

## Оптический метод разбраковки по высоте выступов на движущейся ленте

### Abstract

Метод состоит в разбраковке по высоте выступов на движущейся ленте, осуществляемый путём обработки изображений отдельных выступов, полученных из изображений движущейся ленты, выполненных с помощью оптической системы на массиве с ПЗС. Контрольные параметры, полученные при обработке изображения отдельного выступа сравниваются с эталонными параметрами, полученными в ходе эксперимента.

### References Cited

#### US Patent Documents

<b>4532723 Aug., 1985</b>	<b>Kellie , et al.</b>	<b>G01N 21/89 356/73</b>
4700398 Oct., 1987	Mizuno , et al.	G06 09/00 382/108
4900153 Feb., 1990	Weber , et al.	G01N 21/89 356/430
<b>5003615 Mar., 1991</b>	Seitz	G06K 9/48 382/108 382/22*
5135309 Aug., 1992	Kuchel , et al.	G01B 9/00 356/604 356/376*
5229619 Jul., 1993	Van Amstel	G01N 21/86 250/559.07 250/560*
5392110 Feb., 1995	Yojima , et al.	G01C 3/00 356/3.04 356/1*
5465152 Nov., 1995	Bilodeau , et al.	G01B 11/00 356/602 356/371*
5621814 Apr., 1997	Honda	G06K 9/00 382/152
<b>5963328 Oct., 1999</b>	<b>Yoshida , et al.</b>	G01B 11/30 <b>356/600 356/371*</b>
<b>5986763 Nov., 1999</b>	<b>Inoue</b>	G01B 11/24 <b>356/613 356/376*</b>
5999266 Dec., 1999	Takahashi , et al.	G01B 11/24 356/613 356/376*
6052189 Apr., 2000	Fuse , et al.	G01B 11/00 356/615 356/375*
6166393 Dec., 2000	Paul , et al.	G01N 21/89 250/559.08
<b>6177682 Jan., 2001</b>	<b>Bartulovic , et al.</b>	G01N 21/56 <b>250/559.44</b>
6181472 Jan., 2001	Liu	G02B 27/10 359/618
<b>6340109 Jan., 2002</b>	Hashimoto , et al.	B23K 31/12 228/103
6486964 Nov., 2002	Shitamichi	G01B 11/24 356/614
6555836 Apr., 2003	Takahashi , et al.	G01N 21/86 250/559.19
6671397 Dec., 2003	Mahon , et al.	G06K 9/00 382/145
6678062 Jan., 2004	Haugen , et al.	G01B 5/25 356/623
6731391 May., 2004	Kao , et al.	G01B 11/24 356/605
<b>6919962 Jul., 2005</b>	<b>Debevec , et al.</b>	G01N 21/55 <b>356/445</b>

7023559 Apr., 2006	Coulombe , et al.	G01B 9/02	356/511
7126699 Oct., 2006	Wihl , et al.	G01B 11/02	356/625
7130027 Oct., 2006	Ziegler	G01C 3/00	356/3.01
		G01N 21/17	
		G01N 33/48	
		G02B 27/40	
7180606 Feb., 2007	Mahon , et al.	G01B 11/24	356/607

## **Background of invention**

### **1. Field of invention**

Изобретение относится к области оптических методов контроля высот неоднородностей на движущихся поверхностях. Выступы расположены в ряд, образующий прямую линию. Выступы возвышаются над гребнем, который образуется при изготовлении линии выступов.

### **2. Description of Related Art**

В настоящее время предложены следующие подходы для определения высоты выступов на поверхности исследуемого объекта:

- a) интерференционно-дифракционные;
- b) стереоскопические;
- c) по положению пятна отражённого света;
- d) разделение потока падающего света;
- e) конфокальные;
- f) обработка отражённого света.

a) В интерференционно-дифракционных методах для получения информации о высотах поверхности используется интерференция падающего и отражённого света полученная с помощью дифракционных решёток. Дифракционная картина соответствует фазам отражённого когерентного света. Разница в высотах поверхности пропорциональна разности фаз. Широко применяется эффект Shadow Moire, который включает шаги по расположению дифракционной решётки вблизи измеряемой поверхности, освещение поверхности под одним углом, например 45 градусов и использовании камеры, расположенной под другим углом, например 90 градусов для получения изображения интерферограммы.

Этот метод обладает наибольшей точностью (менее микрона). В основном применяется для определения регулярности и плоскостности поверхности, путём определения контуров областей поднятия поверхности.

Метод имеет ряд недостатков:

- при передвижении исследуемого объекта возникают трудности синхронизации контурных линий дифракционной картины с координатной системой исследуемой поверхности;
- при расфокусировке объектива меняется дифракционная картина;
- методы чувствительны к вибрации и шуму;
- требуется тщательной установка и настройка оборудования;
- дифракционные решётки следует располагать близко к поверхности, что приводит к ограничениям в установке измерительного оборудования;
- оборудование имеет высокую стоимость.

К этому подходу относятся следующие патенты:

US 5135309 “Method and apparatus for non-contact measuring of object surfaces”, в котором для измерения высоты объект освещается двумя или несколькими симметрично расположенными потоками света, проходящими через дифракционные решетки. Высота объекта определяется по дифракционной картине, которую фиксирует цифровой фотоаппарат.

US 6731391 “Shadow moire surface measurement using Talbot effect”, в котором объект освещается лазерным лучом, проходящим через дифракционную решетку. Высота поверхности определяется путём использования эффекта муара тени (moire) и эффекта Талбота (Talbot).

US 7023559 “Method and system for measuring the relief of an object”, в котором дифракционная решётка помещается в три различные положения и получают три фотографии интерферограмм. Для каждого пикселя вычисляются фазы. Разность высот точек поверхности определяется путём вычисления разности фаз.

b) В стереоскопических методах по нескольким двумерным изображениям объекта вычисляется трёхмерное изображение. Традиционно применяется метод триангуляции. Для получения серии двумерных изображений используются различные направления падения света и/или различные положения регистрирующих устройств.

Для достижения достаточной точности в определении высоты все плоские изображения должны соответствовать одной и той же части поверхности и иметь одну систему координат. Точность определяется разрешающей способностью фотоаппаратуры и достигает нескольких микрон.

К этому подходу относятся следующие патенты:

US 4700398 “Method of and apparatus for detecting heights of points on surface of object”, в котором применяется стереоскопический метод определения высот характерных точек на освещаемой поверхности, путём обработки пары фотографий, снятых с разных точек.

US 6166393 “Method and apparatus for automatic inspection of moving surfaces”, в котором физические свойства движущейся поверхности определяются с помощью трёх источников освещения и разделение принимаемого света по цветам..

US 6671397 “Measurement system having a camera with a lens and a separate sensor”, в котором одна камера расположена горизонтально к поверхности и производит калибровочные снимки. Вторая камера построена по принципу Scheimpflug-a, (плоскость объектива не параллельна плоскости матрицы ПЗС). Такие камеры позволяют получать чёткие изображения наклонных поверхностей. Во второй камере плоскость матрицы ПЗС пересекается с плоскостью объектива на плоскости контролируемого объекта. Полученные два плоских изображения позволяют создать трёхмерное изображение исследуемой поверхности и следовательно определить высоту.

US 6678062 “Automated system with improved height sensing”, в котором высота точек поверхности определяется путём её фотографирования из двух положений с последующим применением метода триангуляции.

Метод триангуляции используется и для определения высоты отдельной точки или части поверхности, например в патенте

US 7130027 “Reflection photometric analytical\_system” точка поверхности освещается лазерным лучом. Отраженный свет попадает в два фотоприёмника, расположенные под разными углами. Высота точки определяется по принципу триангуляции.

с) В методах, основанных на положении пятна отражённого света, поверхность сканируется лазерным лучом. Отражённый луч фокусируется в виде светового пятна на регистрирующее устройство, например на детекторе положения PSD (Position Sensitive Detector). Высота поверхности определяется по положению светового пятна. В ряде случаев применяется метод триангуляции.

Этому методу присущи недостатки

- смещение фокуса приводит к ошибкам в определении высоты.

- при одновременном определении высоты нескольких выступов возникают проблемы из-за неточной работы оптико-акустической отклоняющей системы и астигматизма оптической системы. Очень тяжело эффективно и равномерно сканировать измеряемый объект с постоянной скоростью и без аберрации.

- при сканировании острых выступов отражённый свет очень нерегулярен, отражается в разных направлениях, его интенсивность изменяется в широких пределах при постоянной интенсивности падающего света и точное измерение высоты затруднено.

К этому подходу относятся следующие патенты:

US 5229619 “Apparatus for optically measuring the height of surface irregularities having an imaged scanning spot formed on a radiation diffusive screen”, в котором высоты нерегулярной поверхности определяются по положению пятна от отражённого лазерного луча.

