

УДК 620.179 (045)

Ю.Н. Ложкова

**ВЕЙВЛЕТ-ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК<sup>1</sup>**

Энергетические установки (ЭУ) с зарядом твердого ракетного топлива находят широкое применение в системах спасения, нефтедобычи, управления ракетно-космическими системами. Наиболее развитым методом исследования таких установок является ультразвуковой метод (УЗ). Существующая методическая база, основанная на корреляционных процедурах и Фурье-анализе, не позволяет проводить эффективную обработку и представление результатов испытаний. Это обуславливает создание специализированных программных комплексов моделирования и цифровой обработки результатов, основанных на использовании и развитии теории вейвлет-преобразования.

**Ключевые слова:** *неразрушающий контроль, отношение сигнал/шум, фурье-анализ, вейвлет-преобразование, ультразвуковой метод.*

Испытания – важнейшая часть разработки и исследования физических объектов. Одними из самых сложных из них являются энергетические установки на твердом топливе. На этом этапе возникает широкий круг задач по изучению внутрикамерных процессов, которые проявляются, в том числе, через изменение конфигурации элементов ЭУ. Разработка новых составов топлив, непрерывное усложнение конструкции ЭУ и геометрических форм топливных элементов зачастую снижает эффективность применения расчетных методов при анализе и требует привлечения экспериментальных методов исследования, направленных на получение информации о характере внутрикамерных процессов.

Среди задач, требующих применения высокоинформативных систем исследования, можно отметить:

- исследование изменений формы и перемещений заряда и корпуса ЭУ при воздействии комплекса предстартовых нагрузок;
- определение скорости перемещения фронта горения;
- исследование поведения конструктивных элементов.

Важным элементом обработки ЭУ является выявление причин аномалий, которые сопровождаются разрушением конструкции или проявляются в виде недопустимого отклонения внутрикамерного давления. Появление таких аномалий может быть связано с подключением дополнительной поверхности горения, увеличением скорости горения. Традиционные методы малоинформативны и ограничены в применении при обработке натурных ЭУ.

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (Приказ № 154 от 28 февраля 2012 г. «О назначении стипендий Правительства РФ для лиц, обучающихся в образовательных учреждениях начального профессионального образования, среднего профессионального образования и высшего профессионального образования по очной форме обучения по основным профессиональным образовательным программам начального профессионального и среднего профессионального образования, имеющим государственную аккредитацию, соответствующим приоритетным направлениям модернизации и технологического развития экономики Российской Федерации, на 2011/2012 учебный год»); Российского фонда фундаментальных исследований по конкурсу «Инициативные научно-исследовательские проекты» – проект № 12-07-00164.

Одним из наиболее применяемых в настоящее время методов ликвидации крупногабаритных ЭУ является их сжигание в бесплохой конфигурации со снятыми передней или задней крышками. В обоих случаях наиболее актуальной является проблема защиты окружающей среды. Эффективность методов и средств защиты зависит от того, насколько точны прогнозы по параметрам ЭУ, оказывающим негативное влияние на экологическую обстановку в зоне проведения сжигания, и соответственно по принятым мерам эффективного противодействия этому негативному влиянию.

Наиболее приемлемым методом определения расхода продуктов сгорания, является метод, основанный на использовании текущих значений скорости горения топливного элемента на характерных участках поверхности горения или на использовании интегральной скорости горения, осредненной по всей поверхности газоприхода [1].

Наиболее острая необходимость решения данной проблемы возникла при бесплохом сжигании, когда реализуется режим неустойчивого горения. В этих условиях нужна более детальная информация о закономерностях поведения топливного элемента сложной формы, в частности о динамике изменения поверхности и скорости перемещения фронта горения, с последующим расчетом скорости горения.

