

## ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ В ЗАДАЧАХ КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

*Для решения задачи оперативного контроля уровня материала в металлургическом производстве традиционный метод быстрого преобразования Фурье оказывается не эффективным. Предложен новый метод вычисления расстояния до цели, основанный на непрерывном вейвлет-преобразовании, позволяющий проводить эффективный спектральный анализ радиолокационного сигнала короткими волнообразными функциями.*

**Ключевые слова:** *уровень, радиолокационный датчик уровня, доменная печь, многокомпонентные порции, вейвлет-анализ, частота, расстояние до материала.*

*Для вирішення задачі оперативного контролю рівня матеріалу в металургійному виробництві традиційний метод швидкого перетворення Фур'є виявляється не ефективним. Запропонований новий метод обчислення відстані до мети, оснований на безперервному вейвлет-перетворенні, що дозволяє проводити ефективний спектральний аналіз сигналу радіолокатору короткими хвилеподібними функціями.*

**Ключові слова:** *рівень, радіолокаційний датчик рівня, домена піч, багатоконпонентні порції, вейвлет-аналіз, частота, відстань до матеріалу.*

*For the decision of task of operative control of level of material in a metallurgical production the traditional method of fast Fourier transformation appears not effective. The new method of calculation of distance is offered to the purpose, based on continuous wavelet-transformation, allowing to conduct the effective spectrology of radio-location signal short undulating functions.*

**Keywords:** *level, radio-location sensor of level, high furnace, multicomponent portions, wavelet-analysis, frequency, distance to material.*

### Введение

Уровень (в некоторых случаях расстояние) до контролируемой поверхности остается одним из наиболее распространенных информативных параметров в металлургии. Системы измерения уровня составляют в доменном, агломерационном, коксохимическом производстве около 90 % всех средств контроля.

Задача измерения уровня представляется, на первый взгляд, довольно простой. Однако точное определение этого параметра связано с различного рода трудностями. В первую очередь, это определяется разнообразными технологическими и эксплуатационными условиями производственной деятельности по переработке, хранению, определению вида контролируемых веществ (материалов) и неоднородности их физико-химических свойств. Другое обстоятельство – многообразие технологического оборудования по конструктивному исполнению и

принципам действия, что затрудняет как выбор способа контроля, так и создание измерительной аппаратуры широкого применения.

Технологическая обработка материалов, перерабатываемых в черной металлургии, осуществляется при температурах от  $-40$  до  $1700$  °С и выше, влажности до 100% и сопутствующей запыленности окружающей среды до  $350$  г/м<sup>3</sup>.

Из-за отсутствия надежных средств измерения уровня (расстояния) и соответствующего информационного обеспечения для быстропротекающих технологических процессов остаются до конца не решенными задачи оптимизации работы металлургических агрегатов. Одной из таких задач является формирование на конвейерных подъемниках доменных печей многокомпонентных порций материалов.

#### **Постановка задачи исследования**

Особенностью технологии загрузки доменных печей с конвейерной подачей шихты на колошник является возможность управления смешиванием компонентов шихты по длине порции, формируемых на конвейере с целью повышения эффективности распределения в доменной печи.

Формирование многокомпонентных порций шихты невозможно без системы автоматического управления, которая, в зависимости от расположения соответствующих весовых воронок и заданного порядка набора порции, задает необходимые выдержки времени между началом последующих и окончанием выгрузки предыдущих доз данной порции.

Смешивание компонентов шихты путем наложения при постоянном расходе их из весовых воронок приводит к удлинению порции, что ведет к неполному использованию производительности конвейера, а следовательно увеличивает цикловые простои системы шихтоподачи. В противном случае имеем перегруз конвейера с последующим сходом материала на ведомом барабане конвейера (до доменной печи) и аварийными остановками всей шихтоподачи.

Проведенные исследования процесса истечения шихтовых материалов из весовых воронок и формирования порций показали, что изменение их геометрических размеров порции носит случайный характер и зависит в основном от колебаний расхода материалов при их истечении на конвейер. Значительные величины дисперсии (например,  $0,07$ т/с и  $0,06$ т/с соответственно по агломерату и окатышам) свидетельствует прежде всего о невозможности поддерживать заданную массу головной части и требуемые расходы материалов в ее смешанной части порции[1].