US 5465152 “Method for coplanarity inspection of package or substrate warpage for ball grid arrays, column arrays, and similar structures”, в котором лазерный луч падает на измеряемую поверхность и сканирует её. Отражённый свет наблюдается под углом и образует световое пятно. Измеряется положение светового пятна. По этому положению определяется высота измеряемой поверхности.

US 5999266 “Method for inspecting height, and a height inspection apparatus to carry out the method”, в котором для проверки высоты осуществляется сканирование поверхности лазерным лучом, сохранение позиций световых пятен и определение высоты исходя из этих позиций.

US 6181472 “Method and system for imaging an object with a plurality of optical beams”, в котором несколько лазерных лучей сканируют поверхность. Отражённые лучи фокусируются на PSD, формируя там световые пятна. PSD определяет отклонения этих световых пятен. Трёхмерное изображение строится с помощью метода триангуляции.

US 6486964 “Measuring apparatus” , в котором высота определяется по сдвигу светового пятна по принципам тригонометрических измерений.

US 6555836 “Method and apparatus for inspecting bumps and determining height from a regular reflection region”, в котором высота сканируемой точки определяется из сканируемой позиции падающего луча света и позиции светового пятна на PSD.

d) Метод разделение потока падающего света заключается в освещении выступа узкими полосами света и определении разности интенсивности света, отражённого от поверхности выступа и от поверхности объекта. Точность метода невелика и определяется толщиной полосы света.

К этому подходу относятся следующие патенты:

US 4900153 “Optical\_surface\_inspection\_apparatus”, в котором поверхность освещается полоской света. Одна камера настроена на получения изображения полосы

поверхности, освещённой полосой света, а вторая камера настроена на границу тени от возможных дефектов.

US 5621814 “Image recognition apparatus capable of inspecting height and method for inspecting height by using two slit incident beams of light”, в котором на поверхность падает два узких параллельных плоских пучка света. Выступы влияют на отражённый свет и форма светлых линий в изображении изменяется. Изображение светлых линий сравнивается с эталонным изображением по определённому критерию.

US 7126699 “Systems and methods for multi-dimensional metrology and/or inspection of a specimen”, в котором поток света перегороден шторкой и освещает движущуюся исследуемую поверхность. Свет падает под наклоном, отражается и попадает на два светоприёмника, осуществляющих интегрирование с задержкой. Один приёмник расположен над освещаемой частью поверхности, а второй расположен над неосвещаемой частью поверхности. Проинтегрированные интенсивности будут пропорциональны высоте.

US 7180606 “Machine vision system for measuring heights of items”, в котором исследуемая прямоугольная область поверхности, содержащая линии выступов, разбивается на две равные прямоугольные области. Каждая область сканируется отдельным лазером. Изображение разбивается на два: одно от одного лазера, второе от другого. Система определяет высоту, используя образцовое изображение линии выступов.

е) Конфокальный метод заключается в последовательной фокусировке объектива на выступ и на поверхность объекта. Точность метода определяется точностью фокусирующей системы. К этому подходу относится патент

US 6052189 “Height measurement device and height measurement method”, в котором объект сканируется лучом лазера, отклоняющегося с помощью акустикооптического дефлектора. Высота определяется с помощью автоматической подстройки фокуса. Возникают трудности при определении высоты индивидуального выступа.

ф) Методы, связанные с измерением отражённого света наиболее просты в плане аппаратной реализации. Они основываются в обработке изображения исследуемой поверхности или анализе отражённого света. Критическим фактором для таких методов измерения высоты выступов является постоянное расстояние к поверхности, на которой расположены выступы.

К этому подходу относятся следующие патенты:

US 5003615 “Optoelectronic system for determining surface irregularities of a workpiece having a nominally plane reflective surface”, в котором поверхность может быть измерена с

высокой точностью путём сравнения её изображения с изображением эталонной поверхности.

US 6340109 “Solder bump measuring method and apparatus”, в котором поверхность имеет ряды выступов. Свет от лазера излучается и принимается нормально (вертикально) с помощью оптической головки. Определение высоты и положения выступа производится по уровню отражённого света.

Методы, связанные с измерением отражённого света имеют модификации, связанные с обработкой теней от выступов. К этой модификации относятся следующие патенты:

US 6919962 “Reflectometry\_apparatus\_and\_method”

Исследуемая поверхность освещается движущимся линейным источником света. Цифровая камера производит серию съёмки поверхности. Полученные изображения по точечно сравниваются с изображениями, синтезированными по принципу отражения света Ward –а для данных условий съёмки. Оцениваются параметры отражения и рассеяния и на их основании оценивается высота поверхности.

Метод имеет модификации, связанные с обработкой теней от измеряемых выступов.

US 4532723 “Optical\_inspection\_system”, в котором определяется размер и положение затенённой области. Эти данные служат для определения высоты исследуемого объекта

US 5986763 “Method for measuring heights of bumps and apparatus for measuring heights of bumps”, в котором объект освещается несколькими источниками света, излучающими свет под углом в 30 градусов. Выступы дают несколько теней. Фотокамера фиксирует изображение объекта, выступов и теней. Тени выделяются и по ним определяется высота выступа.

US 5963328 “Surface inspecting apparatus”, в котором исследуемая поверхность освещается двумя источниками света. Две камеры осуществляют фотографирование поверхности под таким углом, чтобы фиксировать только диффузионно отражённый свет. Полученные изображения обрабатываются с учётом того, что неоднородности и дефекты поверхности изображаются в виде различных теней.

US 6177682 “Inspection of ball grid arrays (BGA) by using shadow images of the solder balls”, в котором используется один и более источников света для создания теней от выступов в массиве выступов с последующим анализом изображения. Используется одна или более камер. В изображениях получают контуры теней для определения высоты выступа. Зная положение источника света и длину тени, определяют высоту выступа

Как следует из проведённого обзора патентов, отсутствуют патенты, посвящённые индивидуальной разбраковке по высоте выступов, расположенных на гребне, путём обработки изображения одного выступа.

---

## **Summary of invention**

Изобретение посвящено разбраковке по высоте отдельных выступов, образующих цепочку и расположенных на движущейся ленте. При изготовлении выступов образуется гребень. Выступы возвышаются над гребнем.

Цепочками выступов освещается равномерным потоком света. Отражённый свет формирует изображение участка ленты на массиве с ПЗС. Изображение передаётся в компьютер для обработки, где из него выделяются изображения отдельных выступов. Для каждого изображения отдельного выступа вычисляется контролирующий параметр и проверяется на принадлежность заранее вычисленному коридору значений.

Допустимый коридор значений контролирующего параметра производится на экспериментальной установке. В ходе экспериментов определяются такие оптимальные условия получения изображения ленты с выступами и параметры алгоритма обработки изображения отдельного выступа, при которых диапазон значений контролирующего параметра ленты с выступами, удовлетворяющими допуску по высоте, не пересекается с диапазоном значений контролирующего параметра ленты с выступами, не удовлетворяющими допуску по высоте. Полученные при эксперименте оптимальные условия получения изображения ленты с выступами и параметры алгоритма обработки изображения отдельного выступа применяются для разбраковки выступов по высоте в реальном масштабе времени в производственных условиях.

## **Brief description of drawing**

Fig.1. Схема измерительной установки.

Fig.2. Схема измерительной установки. Вид сверху.

Fig.3. Схема лабораторной экспериментальной измерительной установки. Вид сбоку.

Fig.4. Схема лабораторной экспериментальной измерительной установки.

Fig.5. Схема лабораторной экспериментальной измерительной установки. Вид сверху.

Fig.6. Искажения по вертикали фотографического изображения фрагмента поверхности чистой металлической ленты.

Fig.7. Искажения по горизонтали фотографического изображения фрагмента поверхности чистой металлической ленты.

Fig. 8. Изображение выступов различной высоты, искусственно созданных на поверхности металлической ленты.

Fig.9. К определению понятия объём тени V. (Проекция)

---



Fig. 10. Зависимость объёма тени  $V$  от высоты выступов, искусственно созданных на поверхности металлической ленты. Прямая регрессии.

Fig. 11. Фотографическое изображены цепочки выступов высотой 113 мкм на металлической ленте.

Fig. 12. Фотографическое изображены цепочки выступов высотой 138 мкм на металлической ленте.

Fig. 13. Геометрическая модель выступа над гребнем.

Fig. 14. Результаты моделирования изображения выступа над гребнем при различных углах падения света.

Fig. 15. Фотография фрагмента металлической полосы с тремя рядами выступов на плоском основании. По краям виден крепёжный скотч.

Fig. 16. Кадрированная фотография фрагмента металлической полосы с тремя рядами выступов на плоском основании.

Fig. 17. Средние интенсивности столбцов изображения металлической полосы с тремя рядами выступов на плоском основании. 256 градаций серого.

Fig. 18. Изображение второй полосы выступов, вырезанное из изображения металлической полосы с тремя рядами выступов на плоском основании. (После поворота на 90 градусов).