Актуальность вопроса определяется тем, что твердотопливные ЭУ должны иметь высокую гарантию качества на всех стадиях их жизненного цикла. Обеспечить надежную эксплуатацию указанных объектов и решить проблему увеличения срока их эксплуатации возможно только при использовании методов неразрушающего контроля, среди которых волновые методы наиболее полно отвечают требованиям обеспечения высокой точности, дистанционности, безопасности, дешевизны, автоматизации обработки результатов испытаний. Развитие УЗ-метода в работе ориентировано на совершенствование алгоритмов выделения зашумленной временной координаты импульса, отраженного от горячей поверхности топлива.

### **Особенности энергетических установок как объектов исследования**

Основным источником информации о качестве энергетической установки и характере протекающих в ней процессов являются экспериментальные исследования на образцах и натуральных изделиях.

Процессы в ЭУ протекают за массивными непрозрачными оболочками, что обуславливает применение методов, где в качестве носителя информации используются проникающие излучения. Эти методы являются наиболее перспективными в смысле удовлетворения принятого критерия оптимальности, позволяют определять как локальные, так и интегральные значения скорости процессов, отвечают требованиям неразрушающих испытаний, перспективны при дальнейшем усовершенствовании применительно к ЭУ различных габаритов.

В настоящее время наиболее развитым волновым методом является ультразвуковой. Отражением этого факта является значительный объем публикаций по применению этого метода при исследовании горения образцов наполнителя и в модельных малогабаритных ЭУ с толщиной свода ТЭ до 100–150 мм. Многолетняя целенаправленная работа позволила достигнуть погрешности определения скорости горения в УЗ-методе около 2 % (в перспективе до 1 %) [2–5].

Фактором, объединяющим методы исследования внутрикамерных процессов, является необходимость получения не только качественных (наличие или отсутствие явления), но и количественных данных с погрешностью, достаточной для решения практически важных задач обработки ЭУ. Сложный характер исследуемых сигналов, вызванный в том числе наличием интерференционных явлений, приводит к тому, что существующая методическая база, основанная на корреляционных процедурах и фурье-анализе, не позволяет проводить эффективную обработку и представление результатов огневых стендовых испытаний. Это обуславливает создание специализированных программных комплексов моделирования и обработки результатов испытаний, основанных на использовании и развитии теории вейвлет-преобразования.

В задачах эхо-импульсной толщинометрии полимерных композитных материалов определение толщины проводится по положению первого нуля после главного максимума сигнала [6]. Фирмой ONERA проанализированы различные алгоритмы – по максимуму амплитуды, по выбранному порогу, по точке пересечения нуля огибающей, но в качестве рабочего принят алгоритм выделения отсчетного времени, как времени пересечения нуля между главным отрицательным и положительным пиком сигнала, так как эта точка наименее чувствительна к вариациям амплитуды [2]. Естественно отметить, что указанный алгоритм эффективен при достаточном отношении сигнал/шум (рис. 1).