Для получения требуемых геометрических параметров порций необходим регулируемый выпуск шихтовых материалов из весовых воронок с одновременным контролем геометрических параметров шихты на конвейере.

Анализ технических средств контроля уровня материала в доменном производстве позволил установить, что наиболее целесообразным для

решения задач управления смешиванием компонентов является применение микроволновых радарных дальномеров, которые имеют универсальное применение как с точки зрения видов контролируемых веществ, так и условий внутри контролируемых емкостей.

В настоящее время для анализа сигнала радара применяется спектральный анализ с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ). Для оценки характеристик сигнала применяется построение амплитудно-частотных спектров, определение их центра тяжести в заданном частотном окне, определение отношения сигнал/шум, вычисление среднеквадратического отклонения параметров спектра и других статистик [2]. Время обработки сигнала в каждой точке измерения достигает 2,5-3 с. За это время порция на конвейере переместится на 5-6 м (расстояние между воронками 18 м, скорость перемещения конвейера около 2 м/с), что ограничивает запас времени на задание программы и самого формирования последующей дозы. Поэтому был предложен новый метод вычисления расстояния до цели, основанный на непрерывном вейвлет-преобразовании (дискретизированный вариант непрерывного преобразования), позволяющий проводить эффективный спектральный анализ радиолокационного сигнала короткими волнообразными функциями.

#### **Анализ опубликованных научных исследований**

Первая попытка формирования смешанной железорудной порции была реализована совмещением концевых частей отдельных доз за время выдачи их на конвейер[1]. Совмещение цикла разгрузки каналов при транспортировании одной дозы увеличенного объема достигалось наложением в определенный момент на концевую часть первой дозы концевой части другой.

В работе [3] показана возможность формирования на конвейере многокомпонентной порции путем дополнительного определения времени опережения на транспортере начала дозы ведущего компонента шихты по отношению к началу дозы каждого ведомого компонента по заданной массе опережения и скорости высыпания этого компонента из весового бункера, и определяют время на включение механизмов разгрузки каждого весового бункера.

Исследование попыток также проведено на компонентах шихты с применением угля [4].

В отношении вейвлет-преобразования, можно полагать, что оно является наиболее благоприятным механизмом исследования радарного зондирования объектов черной металлургии благодаря хорошей приспособленности к анализу нестационарных сигналов.

Основные преимущества вейвлет-анализа заключаются в том, что он позволяет заметить хорошо локализованные изменения сигнала, тогда как анализ Фурье этого не дает – в коэффициентах Фурье отражается поведение сигнала за все время его существования [5]. Также вейвлеты являются гораздо более простыми функциями, они легче вычисляются

численными методами, реализуемыми при помощи компьютерной техники, а затраты времени на вейвлет-преобразование заметно ниже, чем на преобразование Фурье, которое отличается вычислением множества тригонометрических функций.

Очевидные достоинства позволяют использовать математический аппарат вейвлетного преобразования для обработки радиолокационного сигнала в задачах оперативного определения уровня материалов металлургического производства.

### Основной материал исследований

В первую очередь необходимо отметить ряд недостатков разложения сигналов в ряды Фурье. Это ограниченная информативность анализа нестационарных сигналов и отсутствие возможностей анализа их особенностей, так как в частотной области происходит «размазывание» особенностей сигналов (разрывов, ступенек, пиков и т.п.) по всему частотному диапазону спектра.

Во-вторых, гармонические базисные функции разложения не способны отображать перепады сигналов с бесконечной крутизной типа прямоугольных импульсов, так как для этого требуется бесконечно большое число членов ряда. При ограничении числа членов ряда Фурье в окрестностях скачков и разрывов при восстановлении сигнала возникают осцилляции (явление Гиббса).

В-третьих, преобразование Фурье отображает глобальные сведения о частотах исследуемого сигнала, но не дает представления о локальных свойствах сигнала при быстрых временных изменениях его спектрального состава. Преобразование Фурье в принципе не имеет возможности анализировать частотные характеристики сигнала в произвольные моменты времени.