Fig. 19. Средние интенсивности строк изображения второй полосы выступов

Fig. 20. Средние интенсивности строк изображения второй полосы выступов. Детально.

Fig. 21. Средние интенсивности строк изображения второй полосы выступов после фильтрации. Детально.

Fig. 22. Изображение второй полосы выступов, разбитое на изображения отдельных выступов (После поворота на 90 градусов).

Fig. 23. Средние интенсивности строк второй полосы выступов после корректировки искажений.

Fig. 24. Средние интенсивности столбцов изображения второй полосы выступов с различными высотами выступов. Сплошная линия соответствует выступам высотой 113 мкм, а линия из точек соответствует выступам высотой 63 мкм.

Fig. 25. Средние интенсивности столбцов изображения второй полосы выступов с различными высотами выступов. Сплошная линия соответствует выступам высотой 113 мкм, а пунктирная линия соответствует выступам высотой 138 мкм.

Fig. 26. Усреднённые изображения отдельных выступов различной высоты 63, 113 и 138 микрон. Размер одного выступа по вертикали равна одному миллиметру.

---

Fig. 27. Результаты вычисления глубины теней для выступов различной высоты. Знаком '+' обозначены глубины теней для выступов высотой 138 мкм., знаком '.' обозначены глубины теней для выступов высотой 113 мкм, знаком 'x' обозначены глубины теней для выступов высотой 63 мкм. Нанесён коридор допустимых значений для глубин теней выступов высотой 113 микрон..

Fig. 28. Средние интенсивности столбцов изображения металлической полосы с тремя рядами выступов на плоском основании. 256 градаций серого.

### **Detailed description of invention**

В устройстве, изображённом на Fig. 1, 2 и 3 на тонкую металлическую ленту 2 толщиной около 0.1 миллиметра наносятся методом выдавливания несколько равноудалённых друг от друга цепочек 5 сферических выступов. При изготовлении выступов образуется гребень за счёт вытягивания металла. Выступы возвышаются над гребнем. Цепочки выступов расположены параллельно боковым кромкам металлической ленты 2. Расстояние между выступами одинаково и равно 1 миллиметру. Расстояние между цепочками выступов 5 одинаково и равно 12 миллиметрам. При нормальной работе устройства сферический выступ возвышается над плоскостью ленты на 113 микрон. Лента без нанесённых выступов 2 хранится в бухте 1 и подаётся на валки 3, на которых осуществляется выдавливание нескольких цепочек сферических выступов 5. Лента с нанесёнными выступами 4 наматывается на барабан 6.

Лента освещается равномерным потоком света 21, исходящим от источника света 20.

Для определения высоты выступа предлагается использовать фиксацию изображения с помощью одной или нескольких регистрирующих систем 7', 8', 9' в виде массива элементов с ПЗС 7, 8, 9 и оптической системы 10, 11, 12 с последующей передачей изображений в компьютер для обработки. Оптическая система фокусирует изображение на массив ПЗС.

В качестве регистрирующей системы выступает либо цифровой фотоаппарат, либо линейка ПЗС, расположенная перпендикулярно к направлению движения ленты и снабжённая оптической системой. Примером регистрирующей системы в виде линейки ПЗС является светоприёмное устройство объёмного планшетного сканера.

Возможно использовании нескольких регистрирующих систем 7', 8' и 9' с последующей передачей изображений по USB кабелям 13, 14 и 15 в компьютеры 16, 17 и 18 для обработки. Каждая регистрирующая система фиксирует одновременно несколько цепочек выступов. Например, на Fig. 1, 2 и 3 регистрируется три цепочки выступов. Число регистрирующих систем определяется скоростью движения ленты, числом

цепочек выступов на металлической ленте и скоростью обработки изображений в компьютерах.

Обработка изображений от каждого массива с ПЗС осуществляется с помощью одинаковых параллельно работающих программ в одном, либо в нескольких компьютерах, объединённых в сеть 19. Одна главная программа, выполняющаяся, возможно на отдельном компьютере обеспечивает отсутствие пропущенных и не обработанных участков изображений цепочек выступов и осуществляет общее управление.

Для сопряжения регистрирующей системы с компьютером используется программное обеспечение, изготовленное фирмой производителем системы или стандартное программное обеспечение. Например, для фотоаппаратов фирмы Canon применяется пакет PSRecSDK, а для фотоаппаратов фирмы Olympus применяется пакет OlympusSDK. При использовании в качестве приёмного устройства линии ПЗС объёмного планшетного сканера стандартно используется TWAIN драйвер.

Основная идея изобретения вытекает из очевидного факта: чем выше объект, тем больше от него тень.

Цель данного изобретения состоит в предложении такого алгоритма обработки фотоизображений, который бы при определённых условиях получения изображения позволял бы по тени от выступов судить об их высоте

В начале на измерительной лабораторной установке, изображённой на Fig.4 и 5, определяются условия получения изображения ленты с выступами и параметры алгоритма обработки этих изображений, при которых по тени от выступов можно было бы судить об их высоте. Затем эти условия и параметры используются на установке в производстве (см. Fig. 1, 2 и 3), для определения в реальном масштабе времени, является ли выступы текущего участка движущейся металлической ленты кондиционными или нет. На Fig. 4. и 5 приведена схема экспериментальной измерительной установки на которой присутствует источник освещения 26 в виде широкого галогеновый прожектора, дающий плоский фронт падающего света. Здесь 22' – регистрирующая система в виде массива ПЗС 22 с оптической системой 23, например цифровой фотоаппарат или линейка ПЗС объёмного планшетного сканера с оптической системой, 24 – фотографируемый объект (пластина с выступами) на плоском основании 25, 28 – компьютер, 29 –USB кабель.

Предполагается, что фронт света 27 (21) падает строго перпендикулярно к линии выступов 5 на ленте 4 (30 на отрезке ленты 24). Образуется тень от выступов, которая ложится на относительно плоскую поверхность ленты.

---

Более подробно рассмотрим случай, когда получение изображения фрагмента ленты осуществляется цифровым фотоаппаратом.

Для цифровых фотоаппаратов качественные изменения вносит ориентация линии выступов в объективе фотокамеры. Цифровые фотокамеры хорошо фокусируются лишь при наличии вертикальных линий в кадре. Поэтому в кадре линии выступов 5, 30 должны располагаться строго вертикально.

Исследуем искажения фотографического изображения фрагмента чистой ленты без выступов, обусловленные неравномерностью освещения и фокусными искажениями.

Сфотографируем фрагмент чистой ленты цифровым фотоаппаратом 22 с расстояния  $h$  от объектива 23 до фрагмента ленты равным 5 см. Фрагмент освещается галогеновой лампой 26 мощностью 300 ватт. Свет падает на фрагмент под углом  $\alpha$  равным 60 градусов к нормали плоскости фрагмента. Фрагмент ленты прикреплён к основанию 24 с помощью скотча или двусторонней клеящейся ленты и образует плоскость. Лампа находится на расстоянии  $H$  в полметра до плоскости фрагмента чистой ленты.

Часть изображения фрагмента, находящаяся ближе к источнику света, освещается сильнее, чем правая. Возникает неравномерность освещения объекта при удалении от источника освещения. Это первый искажающий фактор.

Идеальный для наших исследований источник освещения должен давать равномерный по всему фронту поток света, падающий на фотографируемый объект. Для приближения к идеалу мы используем широкие галогеновые лампы мощностью 300 и 500 ватт, снабжённые параболическим отражателем. Для достижения равномерности потока света лампа располагается достаточно далеко от объекта. Не идеальность источника света в виде неравномерности освещения объекта по фронту к источнику света даёт второй искажающий фактор.

Перед фотографированием всегда следует осуществлять фокусирование объектива фотокамеры на фотографируемый объект. Объектив может сфокусироваться не на весь объект, а только на ту его часть, которая находится в фокусной рамке дисплея фотоаппарата. Остальная часть изображения претерпевает фокусные искажения. Искривляется геометрия изображения и его интенсивность. Фотография равномерно освещённого объекта будет темнее по краям и светлее в центре. Это третий искажающий фактор.

Если в качестве устройства, регистрирующего изображение использовать линейку ПЗС объёмного планшетного сканера с цилиндрической протяжённой оптической системой, то третий искажающий фактор будет отсутствовать.

---

Все эти три фактора суммируются и искажают фотографическое изображение объекта.

Искажения по вертикали в фотоизображении фрагмента чистой ленты представлены на Fig. 6. Здесь  $N$  – номер строки изображения.  $Sum$  – сумма интенсивностей изображения для каждой строки. Искажения обусловлены неравномерности освещения объекта по фронту и фокусными искажениями.

Важно так расположить фотоаппарат и источник света по отношению к объекту, чтобы его верхний и нижний края были одинаково освещены. Fig. 6 показывает, что в нашем случае верхний край пластины освещён сильнее.