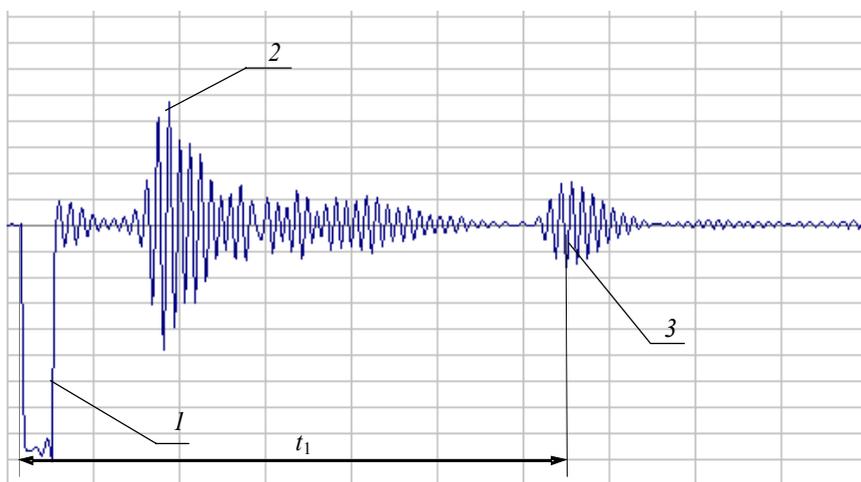


Рис. 1. Осциллограмма УЗ-сигнала по одному каналу до пуска ЭУ: 1 – синхроимпульс; 2 – импульс, распространяющийся по поверхности корпуса; 3 – импульс, отраженный от поверхности канала;  $t_1$  – время измерения

Регистрация фронта горения ЭУ больших габаритов сопровождается сложным, флуктуирующим характером УЗ-сигнала, многообразием его форм и отражений, изменением геометрии прозвучивания, а также необходимостью выбора и отслеживания информативных участков сигнала. Маскирующее действие шумов различной природы приводит к погрешности определения временной информации. Многообразие форм и отражений эхо-сигналов, отсутствие общепринятого алгоритма выделения информативного участка эхо-сигнала для дальнейшей обработки в еще большей мере усложняет поставленную задачу.

Типичная трехканальная осциллограмма регистрируемых сигналов при работе ЭУ представлена на рис. 2.

Наиболее полная публикация по данному вопросу [2] описывает применение УЗ-метода для исследования характера поведения теплозащитного покрытия и топлива в крупногабаритном двигателе на последних 100–150 мм толщины свода.

Для перехода на измерение текущей толщины не менее 600 мм необходимо использование комплекса как новых технических средств, так и специальных методов обработки.

В большинстве практических случаев временные серии являются существенно нестационарными в широком диапазоне масштабов, т.е. содержат участки, в которых сигналы могут изменяться одновременно и во временной, и в частотной областях. В этом случае интерпретация результатов, полученных с помощью традиционной методической базы, основанной на корреляционных процедурах и фурье-анализе, затруднена [7–10].

Часть трудностей снимается при использовании оконного преобразования Фурье, которое позволяет локализовать частоту, но привносит с собой проблему выбора окна и его характеристик. Главной проблемой здесь является появление гармонических составляющих, которых не было в исходном сигнале, так называемый «звон». На практике ширина окна выбирается интуитивно или на основе накопленного опыта. Оконное преобразование так же, как и интегральное, не учитывает, что частота может изменяться со временем.

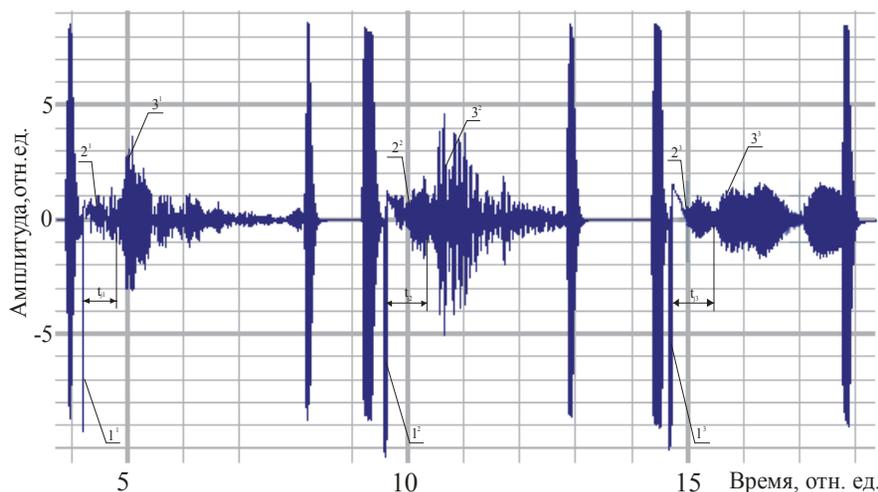


Рис. 2. Осциллограмма сигналов при работе ЭУ:  $1^1, 1^2, 1^3$  – синхронимпульсы 1, 2 и 3 каналов соответственно;  $2^1, 2^2, 2^3$  – УЗ-импульс, распространяющийся по поверхности корпуса;  $3^1, 3^2, 3^3$  – УЗ-импульс, отраженный от фронта наполнителя;  $t_{j1}, t_{j2}, t_{j3}$  – время распространения импульсов  $3^1, 3^2, 3^3$  соответственно