Одним из ограничивающих факторов применения быстрого преобразования Фурье является то, что в каждом пакете сигнала РДУ содержится только 128 дискретов, а передаваемый спектр состоит из 64 гармоник. Поэтому, повышение точности расчетов (построение более дробного спектра) возможно только при увеличении длины реализации сигнала.

Частичным выходом из этой ситуации является оконное преобразование Фурье с движущейся по сигналу оконной функцией, имеющей компактный носитель. Временной интервал сигнала разделяется на подинтервалы и преобразование выполняется последовательно для каждого подинтервала в отдельности. Результатом преобразования является семейство спектров, которым отображается изменение спектра сигнала по интервалам сдвига окна преобразования. Оконное преобразование выполняется в соответствии с выражением:

$$S(\omega, b_k) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) w \cdot (t-b_k) \exp(-j\omega t) dt \quad (1)$$

Функция  $w(t-b)$  представляет собой функцию окна сдвига преобразования по координате  $t$ , где параметром  $b$  задаются фиксированные значения сдвига. При сдвиге окон с равномерным шагом значения  $b_k$  принимаются равными  $k\Delta b$ . В качестве окна преобразования может использоваться как простейшее прямоугольное окно, так и специальные весовые окна (Бартлетта, Гаусса, и пр.), обеспечивающие малые искажения спектра при вырезке оконных отрезков сигналов (нейтрализация явления Гиббса).

Оконное преобразование позволяет выделить информативные особенности сигнала и по времени, и по частоте. Разрешающая способность локализации определяется принципом неопределенности Гейзенберга, который гласит, что невозможно получить произвольно точное частотно-временное представление сигнала. Чем уже окно, тем лучше временное разрешение, но хуже частотное, и наоборот.

Таким образом, выделение локальной области амплитудно-частотного спектра определяет возможность более точного вычисления расстояния до цели, исследования возможных помех сигнала, а также оперативного их подавления.

Вейвлет преобразование было создано как инструмент, который позволяет решить проблему неопределенности Гейзенберга для построения частотно-временных характеристик сигнала [5].

Наиболее важными преимуществами вейвлет преобразования перед преобразованием Фурье с точки зрения оперативного контроля геометрических параметров порции на конвейере являются:

- некоторые вейвлеты являются намного более простыми функциями, чем синусоидальная функция, и в этом случае затраты времени на вейвлет-преобразование заметно ниже, чем на преобразование Фурье, где вычисление множества трансцендентальных тригонометрических функций требуют значительных затрат времени;

- большинство вейвлетов представлено вещественными функциями, поэтому нет необходимости привлекать для их вычисления аппарат комплексных чисел, затрудняющих вычисления;

- для ряда вейвлетов имеются быстрые алгоритмы вейвлет-преобразования.

Вейвлет-анализ реализован с применением непрерывного вейвлет-преобразования (дискретизированный вариант непрерывного преобразования) [7].

Непрерывное вейвлет-преобразование осуществляется путем свертки:

$$C(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{a,b}(t) f(t) dt, \quad (2)$$

где  $f(t)$  – анализируемый сигнал,  $\psi_{a,b}(t)$  - двухпараметрический вейвлет, который строится из порождающего вейвлета  $\psi_0(t)$  путем масштабирования и сдвига:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi_0\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (3)$$

где параметр  $a$  является масштабом вейвлет-преобразования и отвечает за ширину вейвлета, а параметр  $b$  – параметр сдвига, определяющий положение вейвлета на оси  $t$ . Порождающий вейвлет может быть выбран произвольно, однако при этом он должен удовлетворять ряду условий [5,6].

В качестве базисного предполагается использовать вейвлет Морле:

$$\psi(t) = \exp\left[-\frac{t^2}{2}\right] \cdot \cos(5t). \quad (4)$$

Вейвлет-преобразование сигнала выполняется по аналогии с преобразованием Фурье, и представляет собой скалярное произведение сигнала на вейвлет-функцию заданного типа.

Чем точнее локальная особенность сигнала совпадает с соответствующей функцией вейвлета, тем эффективнее выделение этой особенности на соответствующей масштабной строке вейвлетного спектра.

