равны 512 кадрам, т. е. отдельный массив температур состоял из 512 матриц.

После обработки временного ряда формировались матрицы векторов, которые визуализировались цветом.

Результаты обработки различными методами

На рис. 2 представлены результаты идентификации структуры свободного прямого газового факела, выполненной дисперсионным и частотно-фазовыми методами. Напомним, что в качестве контрольного параметра использовалась температура.

Было установлено существование в прямооточном факеле зон, в которых температура пульсировала с одинаковой частотой, но в разных фазах.

Наблюдения динамической картины показали, что когерентные образования непрерывно перемещаются в зоне факела, переходя из одной области в другую, т. е. наблюдался эффект пространственно-временной перемежаемости.

На рис. 3 представлена визуализация структуры свободных и закрученных факелов, полученная с помощью вейвлет-анализа. При выполнении дискретного вейвлет-преобразования использованы два разных базиса – Добеши и Хаара [9, 10]. В целом результаты, полученные при этих различных базисах, отличаются друг от друга незначительно.

Сразу отметим, что проявилось одно из самых важных достоинств вейвлет-преобразования – фильтрация шума, что позволило получить наиболее чистые (самодостаточные) результаты.

Изображения на рис. 3 соответствуют низким частотам, а высокочастотная область представлена на рис. 4.

Показательно, что применение вейвлет-анализа позволяет выделить более мелкие вихри или их совокупности, кроме того, появляется возможность отследить их эволюцию в потоке.

Следует отметить, что изображение для высоких частот является более информативным (см. рис. 4).

На высокочастотном изображении отчетливо видно различие в строении факелов: прямооточный факел содержит группу подвижных мелкоячеистых