Искажения по горизонтали представлены на Fig. 7. Здесь  $N$  – номер столбца изображения.  $Sum$  – сумма интенсивностей изображения для каждого столбца. Искажения обусловлены неравномерности освещения объекта и фокусными искажениями. Очевидна несимметричность изображения, являющаяся следствием взаимодействия искажения по удалённости и фокусного искажения.

Для уменьшения влияния искажений предлагается обрабатывать не всё изображение, а только его центральную часть, находящуюся в фокусе. То есть осуществлять кадрирование изображения.

Предположим, что мы осуществляем контроль высот выступов в реальном масштабе времени на промышленной установке, изображённой на Fig. 1, 2 и 3.

Чем выше находятся объективы 10, 11 и 12 фотоаппаратов 7, 8 и 9 над лентой 4 с выступами 5, тем больше выступов можно зафиксировать и обработать за одно фотографирование. Однако, при достаточно большом поднятии фотоаппаратов над лентой число элементов изображения приходящееся на изображение одного выступа окажется недостаточным для адекватной обработки. Высота поднятия фотоаппарата устанавливается экспериментально.

Для увеличения скорости обработки предлагается одновременно использовать несколько фотоаппаратов, например три 7, 8 и 9. Команды на осуществление съёмки периодически подаются одновременно от компьютеров 16, 17 и 18 на все фотоаппараты 7, 8 и 9. Изображения трёх участков ленты от фотоаппаратов передаются в компьютеры одновременно и параллельно через USB кабели 13, 14 и 15. В компьютерах эти изображения кадрируются и обрабатываются параллельно, одновременно и независимо друг от друга. Так как металлическая лента 4 движется, то по окончании процесса обработки и на момент очередной съёмки фотоаппараты будут находиться над новыми участками ленты. Необходимо, чтобы кадрированное изображение нового участка ленты для фотоаппарата 13 пересекалось со старым кадрированным изображением участка

фотоаппарата 15 и желательно, чтобы это пересечение было минимальным. Это достигается тогда, когда размер изображения после кадрирования равно высоте фотоаппарата. На размер кадра влияет высота поднятия объективов 10, 11 и 12 над цепочкой 5 ленты 4.

Например, если фотографирование в реальном масштабе времени осуществляется с помощью программно управляемого фотоаппарата Canon PowerShot a640, высота которого равна 68 мм, то минимальный размер кадра также равен 68 мм. А так как ширина одного выступа равна одному миллиметру, то в кадре нужно оставлять изображения 68 выступов. Этого можно достичь, если поднять объективы фотоаппаратов 10, 11 и 12 над цепочкой 5 ленты 4 на высоту 300 мм. При таком поднятии в фокусе окажутся три полосы с выступами, а на изображение одного выступа придётся в среднем 14 элементов изображения (пикселей).

Установлено, что время фотографирования при максимальном разрешении и время передачи изображения по USB кабелю из фотоаппарата в компьютер составляет около двух секунд. Время зависит от типа фотографируемого изображения. Чем лучше изображение подвергается сжатию, тем оно быстрее фотографируется и передаётся в компьютер.

Время обработки одного снимка зависит от мощности компьютера и приблизительно равно двум секундам.

Общее время составляет приблизительно 4 секунды ( $2 + 2$ ). Так как фотоаппарата три, то максимально допустимая скорость движения ленты равна 51 мм/сек ( $=68\text{мм} \cdot 3/4 \text{ сек}$ ). При использовании шести фотоаппаратов допустимая скорость движения ленты составит 102 мм/сек ( $=68\text{мм} \cdot 6/4 \text{ сек}$ ).

Лента движется, следовательно, фотоизображение будет смазываться. Для уменьшения искажений следует брать более короткую выдержку. При скорости движения 51 мм в секунду и выдержке 1/2500 секунды мы имеем смазывание изображения для участка протяжённостью  $51 \cdot 1/2500 = 0.0204 \text{ мм}$ .

На изображение одного выступа приходится в среднем 14 элементов изображения. Ширина выступа равна одному миллиметру. Один элемент изображения соответствует 0.071 мм ( $1\text{мм}/14$ ) поверхности. То есть будет смазана только 28.73 % ( $=0.0204/0.071 \cdot 100\%$ ) элемента изображения одного выступа, что оказалось вполне приемлемо.

При использовании в качестве приёмного устройства линии ПЗС объёмного планшетного сканера с цилиндрической оптической системой проводить кадрирование нет необходимости. Число строк в изображении, получаемом из такой системы и

передаваемом в компьютер на обработку можно задавать командой от компьютера. Это число определяется скоростью движения ленты и вычислительной мощностью компьютера, обрабатывающего изображение. При высокой скорости движения можно увеличить число приёмных устройств. Максимальная скорость движения ограничена производительностью приёмного устройства объёмного планшетного сканера и составляет несколько сантиметров в секунду.

Исследуем зависимость объёма тени от высоты выступа.

С помощью специального приспособления на чистом фрагменте металлической ленты выдавлен ряд изолированных выступов разной высоты от 70 до 260 мкм. Расстояние между выступами таково, чтобы между ними был плоский участок. Далее для обеспечения плоскости полученная пластина прикреплялась к плоскому основанию с помощью скотча или двусторонней клеящейся ленты. Получение изображения созданных выступов осуществлялось с помощью фотокамеры. Фотографирование осуществлялось при расстоянии  $h$  от объектива 23 фотокамеры 22 до исследуемой пластины 24 с выступами 30 равном 100 мм. В фокусе вертикально находилось по три выступа. Далее эти тройки выступов вырезались в Fotoshop и состыковывались так, что высоты выступов возрастали слева направо. Результат состыковки представлен на Fig. 8. Визуально можно наблюдать, что более высокие выступы дают более густую, глубокую тень. Подтвердим это численными расчётами.

Прежде всего, надо численно определить, что такое тень. Будем считать, что точка изображения принадлежит тени, если её интенсивность будет ниже некоторого порога  $D$ . Порог  $D$  не фиксирован и подбирается при обработке изображений на основании других параметров изображения. Для численной характеристики тени введём понятие объёма тени  $V$ , вычисляемого на прямоугольном изображении размера  $m$  строк и  $n$  столбцов по алгоритму: если интенсивность изображения  $I_{ij}$  в точке  $i=1\dots m, j=1\dots n$ , меньше, чем порог  $D$ , то она добавляется в объём тени по формуле  $V = V + (D - I_{ij})$ . Здесь  $m$  и  $n$  – число строк и столбцов в изображении. На Fig. 9 представлена плоская иллюстрация понятия объёма тени.

Вычислим объёмы для всех выступов, изображённых на Fig. 8. Порог  $D$  для вычисления объёма тени брался в виде средней интенсивности по изображению на Fig. 8. Результаты обработки изображения на Fig. 8 представлены на Fig. 10. По оси  $X$  представлены номера выступов  $N$  по возрастанию. Высота первого выступа равна 70 мкм, второго 80 мкм, ... 20-го – 260 мкм. Высота  $H$  выступа является линейной функцией его номера  $H = H(N)$ . Для изображения на Fig. 8 коэффициент корреляции между объёмом

тени  $V$  и высотой  $H$  равен 0.91274. Получены коэффициенты линейной регрессии. Уравнение регрессионных прямых также представлены на Fig. 10.

Рассмотрим фрагменты фотографий реальной металлической ленты с нанесёнными промышленным способом цепочками выступов. На Fig. 11 изображены выступы высотой 113 мкм, а на Fig. 12 изображены некондиционные выступы высотой 138 мкм. По-прежнему можно видеть тени от выступов. Но появилась ещё и общая тень, особенно хорошо заметная для выступов высотой 138 мкм. Сравним изображения на Fig. 11 и 12 с фотографиями на Fig. 8. Интенсивность изображения на Fig. 8 приблизительно одинакова как у верхнего так и у нижнего краёв. Интенсивность изображения на Fig. 11 и 12 у верхнего края значительно выше, чем у нижнего края. Особенно это видно для пластины с выступами высотой 138 мкм. Такие различия можно объяснить тем, что при изготовлении выступов путём выдавливания на участке между соседними выступами образуется гребень за счёт вытягивания металла ленты. Этот гребень для выступов высотой 138 мкм выше, чем гребень для выступов высотой 113 мкм.

Общая высота выступа равна высоте гребня плюс собственно высота выступа над гребнем. Экспериментально установлено, что высота выступа 138 мкм относительно вершины своего гребня, меньше высоты выступа 113 мкм относительно вершины своего гребня. Визуально выступы высотой в 138 мкм на Fig. 12 кажутся меньше, чем выступы высотой в 113 мкм на Fig. 11.

Гребень вносит искажения и в интенсивность верхней части изображения. Так изображение полосы выступов 138 мкм на Fig. 12 в верхней части интенсивнее, чем изображение полосы выступов 113 мкм на Fig. 11 в верхней части.