Если считать, что каждый вейвлет имеет определенную "ширину" своего временного окна, которому соответствует определенная "средняя" частота Фурье-образа вейвлета, обратная его масштабному коэффициенту  $a$ , то семейства масштабных коэффициентов вейвлет-преобразования можно считать аналогичными семействам частотных спектров оконного преобразования Фурье, но с одним принципиальным отличием. Масштабные коэффициенты действуют во времени, изменяя "ширину" вейвлетов и, соответственно, "среднюю" частоту их фурье-образов, а, следовательно, каждой частоте соответствует своя длительность временного окна анализа, и наоборот. Многомерное временное окно вейвлет-преобразования позволяет одинаково хорошо выявлять и низкочастотные, и высокочастотные характеристики сигналов.

Результатом вейвлет-преобразования одномерного числового ряда (сигнала) является двумерный массив амплитуд – значений коэффициентов  $C(a,b)$ . Распределение этих значений в пространстве  $(a,b)$  = (временной масштаб, временная локализация) дает информацию об изменении относительного вклада вейвлетных компонент разного масштаба во времени и называется спектром коэффициентов вейвлет-преобразования, масштабно-временным (частотно-временным) спектром или просто вейвлет-спектром (wavelet spectrum).

Спектр  $C(a,b)$  одномерного сигнала представляет собой поверхность в трехмерном пространстве. Способы визуализации спектра могут быть самыми различными. Наиболее распространенный способ – проекция на плоскость  $ab$  с изолиниями (изоуровнями), что позволяет проследить изменения амплитуд на разных масштабах во времени, а также выявить картину локальных экстремумов этих поверхностей ("холмов" и "впадин"), так называемый "скелет" (skeleton) структуры анализируемого процесса.

По смыслу преобразования, как скалярного произведения сигнала с вейвлетом, ясно, что значения коэффициентов в каждой текущей временной точке по масштабным сечениям тем больше, чем сильнее корреляция между вейвлетом данного масштаба и поведением сигнала в окрестностях этой точки. Соответственно, масштабные сечения демонстрируют изменения в сигнале компонент данного масштаба со временем.

Получение определенной объективной информации об анализируемом сигнале базируется на свойствах вейвлет-преобразования, общих для вейвлетов всех типов [5,6]. Одним из важнейших средств анализа Фурье является теорема Парсевала. Она позволяет экспериментатору оценить распределение энергии по частотам. Разработка алгоритмов быстрого преобразования Фурье сделала спектр мощности одним из наглядных средств анализа во время сбора данных и мощной альтернативой графикам распределения энергии. В теории вейвлет-преобразования доказывается аналогичная теорема. Отсюда следует, что энергия сигнала может вычисляться через коэффициенты вейвлет-преобразования.

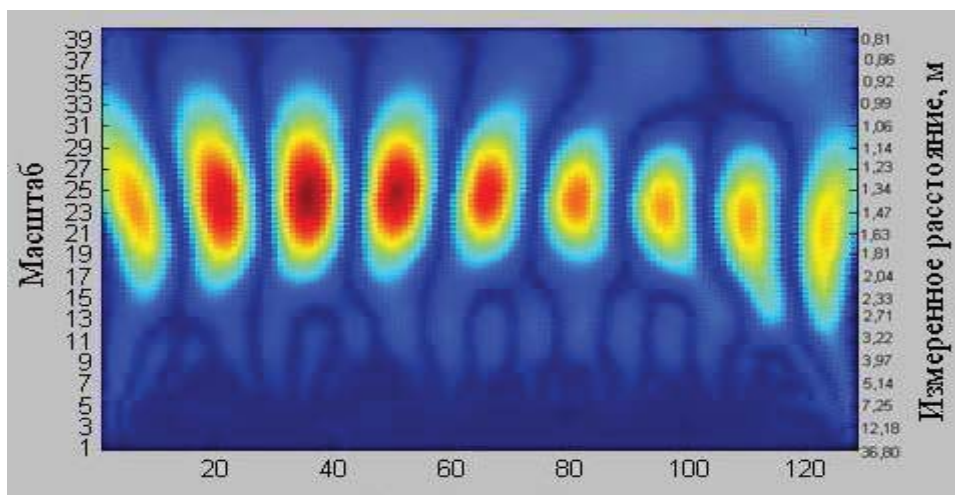
Для построения вейвлет-спектра значений коэффициента в точке на плоскости параметров (a,b) используется окраска данной точки. Интенсивность окраски зависит от величины коэффициентов  $C(a,b)$ . В нашем случае синий цвет соответствует минимальному значению вейвлет-коэффициентов, а красный – максимальному. Оттенки обозначают промежуточные значения коэффициентов.