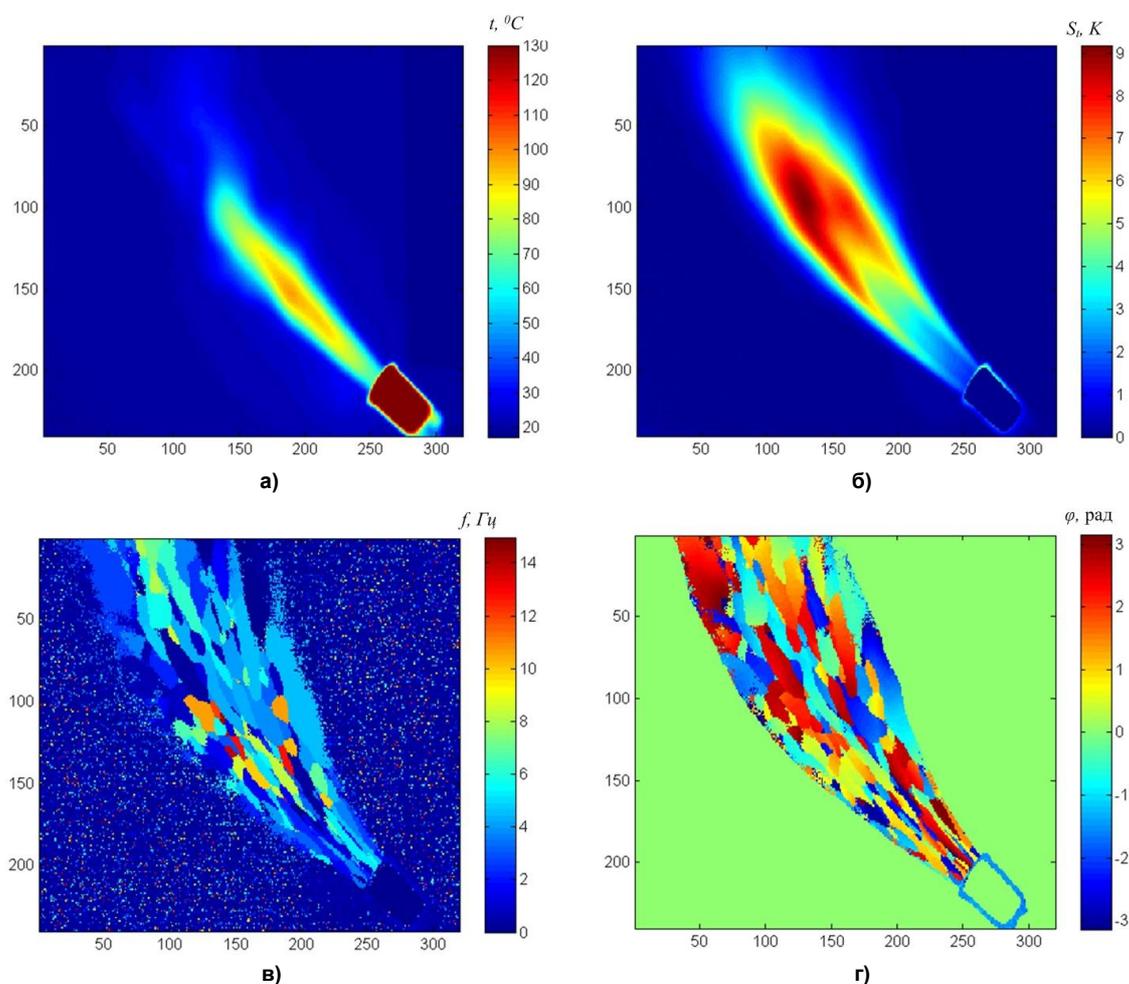


Рис. 2. Тепловизионное изображение свободного одиночного газового факела (шкала температур условна) (а); стандартное отклонение температуры S_t (б); характерные частоты пульсаций f (в); фаза пульсации ϕ (г). Топливо (смесь): изобутан 80 %, бутан 15 %, пропан 5 %

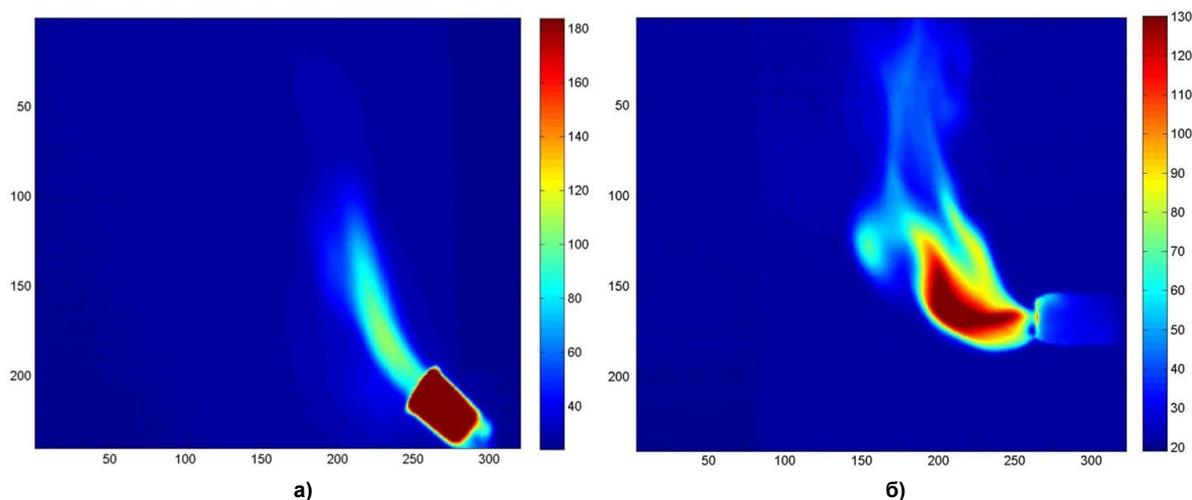


Рис. 3. Результаты вейвлет-анализа свободного (а) и закрученного (б) факелов (низкие частоты) ($G_{r,a} = 0,024$ г/с, $G_{r,b} = 0,023$ г/с). Топливо: а – смесь: изобутан 80 %, бутан 15 %, пропан 5 %; б – бутан 100 %. Завихритель (б) с углом установки лопаток 45°