Можно предположить, что увеличивая угол падения света к нормали плоскости металлической ленты, можно добиться того, что тень от выступа выйдет за пределы тени от гребня. Для опровержения этого осуществим численное моделирование. Предположим, что имеется единственный источник освещения, дающий равномерных поток света и фиксируется только диффузионное отражение света. Геометрическая модель гребня и выступа над ним представлена на Fig. 13.

Согласно закону Ламберта интенсивность изображения точки при диффузионном отражении света зависит лишь от того, какой угол образует нормаль к этой точке с направлением падения света и не зависит от направления наблюдения. При нормальном падении света изображение имеет максимальную интенсивность.

Моделируя закон Ламберта при различных углах падения света получим изображения, приведённые на Fig. 14.

---



Качественно изображения на Fig. 14 соответствует изображениям одного выступа на Fig. 11 и 12. Видна тень от гребня и тень от выступа. Численные эксперименты показали, что при всех значениях угла падения света тень от выступа не выйдет за пределы тени от гребня.

Таким образом, тень от выступа всегда лежит в пределах тени от гребня. Общая тень формируется как тень от гребня плюс тень от выступа, а для самостоятельно изготовленных выступов мы имеем чистую тень от выступа. Причём, в отличие от искусственной ситуации, изображённой на Fig.8, где более высокому выступу соответствует более глубокая тень, визуальную чистую тень от выступа высотой 138 мкм (Fig. 12) не превосходит чистая тень от выступа высотой 113 мкм (Fig. 11). Более того, понятие чистая тень трудно формализовать и вычислить. Поэтому для суждения о высоте выступа в рассмотрение будет включена как тень от выступа, так и тень от гребня. Численно тень мы характеризуем объёмом тени, который зависит от некоторого порога тени  $D$ . Ниже предлагается однозначный алгоритм  $A$  определения порога тени  $D$ , который при определённых условиях фиксации изображения позволит по объёму тени судить о высоте выступа.

Изложим этот алгоритм  $A$ .

Итак, у нас в распоряжении имеется несколько тестовых участков металлической ленты с нанесёнными выступами, размер которых заранее известен. Имеется три набора: один – качественный, а два – бракованные. Один из бракованных наборов имеет высоты выступов больше допуска, а один – меньше допуска.

Фрагменты ленты тщательно прикрепляются к плоскому основанию с помощью двусторонней клейкой ленты или скотча. Расположение фрагментов ленты на основаниях одинаково. Основания вместе с приклеенными участками лент с полосами выступами поочерёдно помещаются на экспериментальную установку (см Fig. 4 и 5). Путём поворота регистрирующего устройства, линии выступов размещаются строго вертикально в рабочей области регистрирующего устройства. Если в качестве регистрирующего устройства используется приёмная оптическая система объёмного планшетного сканера, то линии выступов размещаются перпендикулярно линии с ПЗС. Если в качестве регистрирующего устройства используется цифровая камера, то линии выступов размещаются строго вертикально в дисплее камеры.

Путём перемещения основания, линии выступов размещаются строго перпендикулярно к направлению падения света. Исключим посторонние источники света.

Расположение в измерительной установке всех фрагментов ленты, участвующих в эксперименте одинаково на весь период эксперимента.

Устанавливаются условия проведения эксперимента, например высота  $H$  источника света, мощность источника света, расстояние  $h$  от объектива оптической системы 23 до исследуемой пластины 24 и угол  $\alpha$  падения света

Для каждого фрагмента ленты с выступами, закреплённой на плоском основании в экспериментальной установке осуществляется следующая последовательность действий.

1. Изображение участка металлической ленты передаётся из регистрирующего устройства в компьютерную программу для обработки

2. Если в качестве регистрирующего устройства используется фотоаппарат, то производится кадрирование изображения, путём программного вырезания из него части, находящейся в фокусной рамке фотоаппарата. По вертикали кадр должен вмещать участок ленты с размером равным высоте фотоаппарата.

3. Вычисляются средние значения интенсивностей столбцов изображения и на основании экстремумов этих средних интенсивностей из изображения вырезаются полосы изображений с выступами. Изображения полос с выступами сохраняются в базе данных.

4. Все изображения полос выступов в базе для данных условий эксперимента разбиваются на участки, содержащие изображение  $T$  одного выступа. Для этого в изображении полосы с выступами вычисляются средние значения интенсивностей строк. График средних значений интенсивностей строк сглаживается путём низкочастотной фильтрации. Границей изображений отдельных выступов будут минимумы сглаженного графика средних значений строк.

5. Каждая пластина с выступами содержит несколько полос с выступами. Эти полосы расположены на разных расстояниях от источника света, поэтому и обрабатываться эти полосы должны по-разному. Количество различных расстояний  $L$  равно количеству полос.

6. Устраняются искажения. Пусть выступ  $T$  находится на расстоянии  $L$  от источника света. Тогда изображение выступа  $T$  умножается на поправочный коэффициент равный частному от деления средней интенсивности изображений всех полос в базе, находящихся на расстоянии  $L$  от источника света, на среднюю интенсивность этого отдельного изображения  $T$ .

7. Для столбцов изображений полос в базе (после корректировки искажений), расположенных на расстоянии  $L$  от источника света определяем три средние интенсивности столбцов: одну для полос с кондиционными по высоте выступами, и две полос с некондиционными по высоте выступами.

---

8. В качестве порога тени  $D$  для выступов, расположенных на расстоянии  $L$  от источника света, возьмём ординату точки пересечения графиков средней интенсивности столбцов полос с кондиционными и с некондиционными выступами.

9. На основании координат точек пересечения графиков средней интенсивности столбцов полос с кондиционными и с некондиционными выступами вычислим границы изображений внутри которых будут вычисляться объёмы теней.

10. Для каждого расстояния  $L$  полос от источника света вычисляются объёмы теней для каждого выступа для всех полос в базе (для данных условий эксперимента). Результат заносится в базу данных.

11. Если для каждого расстояния  $L$  полос от источника света диапазоны объёмов теней для полос с выступами кондиционной высоты пересекаются с диапазонами объёмов теней для полос с выступами некондиционной высоты, то меняем условия проведения эксперимента (высота  $H$  источника света, мощность источника света, расстояние  $h$  от объектива фотокамеры 23 до исследуемой пластины 24 и угол  $\alpha$  падения света). Иначе полученные условия получения изображений и найденные для каждого расстояния  $L$  полос от источника света (каждой полосы на пластине) диапазоны объёмов теней, границы изображений внутри которых будут вычисляться объёмы теней и пороги теней используем для контроля высот выступов в реальном масштабе времени.

Приведём пример применения изложенного алгоритма для случая, когда в качестве регистрирующего устройства использовался цифровой фотоаппарат.

В наличии имелось три набора отрезков металлической ленты с нанесенными промышленным способом тремя линиями выступов. Один кондиционный набор содержит выступы высотой 113 мкм, а два некондиционных набора содержат выступы высотой 63 и 138 мкм, соответственно.

Эксперименты по определению оптимальных условий фотосъёмки и порога тени проводились для широкого спектра значений параметров измерительной установки, изображённой на Fig. 4 и 5. Высота  $H$  источника света  $S$  изменялась в пределах от 300 мм до 1000 мм. Мощность галогеновой лампы  $S$  составляла 100, 150, 200, 300 и 500 ватт. Высота  $h$  поднятия объектива камеры над объектом составляла от 100 до 500 мм.

Выбор был остановлен на галогеновой лампе мощности 500 ватт и высоте  $H = 500$  мм. Высота  $h$  поднятия объектива камеры над объектом составила 300 мм. При этом изображение одного выступа имеет ширину в среднем 14 пикселей.

---

Угол  $\alpha$  принимал значения 30, 45 и 60 градусов. При 30 градусах получаем неудовлетворительные результаты по разному диапазонам объёмов теней. Наилучший

результат получен для угла  $\alpha = 60$  градусов. При угле 45 градусов результаты получались количественно несколько хуже.

При таких условиях получения изображений алгоритм определения порога тени D даёт непересекающиеся диапазоны объёмов теней для качественных выступов высотой 113 мкм и бракованных выступов высотой 63 и 138 мкм. Продемонстрируем работу алгоритма A при этих оптимальных условиях фотосъёмки.

Осуществим фотосъёмку произвольного фрагмента металлической ленты из произвольного набора на экспериментальной лабораторной установке, изображённой на Fig. 4 и 5. Поверхность ленты образует плоскость благодаря её креплению к плоскому основанию 25 с помощью скотча или двусторонней клеящейся ленты. Путём перемещения основания, линии выступов размещаются строго перпендикулярно к направлению падения света. Путём перемещения фотоаппарата, линии выступов размещаются строго вертикально в кадре. Производится снимок путём наведения фокуса на центральную цепочку выступов. На Fig. 15 приведена фотография фрагмента металлической ленты с тремя рядами выступов на плоском основании. По краям виден крепёжный скотч.

Проверяется равномерность освещения по всему фотоизображению и вертикальность линий выступов на фотоизображении. Далее программно осуществляется кадрирование фотоснимка.