В нашем случае для проведения непрерывного вейвлет преобразования мы располагаем временным рядом величины  $\{x\}$  (в каждом пакете РДУ содержится 128 дискретов сигнала), где для каждого значения  $x_n$  задано с одинаковым временным интервалом  $\Delta t$ ,  $n=0, \dots, 127$  – число отсчетов в исследуемом ряду.

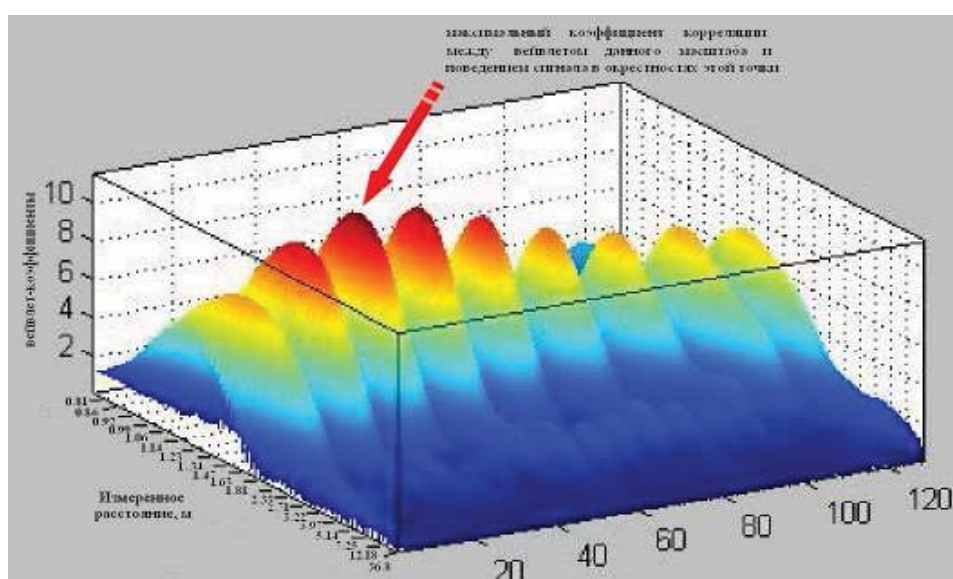
Непрерывное вейвлетное преобразование данной дискретной последовательности определяется как свертка этой последовательности  $\{x\}$  и базисной вейвлетной функции  $\Delta(n)$ :

$$W(n, a) = \sum_{n'=0}^{N-1} x_{n'} \cdot \psi \cdot \left( \frac{(n' - n)\Delta t}{a} \right), \quad (5)$$

Тогда, изменяя масштабный коэффициент  $a$  и величину сдвига во времени вейвлетной функции  $n\Delta t$ , можно восстановить и локализовать динамику любых особенностей процесса  $\{x\}$  в пространстве масштабов  $a$ , т.е. определить как мгновенную амплитуду колебаний на данном временном масштабе, так и особенности динамики каждого из масштабов с течением времени [7].



а)



б)

Рисунок 1 – Вейвлетный спектр радиолокационного сигнала:

а) двумерный массив амплитуд; б) трехмерное пространство

Алгоритм определения расстояния до материала на конвейере сводится изначально к определению частоты сигнала радиолокатора. И в случае непрерывного вейвлет преобразования базируется на определении такого масштабного коэффициента  $a$ , которому соответствует максимальная корреляция между вейвлетом данного масштаба и поведением сигнала в окрестностях этой точки. Расстояние до объекта определяется исходя из полученной частоты сигнала радара.

По определению «частотой» (или центральной частотой) вейвлета называют частоту спектральной гармоники данного вейвлета, имеющей максимальное абсолютное значение. При непрерывном преобразовании частота вейвлета  $F_a$ , используемого на  $a$ -ом уровне декомпозиции, связана с частотой исходного базисного вейвлета  $F_c$  следующим соотношением:



$$F_a = \frac{F_c}{a} f_d, \quad (5)$$

где  $f_d$  частота дискретизации анализируемого сигнала.