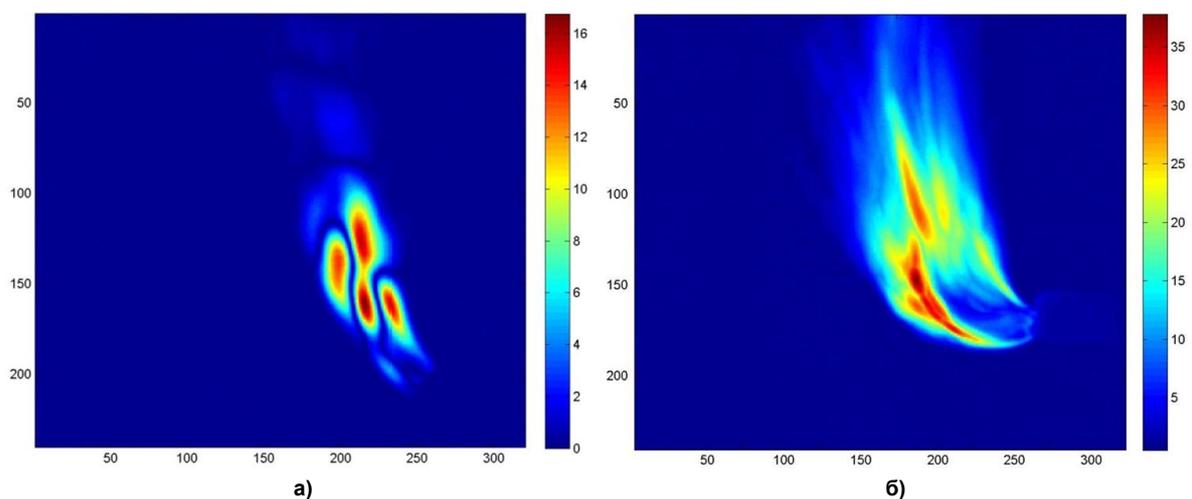


Рис. 4. Результаты вейвлет-анализа свободного (а) и закрученного (б) факелов (высокие частоты) ($G_{r,a} = 0,024$ г/с, $G_{r,b} = 0,023$ г/с). Топливо: а – смесь: изобутан 80 %, бутан 15 %, пропан 5 %; б – бутан 100 %. Завихритель (б) с углом установки лопаток 45°

структур, а в закрученном факеле просматриваются крупномасштабные структурные образования, т. е. термомеханика процессов существенно различна.

При данном виде преобразования также проявился упомянутый эффект перемежаемости.

Нужно отметить, что применение непрерывного вейвлет-преобразования в сравнении с дискретным требует больших временных затрат: вычисления происходят на несколько порядков дольше.

Конечно, пока нельзя дать убедительную физическую трактовку результатов вейвлет-анализа, поскольку сама теория динамической структурной турбулентности находится лишь в стадии зарождения. Но безусловно, они несут принципиально новую информацию о структурах, накопление которой сейчас крайне необходимо.

Выводы

Основываясь на полученных результатах, можно сделать следующие выводы:

- Не существует какого-либо предпочтительного метода компьютерной идентификации турбулентных структур: каждый из них дает новую, иную информацию о когерентных образованиях в газовом потоке, которая в каждом конкретном случае может быть наиболее значимой.

- Не определены критерии исходного выбора метода структурного анализа под определенную задачу, что объясняется отсутствием достаточно разработанной теории динамической структурной турбулентности.

Литература

1. Зельдович, Я.Б. Теория горения и детонации газов / Я.Б. Зельдович, Н.Н. Семенов. – М.: АН СССР, 1944. – 70 с.

2. Шелкин, К.И. Газодинамика горения / К.И. Шелкин, Я.К. Трошин. – Изд-во АН СССР, 1963. – 375 с.
3. Щетинков, Е.С. Физика горения газов / Е.С. Щетинков. – М.: Наука, 1965. – 739 с.
4. Михеев, В.П. Сжигание природного газа / В.П. Михеев, Ю.П. Медников. – Л.: Недра, 1975. – 391 с.
5. Хзмалян, Д.М. Теория горения и топочных устройства / Д.М. Хзмалян, Я.А. Каган. – М.: Энергия, 1976. – 488 с.
6. Применение Фурье-анализа и метода анализа главных компонент для обработки данных динамического теплового контроля / В.П. Вавилов, Д.А. Нестерук, В.В. Ширяев, W. Swiderski // Известия Томского политехнического университета. –

- 2008 – Т. 312, № 2 (Приложение). – С. 279–285.
7. Хмелевой, С.В. Использование GPU для расчетов скоростей газо-жидкостных сред с помощью метода PIV / С.В. Хмелевой // Радиоэлектронные и компьютерные системы. – 2012. – № 6. – С. 124–129.
8. Худяков, П.Ю. Газодинамика и теплообмен при соударении прямоточных газовых струй: дис. ... канд. физ.-мат. наук / П.Ю. Худяков. – Екатеринбург, 2013. – 172 с.
9. Дьяков, В.П. Вейвлеты. От теории практики / В.П. Дьяков. – М.: СОЛОН-Р, 2002. – 448 с.
10. Яковлев, А.Н. Основы вейвлет-преобразования сигналов: учеб. пособие / А.Н. Яковлев. – М.: САЙНС-ПРЕСС, 2003. – 80 с.