По вертикали кадр должен вмещать участок ленты с размером равным высоте фотоаппарата. Высота фотоаппарата равна 68 мм. Размер выступа на пластине равен 1 мм. Средняя высота изображения одного выступа равна 14 пикселям. Это соответствует 952 элементам изображения, что соответствует 68 выступам ( $68 \cdot 14$ ) или 68 мм или размеру фотоаппарата по вертикали. Учитывая дальнейшие нестыковки и перекрытия возьмём 1000 строк.

Кадр по горизонтали должен лежать в фокусной рамке. Мы достигнем этого, если слева ограничиваемся изображениями первой левой полосы, а справа ограничиваемся правым обрезом металлической ленты. На Fig. 16. приведен фотоснимок с Fig. 15 после кадрирования. Ширина изображения равна 440 пикселей.

Нарежем полосы выступов. Для этого построим график средних интенсивностей столбцов изображения на Fig. 16 приведённый на Fig. 17. Четвёртый слева максимум обусловлен крепёжным скотчем. Экстремумы графика на Fig. 17 дают хорошее основание для деления изображения на полосы с выступами. Левый край первой полосы можно взять по первому максимуму, а правый край первой полосы можно взять по второму максимуму. Левый край второй полосы можно взять по второму максимуму, а правый край второй полосы можно взять по третьему максимуму. Левый край третьей полосы

можно взять по третьему максимуму, а правый край третьей полосы можно взять по четвёртому максимуму, обусловленному наличию крепёжного скотча.

Например, изображение второй полосы высотой 113 мкм (после поворота на 90 градусов) представлено на Fig. 18. Не теряя общности, далее будем работать с этой второй полосой.

Далее полоса программно разбивается на изображения  $T$  отдельных выступов. Хотя технологически имеем одинаковое расстояние между выступами, но возникают трудности по привязке к первому выступу, так как кадр на Fig. 16 не обязательно начинается и заканчивается между двумя выступами.

На Fig. 19 представлены средние интенсивности строк изображения полосы. (Средние интенсивности столбцов изображения на Fig. 18).

Более детально центральная часть графика на Fig. 19 представлена на Fig. 20.

Сгладим график на Fig. 19 с помощью идеального фильтра низких частот с частотой среза 75. Центральная часть графика на Fig. 19 после фильтрации представлена на Fig. 21.

График на Fig. 21 позволяет разбить изображение полосы на изображение отдельных выступов. Границей изображений отдельных выступов будут минимумы графика на Fig. 21. Изображение полосы на Fig. 18, разбитое на изображение отдельных выступов представлено на Fig. 22.

Рассмотрим зависимость представленную на Fig. 19. Имеет место неравномерность значений интенсивностей, обусловленная фокусными искажениями и неравномерностью освещения. То есть необходима корректировка искажений, связанных с неравномерностью освещения и фокусировкой. Для чего каждое отдельное изображение выступа  $T$  умножалось на поправочный коэффициент равный частному от деления средней интенсивности изображения всех вторых полос, вырезанных из изображений образцов, участвующих в эксперименте на среднюю интенсивность этого отдельного изображения  $T$ . После корректировки имеем среднюю интенсивности строк второй полосы, изображённую на Fig. 23.

Отдельно для каждого выступа высотой 63, 113 и 138 мкм. усредним по столбцам изображения всех вторых полос для всех образцов, участвующих в эксперименте. Поместим на один график средние интенсивности столбцов изображений второй полосы выступов для образцов металлической ленты с выступами высотой 63 и 138 мкм. На графике Fig. 24 сплошная линия соответствует выступам высотой 113 мкм, а линия из точек соответствует выступам 63 мкм. Из Fig. 24 видно, что с 5 по 69 столбец включительно средняя интенсивность изображений выступов 113 мкм меньше, чем средняя интенсивность изображений выступов 63 мкм.

Поместим на один график средние интенсивности столбцов изображений второй полосы выступов для образцов металлической ленты с выступами высотой 113 и 138 мкм. На графике Fig. 25 сплошная линия соответствует выступам высотой 113 мкм, а пунктирная линия соответствует выступам 138 мкм. Из Fig. 25 видно, что с 6 по 19 столбец включительно средняя интенсивность изображений выступов 138 мкм меньше, чем средняя интенсивность изображений выступов 113 мкм.

Таким образом, чем выше выступ, тем на определённом участке интенсивность его изображения меньше. Следовательно, чем выше выступ, тем на определённом участке тень от него больше.

На Fig. 26 приведены изображения усреднённых изображений выступов высотой 63, 113 и 138 микрон. Размер одного выступа на пластине равен одному миллиметру. Минимальный размер изображений на Fig. 31 составляет 12 строк. Если изображения выступов 63 и 113 можно визуально различать, то изображения выступов 113 и 138 визуально различать затруднительно.

Перейдём к определению объёмов теней. Вначале вычислим границы изображений внутри которых будут вычисляться объёмы теней.

Согласно Fig.м 24 и 25 в диапазоне с 6 по 19 столбец средняя интенсивность изображений выступов 138 мкм меньше, чем средняя интенсивность изображений выступов 113 мкм и средняя интенсивность изображений выступов 113 мкм меньше, чем средняя интенсивность изображений выступов 63 мкм. Этот диапазон будем использовать как границу изображений внутри которой будут вычисляться объёмы теней.

В качестве порога D для определения объёма тени возьмём среднюю интенсивность изображений высотой выступов 113 (138) мкм на границе, внутри которой будут вычисляться объёмы теней - 19-м столбце. Она равна 17382. См. Fig. 25.

На основании многочисленных опытов установлены коридор, в котором лежат объёмы теней для выступов 113 мкм. Так для данных конкретных условий съёмки объём тени для выступов второй цепочки высотой 113 микрон лежит в диапазоне 22687 – 232320.

Результаты расчёта объёмов теней для второй цепочки в наудачу взятых фрагментах ленты 63, 113 и 138 мкм приведён на Fig. 27. На Fig. 27 объёмы 68-ми теней выступов высотой 63 мкм. обозначен знаком 'x', объёмом 113 мкм - знаком '.' и объёмом 138 мкм. - знаком '+'. На Fig. также обозначен коридор значений для объёмов теней выступов высотой 113 микрон.

Аналогично определяем диапазоны объёмов теней, пороги и эффективную ширину полос для первой и третьей цепочки выступов на металлической ленте.

Приведенный пример применения алгоритм определяет диапазоны объёмов теней, пороги теней и эффективную ширину полос, которые используются далее для разбраковки металлических полос по высотам нанесенных на них выступов.

Предполагается, что на промышленной установке участок ленты, находящийся под регистрирующим устройством является плоским, фронт света падает строго перпендикулярно к линии выступов и изображения линий выступов расположены строго вертикально в регистрирующем устройстве.

Установим на промышленной установке те оптимальные условия получения изображений, которые получены при лабораторных экспериментальных исследованиях.

На каждом компьютере, подсоединённом к регистрирующему устройству, для каждой полосы хранятся границы изображений внутри которых будут вычисляться объёмы теней, диапазон объёмов теней и порог тени, полученные при проведения эксперимента.

На каждом компьютере, подсоединённом к регистрирующему устройству, выполняется программа, реализующая следующий циклический алгоритм:

1. Из компьютеров в регистрирующее устройство подаётся команда на создание изображения
2. Изображения передаются в компьютеры и обрабатываются.
3. Если в качестве регистрирующего устройства используется фотоаппарат, то производится кадрирование изображения. По горизонтали берётся часть изображения лежащая в фокусной рамке. По вертикали кадр должен лежать в фокусной рамке и изображать участок ленты с размером равным высоте фотоаппарата.
4. Вычисляются средние интенсивности по столбцам изображения или кадра. Качественный вид полученной зависимости приведён на Fig. 28..
5. В кадре выделяем три полосы. Левые границы полос определяются по максимумам графика на Fig. 22. Ширина полосы равна минимуму значений  $a$ ,  $b$  и  $c$ , определённых на Fig. 22. Для каждой из полос программа осуществляет следующие действия:
  - А) Полоска разбиваются на участки, содержащие изображение одного выступа, с помощью алгоритма изложенного выше.
  - В) Устраняются искажения по приведенной выше методике.
  - С) Для каждого изображения отдельного выступа рассчитывается объём тени с использованием порога тени  $D$  в пределах, определяемом границей изображения внутри которых будут вычисляться объёмы теней.