Для преодоления проблемы время-частотного разрешения в последние годы в мире активно развивается новый математический аппарат вейвлет-анализа [11].

Применение вейвлет-анализа позволяет:

- исследовать сложные нестационарные процессы в широком диапазоне масштабов;

- проводить фильтрацию и восстановление сигнала, выявлять его особенности и тренды;
  - локализовывать разрывы непрерывности, скачки, выявлять сбои аппаратуры;
- В работе принят теоретический подход, основанный:
- на исследованиях по закономерностям изменения зондирующих импульсов при прохождении через многослойную среду;
  - синтезе новых вейвлетных базисных функций;
  - обосновании устойчивости вейвлетного базиса к шумовым воздействиям;
  - применении новых базисов для обработки реальных ультразвуковых сигналов, полученных при исследовании модельных и натуральных ЭУ.

Главная цель работы состоит в разработке теоретических и прикладных подходов, которые позволяют синтезировать вычислительные алгоритмы оценки полезного сигнала, направленные на максимальное повышение чувствительности и разрешающей способности анализа, а также создании методической базы визуализации и информативной обработки результатов испытаний и контроля структурной целостности натуральных изделий на базе вейвлетных технологий.

### Метод построения базиса вейлет-преобразования

В работах [12, 13] показана эффективность применения теории вейвлет-анализа к обработке результатов исследования внутрикамерных процессов при огневых испытаниях ЭУ. Имитационное сравнение точности определения временного положения эхо-импульса с использованием в качестве базисной функции самого сигнала и его приближенных представлений показало меньшее значение среднеквадратичного отклонения (СКО) определения временного положения эхо-импульса по сравнению с известными вейвлетами [14]. Дальнейший анализ структуры погрешности определения временного положения показал, что распределение вероятности этой погрешности не является унимодальным. Это распределение может иметь несколько побочных максимумов, отстоящих на значительном расстоянии от главного. В этом случае, несмотря на незначительное значение среднеквадратического отклонения (СКО), существует значительная вероятность появления больших ошибок.

При непрогнозируемом (в т.ч. скачкообразном) изменении толщины свода заряда применение временного стробирования становится неприемлемым, так как в этом случае невозможно разделить сбойные значения погрешности и скачкообразные изменения толщины. Все это указывает на необходимость применения других, чем СКО, критериев эффективности свойств предложенного метода.

В качестве простого и хорошо характеризующего эффективность метода определения временного положения сигнала предлагается использовать величину, которая названа устойчивостью. Под устойчивостью метода будем понимать вероятность того, что погрешность определения временного положения сигнала не превысит некоторого значения

$$k_E = P\left(|t - t^*| < E\right),$$

где  $t$  – временное положение сигнала, полученное с использованием какого-либо метода;  $t^*$  – истинное значение временного положения сигнала;  $E$  – временной интервал.

В дальнейшем временной интервал  $E$  везде принимается равным половине длины периода колебания исследуемого сигнала.

Поскольку при реальной обработке сигнала значение параметра  $t^*$  неизвестно, то данный критерий используется исключительно для целей оценки результатов численного моделирования применения того или иного метода. С использованием введенного критерия устойчивости  $k$  несложно установить, насколько эффективен тот или иной базис для используемого нами метода.

Пусть имеется некоторая функция  $f(t)$ , описывающая сигнал, положение которого нужно определить, и базис  $\psi(a, b)$ . Необходимо установить зависимость устойчивости выделения от соотношения сигнал/шум. Шум считается некоррелированным с сигналом, имеющим нормальное распределение.