Дорж Даваацэрэн, аспирант кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника», Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; davaa9120@yahoo.com.

Худяков Павел Юрьевич, канд. физ.-мат. наук, преподаватель кафедры «Тепловые электрические станции», Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; lumen_xp@mail.ru.

Жилкин Борис Прокопьевич, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника», Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; zhilkin@gmail.com.

Поступила в редакцию 3 октября 2014 г.

**Bulletin of the South Ural State University
Series "Power Engineering"
2014, vol. 14, no. 4, pp. 5–10**

APPLICATION OF WAVELET ANALYSIS FOR STRUCTURE IDENTIFICATION OF GAS FLAME

D. Dorj, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation, davaa9120@yahoo.com,

P.Yu. Khudyakov, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation, lumen_xp@mail.ru,

B.P. Zhilkin, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation, lumen_xp@mail.ru

We studied the effective using of different methods of optical information processing: we obtained results on direct and swirling jets with high-temperature chemical reactions. To create direct flow flames we used: classical ejection burner with circular mixing channels. To create swirling jets in the same channel we placed special axial swirlers with plane blades. We considered commonly used methods and a new approach, namely application of wavelet analysis. Using different methods we discovered differences in the structure of mentioned streams and peculiarities of gas flame thermal mechanics. We conclude that there is no any preferential method of computer identification of turbulent structures: each approved method gave new and original information on the structure formation in the flame.

Keywords: wavelet analysis, gas flame, swirler, thermal imager, structure formation.

References

1. Zeldovich Ya. B., Semenov N.N. *Teoriya goreniya i detonatsii gazov* [Theoretical Combustion and Gas Detonation]. Moscow, 1944. 70 p.
2. Shchelkin K.I., Troshin Ya.K. *Gazodinamika goreniya* [Combustion Gas Dynamics], SA USSR Publ., 1963. 375 p.
3. Shchetnikov E.S. *Fizika goreniya gazov* [Physics of Gas Combustion]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 739 p.
4. Mikheyev V.P., Mednikov Yu.P. *Szhiganie prirodnogo gaza*. [Burning Natural Gas]. Leningrad, Nedra Publ., 1975. 391 p.
5. Khzmalyan D.M., Kagan Ya.A. *Teoriya goreniya i topochnykh ustroystva* [Combustion Theory and Furnace Installation]. Moscow, Energiya Pibl., 1976. 488 p.
6. Vavilov V.P., Nesteruk D.A., Shirayev V.V., Swiderski W. [Application of Fourier Analysis and the Method of Principal Component Analysis for Data Processing Dynamic Thermal Control], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Press of Tomsk Polytechnic University], 2008, vol. 312, no. 2, pp. 279–285. (in Russ.)
7. Khmelevoy S.V. [Using the GPU to Calculate the Velocity of Gas-Liquid Environment Using the Method PIV]. *Radioelektronnyye i kompyuternyye sistemy* [Electronic and Computer Systems], 2012, no. 6, pp. 124–129. (in Russ.)
8. Khudyakov P.Yu. *Gazodinamika i teploobmen pri soudarenii pryamotochnykh gazovykh struy: dis. kand. fiz.-mat. nauk* [Gas Dynamics and Heat Transfer in Impingement of Direct Gas Jets. Cand. Sci. Diss.], Yekaterinburg, 2013. 172 p.
9. Dyakov V.P. *Veyvlety. Ot teorii k praktike* [Wavelets. From the theory of practice]. Moscow, SOLON-R Publ., 2002. 448 p.
10. Yakovlev A.N. *Osnovy veyvlet-preobrazovaniya signalov* [Fundamentals of Wavelet-Transformation of Signals]. Moscow, 2003. 80 p.

Received 3 October 2014