D) Если объём тени для какого-то выступа не принадлежит диапазону объёмов теней для данного номера полосы, то этот выступ является бракованным по высоте

**What claimed is:**

1. Метод и устройство для оптической разбраковки по высоте локальных сферических выступов, объединённых в цепочки, расположенные перпендикулярно боковым кромкам металлической ленты, в процессе движения ленты, включающий:
  - освещение цепочка выступов протяжённым источником света для достижения равномерности освещения;
  - регистрация по команде от компьютера изображений участков ленты с помощью одной или нескольких цифровых оптических регистрирующих устройств, подсоединённой к одному или нескольким компьютерам;
  - передачу по команде от компьютера изображения из регистрирующих устройств в компьютеры для его обработки;
  - разбиение полученного изображения на отдельные элементарные фрагменты, причём каждый элементарный фрагмент содержит изображение одного выступа;
  - синхронизацию работы компьютеров и регистрирующих устройств для организации разбраковки в процессе движения ленты;
  - коррекцию элементарного фрагмента изображения путём компенсации неравномерности освещения контролируемой ленты и фокусных искажений фотокамеры, если таковая используется для получения изображения;
  - определение понятия объёма тени от выступа, как суммы разностей между порогом тени и интенсивностей всех элементов изображения выступа, интенсивность которых меньше порога тени;
  - определение допустимого диапазона объёмов теней для выступов, удовлетворяющих допуску по высоте;
  - разбраковку каждого выступа по высоте, согласно объёму его тени на элементарном фрагменте изображения, причём, если объём тени не лежит в допустимого диапазона объёмов теней, то выступ считается бракованным по высоте;
2. Метод, согласно п. 1, в котором цифровое оптических регистрирующее устройство состоит из массива ПЗС и оптической системы и может представлять собой либо цифровой фотоаппараты, либо оптическую приёмная часть объёмного планшетного сканера.



3. Метод, согласно п. 1, в котором цифровые оптических регистрирующих устройства располагаются над плоским участком движущейся металлической ленты.
4. Метод, согласно п. 1, в котором фронт света от источника освещения падает строго перпендикулярно к цепочке локальных выступов.
5. Метод, согласно п. 1, в котором изображение, по крайней мере, одной цепочки с выступами расположено в фокусе цифрового фотоаппарата и ориентировано строго вертикально на дисплее цифрового фотоаппарата, если таковой используется в качестве цифрового оптического регистрирующего устройства.
6. Метод, согласно п. 1, в котором линейка ПЗС расположена перпендикулярно направлению движения ленты с выступами, если в качестве регистрирующего устройства используется приёмная часть объёмного планшетного сканера.
7. Метод, согласно п. 1, в котором разбиение полученного цифровым оптическим регистрирующим устройством изображения на элементарные фрагменты осуществляется в три этапа, включающие:
  - кадрирование фотоснимка, путём выбора той её части, которая расположена в фокусе фотокамеры, если таковая используется в качестве цифрового оптического регистрирующего устройства;
  - разбиение общего изображения на изображения отдельных цепочек выступов по максимумам средних интенсивностей по столбцам
  - разбиение изображения каждой цепочки выступов на элементарные фрагменты по соседним минимумам интенсивностей, расположенным слева и справа от каждого выступа.
8. Метод, согласно п. 1, в котором оптимальный порог тени определяется путём обработки изображений тестовых фрагментов металлической ленты с нанесёнными цепочками выступов, причём используются три тестовых набора: один – удовлетворяет допуску, два – не удовлетворяет допуску.
9. Метод, согласно п. 8, в котором для определения порога тени вычисляются две усреднённые интенсивности изображений цепочек выступов: одна для тестовых фрагментов металлической ленты, удовлетворяющих допуску и вторая для фрагментов ленты не удовлетворяющих допуску.
10. Метод, согласно п. 8, в котором порог тени определяется по точке пересечения двух графиков усреднённых интенсивностей с независимой переменной в виде расстояния от источника света.

11. Метод, согласно п. 1, в котором число цифровых оптических регистрирующих устройств определяется скоростью движения ленты, шириной ленты и производительностью компьютеров.
12. Метод, согласно п. 11, в котором суммарное изображение, составленное из кадрированных изображений от каждой фотокамеры, если таковая используется в качестве цифрового оптического регистрирующего устройства, перекрывает все выступы цепочки по длине ленты в поцесе её движения
13. Метод, согласно п. 11, в котором суммарное изображение, составленное из кадрированных изображений от каждой фотокамеры, если таковая используется в качестве цифрового оптического регистрирующего устройства, перекрывает все цепочки выступов по ширине ленты.
14. Метод, согласно п. 1, в котором частота подачи команд от компьютеров на цифровое оптическое регистрирующее устройство пропорционально скорости движения ленты;
15. Метод, согласно п. 1, в котором высота поднятия цифровой фотокамеры, если таковая используется в качестве цифрового оптического регистрирующего устройства, над поверхностью металлической ленты определяется разрешением фотокамеры и минимальным количеством элементов изображения в изображении отдельного выступа достаточным для получения удовлетворительных результатов процесса разбраковки.
16. Метод, согласно п. 1, в котором исключены посторонние источники света.

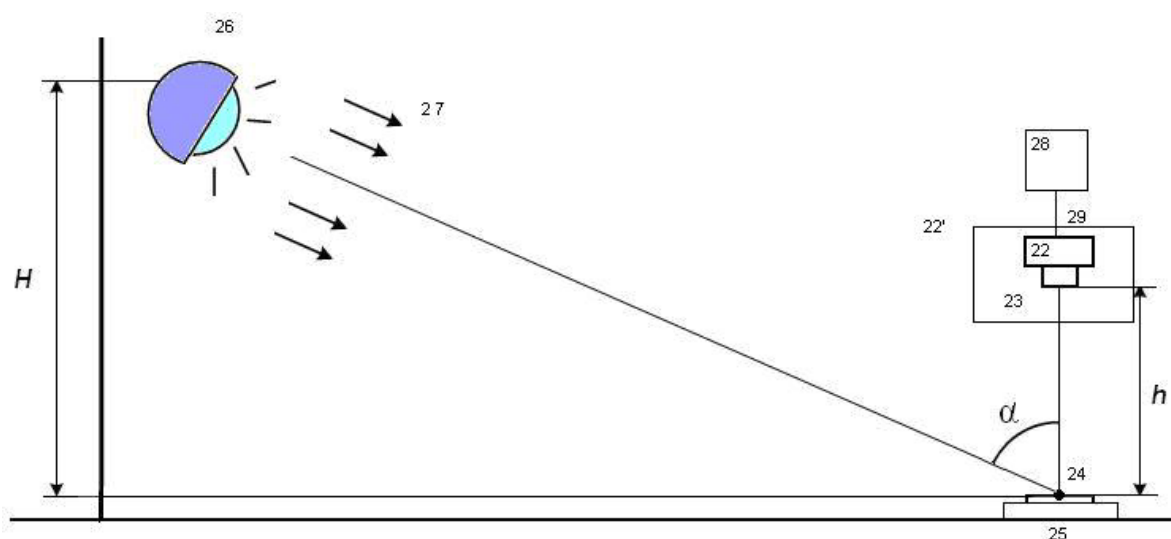


Fig. 4.