Осуществим вейвлет-преобразование  $f(t)$  с использованием выбранного базиса и выделим масштаб  $a$ . Пусть сдвиг, при котором значение энергетического спектра максимально, равен  $m$ .

Известно, что энергия белого шума равномерно распределена по всем масштабам разложения, и можно считать, что если значения отсчетов данных распределены нормально, то и значения отсчетов спектра энергии  $|W_\psi(a, b)|$  также распределены нормально. При этом СКО распределения составит

$$\sigma_a = \frac{\sigma}{\sqrt{\beta}},$$

где  $\sigma$  – СКО шума, присутствующего в сигнале;  $\beta$  – степень свободы базиса  $\psi(a, b)$ , которая для комплексных вейвлетов равна 2, а для вейвлетов, содержащих только действительную часть,  $\beta = 1$  [15].

Найдем вероятность того, что произвольное значение спектра  $|W_\psi(a, i)|$  превысит значение максимума  $|W_\psi(a, m)|$  на данном масштабе, что приведет к ошибке определения временного положения сигнала

$$P_i = 1 - F_{\sigma_a}(|W_\psi(a, m)|).$$

Здесь  $F_{\sigma_a}$  – функция нормального распределения с нулевым средним.

Значение устойчивости в этом случае

$$k_E = \prod_{|i-m| \in E} (1 - P_i).$$

Для оценки эффективности использования предложенного метода в совокупности с использованием оптимального базиса далее проведено сравнение с существующими методами – по положению максимума амплитуды сигнала; корреляционным; вейвлет-преобразованием с использованием базиса Морле.

При расчете устойчивости для метода определения по максимуму сигнала аналогом значений спектра  $W_\psi(a, b)$  вейвлет-преобразования являются абсолютные значения исходного сигнала  $|f(t)|$ . Очевидно, что в этом случае  $\sigma_a = \sigma$ .

Для расчета устойчивости при использовании корреляционного метода вместо значений  $W_\psi(a, b)$  использовались абсолютные значения корреляционной функ-

ции  $M(\tau)$ . Значение СКО распределения каждого из дискретных отсчетов  $|M(\tau)|$

$$\sigma_M = \sigma \cdot \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)| \cdot dt.$$

В качестве опорных функций использованы УЗ-сигнал по ГОСТ 23702-90 и функция Берлаге  $f(t) = t^a \cdot e^{-bt} \cdot \sin(c \cdot t)$ .

Рис. 3 иллюстрирует результаты моделирования при совпадении опорной функции и сигнала. В качестве опорного сигнала используется УЗ-сигнал по ГОСТ 23702-90.

При отношении сигнал/шум, большем 4, результаты применения вейвлет-преобразования с неоптимальным базисом имеют большую вероятность ошибки, чем простая процедура выделения максимума амплитуды сигнала. Этот вывод является неожиданным и несколько противоречит сложившемуся в публикациях мнению о заведомом преимуществе вейвлет-анализа по сравнению с другими методами. Впрочем, это говорит лишь о том, что необходимо разграничить области применения вейвлет-анализа и традиционных методов. Устойчивости корреляционного метода и вейвлет-анализа с использованием оптимального базиса примерно совпадают. Этот результат является ожидаемым, поскольку в обоих методах используется интегральная свертка и подставляемые в нее функции в обоих случаях совпадают. Значения  $W_{\psi}(a, b)$  и  $|M(\tau)|$  отличаются лишь на постоянный множитель.