Измеренное радаром расстояние до отражающего объекта определяется по формуле:

$$H = F_a \cdot AF + BF, \text{ м} \quad (6)$$

где  $AF$  и  $BF$  – соответственно наклон и смещение градуировки «расстояние-частота» радиолокационного датчика уровня.

Для построения спектра задается диапазон масштабов, шаг анализа и способ расчета масштабов. Эти параметры оказывают влияние на скорость вычислений. Определение наилучшего диапазона масштабов и шага анализа позволит значительно повысить точность измерения и ускорить получение спектра.

В нашем случае это представляется целесообразным, поскольку диапазон измерения дальности радиолокатором имеет ограничения, следовательно, область частот, которые могут содержать полезную информацию, тоже ограничена.

Следующим шагом для увеличения скорости расчета вейвлет-спектрограмм является распараллеливание разработанного алгоритма. Основная идея здесь заключается в том, что каждый канал обработки исследуемой последовательности соответствует конкретному уровню детализации анализируемых данных. Одновременность получения значений вейвлет-свертки по всем заданным уровням детализации сигнала позволяет анализировать в оперативном режиме вейвлет-спектрограмму оцифрованного измерительного сигнала и, тем самым, сокращает временные затраты. При этом скорость вычислений будет увеличиваться пропорционально количеству процессоров.

### Выводы

Наиболее целесообразным для решения задач управления смешиванием компонентов является применение микроволновых радарных дальномеров, которые имеют универсальное применение как с точки зрения видов контролируемых веществ, так и условий внутри контролируемых емкостей.

В настоящее время для анализа сигнала радара применяется спектральный анализ с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ). Время обработки сигнала в каждой точке измерения достигает 2,5-3 с. В задачах формирования многокомпонентных порций шихты на конвейере доменной печи это ограничивает запас времени на задание программы и самого формирования последующей дозы. Поэтому был предложен новый метод вычисления расстояния до цели, основанный на непрерывном вейвлет-преобразовании, позволяющий проводить эффективный спектральный анализ радиолокационного сигнала короткими волнообразными функциями. Большинство вейвлетов представлено

вещественными функциями, поэтому нет необходимости привлекать для их вычисления аппарат комплексных чисел, затрудняющих вычисления. Также некоторые вейвлеты являются намного более простыми функциями, чем синусоидальная функция, и в этом случае затраты времени на вейвлет-преобразование заметно ниже, чем на преобразование Фурье, где вычисление множества тригонометрических функций требуют значительных затрат времени.

Для построения вейвлет-спектра задается диапазон масштабов, шаг анализа и способ расчета масштабов. Определение наилучшего диапазона масштабов и шага анализа позволит значительно повысить точность измерения и ускорить получение спектра.

Повышение быстродействия алгоритма вейвлет-анализа может также достигаться разработкой распараллеленной структуры алгоритма построения вейвлет-спектрограммы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Головки В.И. Анализ и синтез оборудования систем шихтоподачи доменных печей большого объема с целью повышения эксплуатационной надежности и производительности//диссертация. – Днепропетровск,1977.
2. Радиолокационный контроль металлургических процессов. Головки В.И., Кукушкин О.Н., Михайловский Н.В. и др. – Днепропетровск: Журфонд, 2010. – 428с.
3. А.С. № 1049549 СССР. Способ управления механизмами транспортной шихтоподачи доменных печей/Золотницкая Г.Д., Френкель М.М., Бургутин Ю.И. и др.//Зарегистрировано 22.06.1983.
4. Большаков В.И., Иванча Н.Г. Формирование смешанных порций шихтовых материалов на доменном конвейере//Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. - №6. – с.79 – 83.
5. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в Matlab. – М.: ДМК Пресс,2005. – 304с.
6. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике. – М.: СОЛОН-Р, 2002. – 448 с.
7. Короновский А. А., Храмов А. Е. Непрерывный вейвлетный-анализ и его приложения. – М.: ФИЗ-МАТЛИТ, 2003. – 76 с.