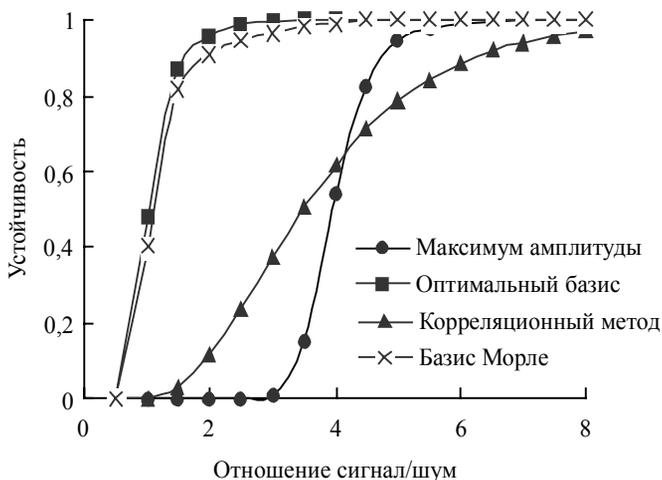


Рис. 3. Зависимость устойчивости различных методов от отношения сигнал/шум

Для исследования чувствительности корреляционного метода и метода на основе вейвлет-преобразования к изменению принимаемого сигнала проведено моделирование, когда сигнал имеет отличную от опорной функции частоту и форму огибающей.

Выделяемым сигналом является функция Берлаге с параметрами  $a = 2,7$ ;  $b = 1$ ,  $c = 3,5$ , для функции опорного сигнала используются параметры  $a = 2,3$ ;  $b = 1,2$ ;

$c = 3$ . На рис. 4 видно преимущество предлагаемого метода по сравнению с корреляционным в случае отличия выделяемого и опорного сигналов при соотношениях сигнал/шум 1–3.

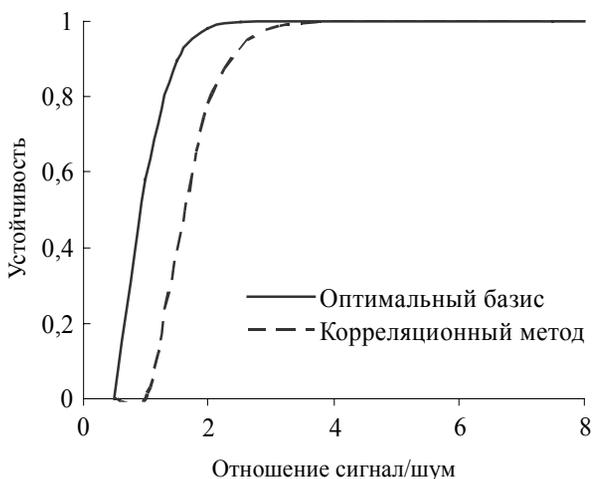


Рис. 4. Сравнение методов при отличии опорного и выделяемого сигналов от отношения сигнал/шум

Таким образом, предложенный метод позволяет снизить погрешность определения временного положения эхо-импульса при низких соотношениях сигнал/шум (менее 3) и наличии искажений сигнала при прохождении через объект исследования по сравнению с ранее использовавшимися методами.

Кроме того, следует отметить, что применение процедур вейвлет-анализа без адаптации их под данную конкретную задачу не приводит к значимому снижению погрешности определения времени, за которое УЗ сигнал проходит через объект [3].

### Заключение

В области исследования внутрикамерных процессов с использованием проникающих излучений целью вейвлет-анализа является извлечение более детальной информации о характере и особенностях протекающих процессов. К сожалению, в настоящее время основная масса исследований ограничена использованием стандартных процедур, например, в составе пакета компьютерной математики MATLAB. Истинная ценность вейвлет-анализа заключается в возможности для исследователя создавать базисы, наиболее приспособленные к решению собственных задач.

По сравнению с алгоритмами обработки с жестко фиксированной логикой (например, корреляционным методом) вейвлет-анализ как «математический микроскоп» позволяет сфокусировать свое внимание на выделении нужного информативного параметра регистрируемого сигнала. В данном случае временная локализация максимума вейвлетного спектра более устойчива к влиянию шумов, чем принятая в [13] процедура выделения по точке перехода сигнала через ноль между главным максимумом и минимумом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Ефимов В.Г., Дерябин Ю.А., Митин А.Г.* Экспериментальное использование ультразвукового метода для определения скорости горения по своду заряда в процессе огневой утилизации РДТТ // Изв. вузов. Физика. 2004. № 10. С. 64–67.
2. *Коти Ф., Ерейдес Ч.* Ультразвуковой метод измерения скорости горения: ошибки, шум и чувствительность // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36. № 1. С. 59–67.
3. *Трено Ж., Кюнцман П.* Измерение скорости горения ТРТ с помощью ультразвука в бесопловых ракетных двигателях // Аэрокосмическая техника. 1987. № 4. С. 76–87.
4. *Traineau J.* Experimental Low and Medium frequency determination of Solid Propellant Pressure-Coupling Response Function // AIAA Paper. 1994. № 94. P. 30–43.
5. *Методы неразрушающих испытаний* / под. ред. Р. Шарпа. М.: Мир, 1972. 494 с.
6. *Вопросы повышения точности ультразвуковой толщинометрии материалов с высоким затуханием* / В.К. Качанов, В.Г. Карташов И.Л. Закутаев, Е.В. Налимова // Материалы 14 научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика». М., 1996. С. 120.
7. *Перов Д.В., Ринкевич А.Б., Смородинский Я.Г.* Вейвлетная фильтрация сигналов ультразвукового дефектоскопа // Дефектоскопия. 2002. № 12. С. 3–21.
8. *Angrisani L.* The Detection of Echoes from Multilayered Structures Using the Wavelet Transform. // IEEE Trans. Instrum. and Meas. 2000. V. 49. No. 4. P. 727–731.
9. *Rosiene J., Sholl H.* Application of wavelets to ultrasonic evaluation of thickness // Wavelet Application. SPIE. 1994. V. 2242. P.487–505. www.wavelet.org
10. *Новиков Л.В.* Адаптивный вейвлет-анализ сигналов // Научное приборостроение. 1999. Т. 9. № 2.
11. *Астафьева Н.М.* Вейвлет-анализ: спектральный анализ локальных возмущений (основы теории и примеры применения) // Прикладная нелинейная динамика. 1996. № 2. С. 2–40.
12. *Ланге Ю.В., Нефедов С.В.* Корреляционная обработка сигналов импедансных дефектоскопов // Контроль. Диагностика. 1998. № 1. С. 26–32.
13. *Алексеев К.А.* Модели и алгоритмы вейвлет-обработки сигналов с применением лифтинга // Датчики и системы. 2002. № 1. С. 7–9.
14. *Efimov V.G.* A method of quality comparison of different reference function application for ultrasonic measurement problems / V.G. Efimov, J.N. Lozhkova // Nondestructive Testing and Evaluation. 2011. V. 26. No. 2. P. 181–185.
15. *Осоков Г., Шитов А.* Применение вейвлет-анализа для обработки дискретных сигналов гауссовой формы // Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1997. С. 11–97.

Статья поступила 06.01.2012 г.

*Lozhkova Yu. N.* WAVELET-TECHNOLOGY OF PROCESSING THE STUDIES OF POWER PLANTS. Power plants with a charge of solid propellants are widely used in rescue systems, oil production, management, and rocket and space systems. The most advanced wave methods of investigation of such facilities include ultrasonic and microwave techniques. The existing methodological framework, based on correlation procedures and Fourier-analysis does not allow for efficient processing and presentation of test results. This leads to the creation of specialized software systems of modeling and digital processing of the results based on the use and development of the theory of the wavelet transform.

*Keywords:* non-destructive testing, signal-to-noise ratio, Fourier analysis, wavelet transform, ultrasonic method.

*LOJKOVA Ylia Nikolayevna* (I.I. Polzunov Altai State Technical University)  
E-mail: julianna9@qip.ru