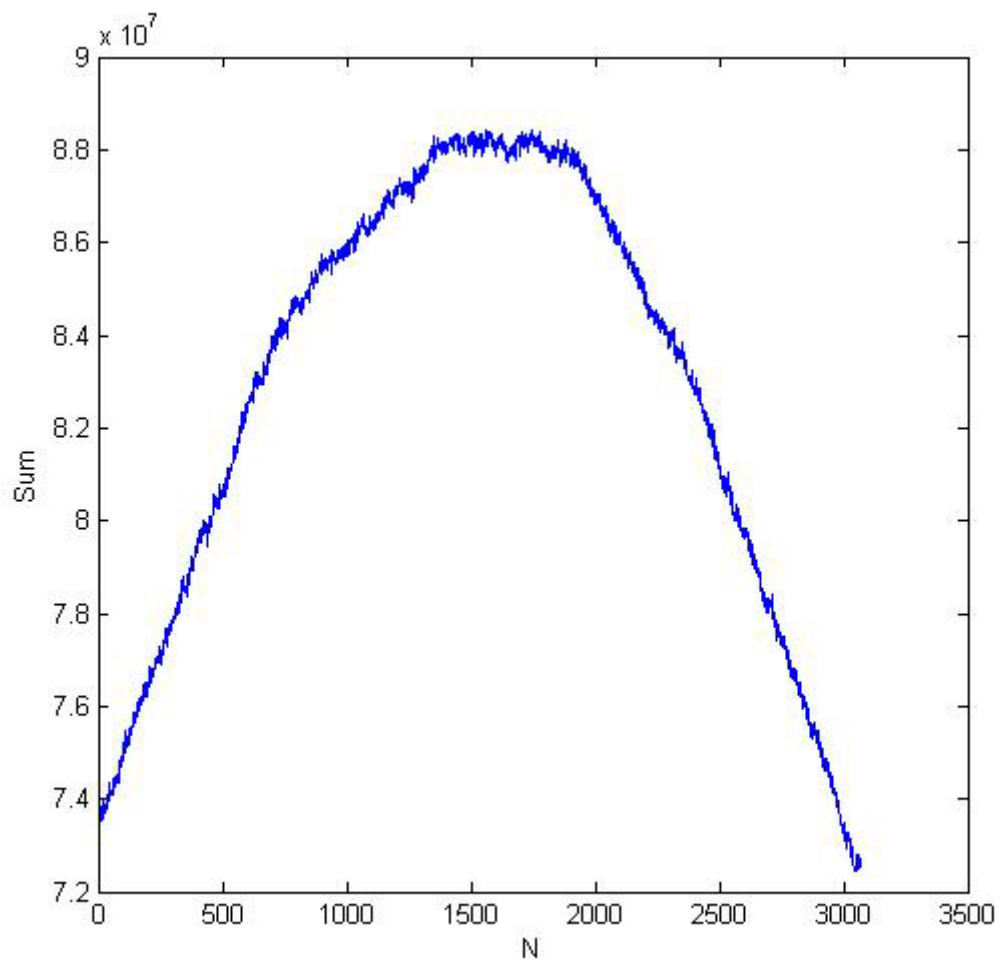


Fig.6

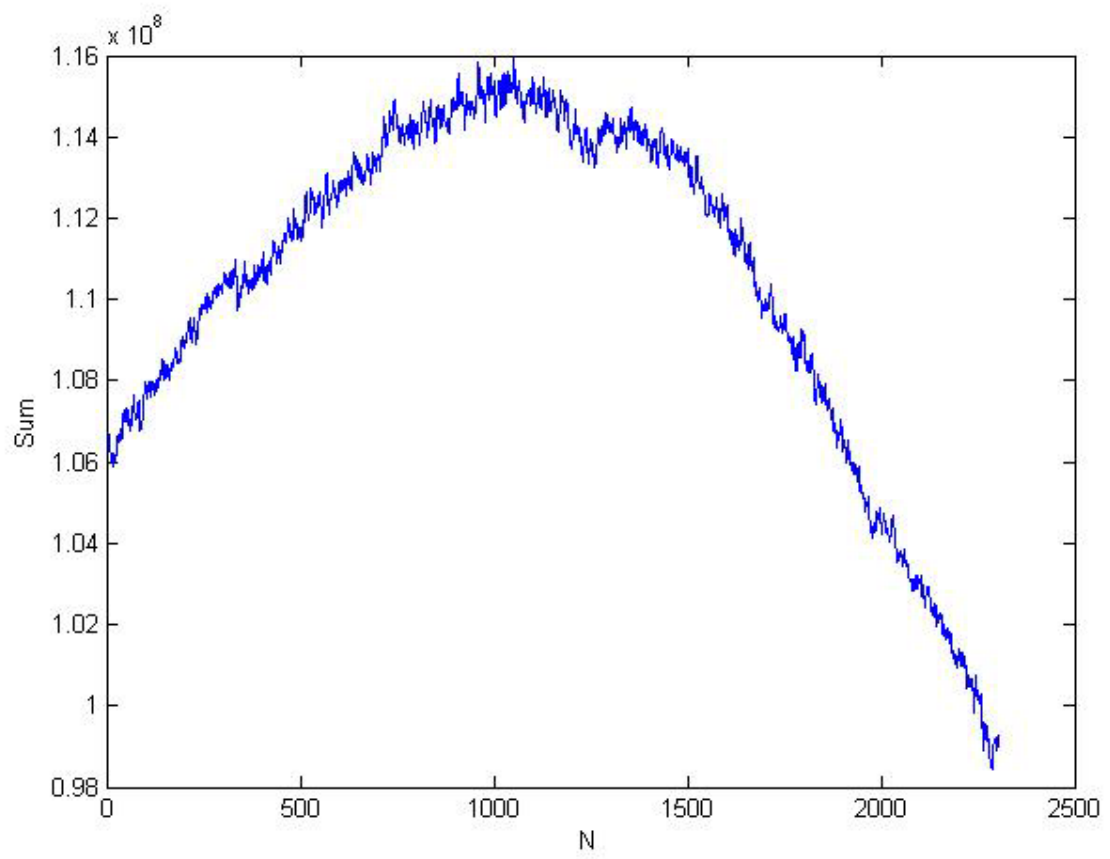


Fig.7

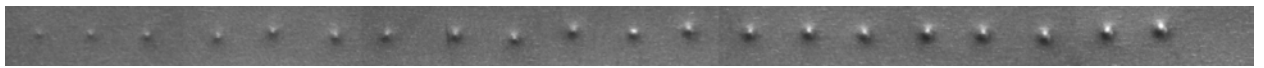


Fig.8

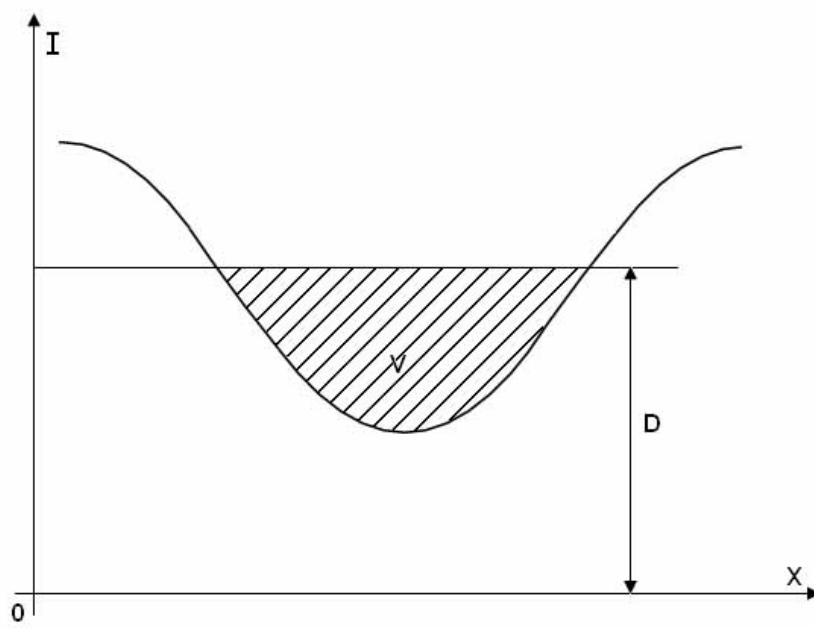


Fig.9

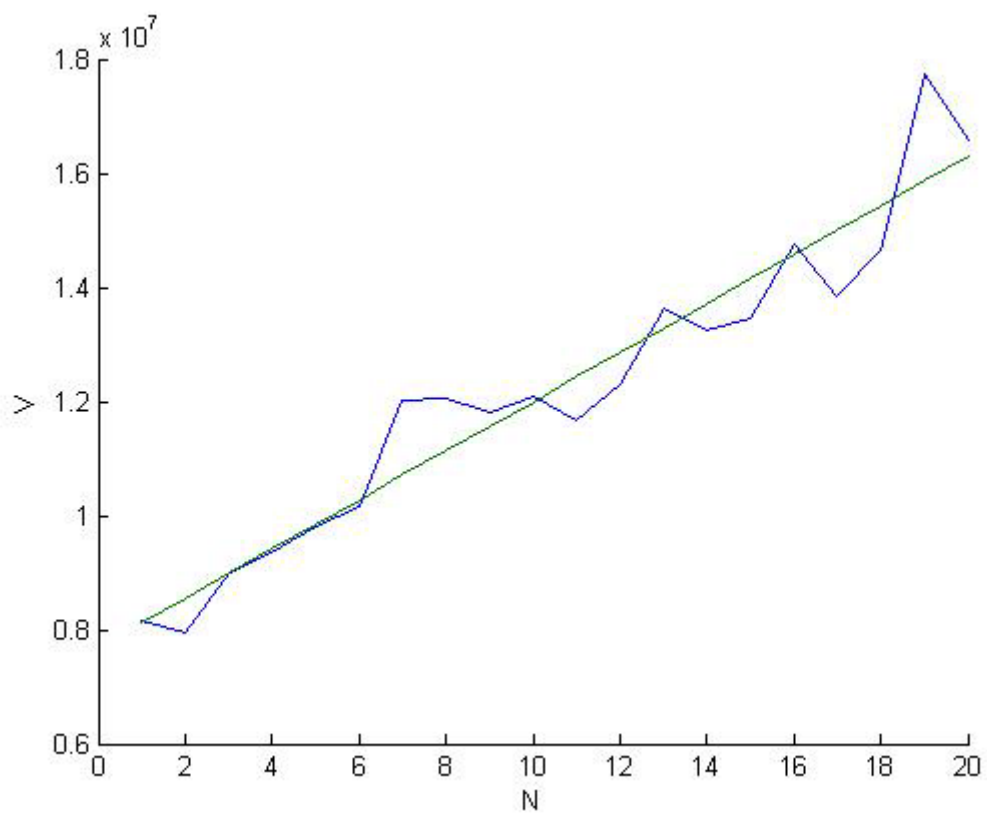


Fig.10

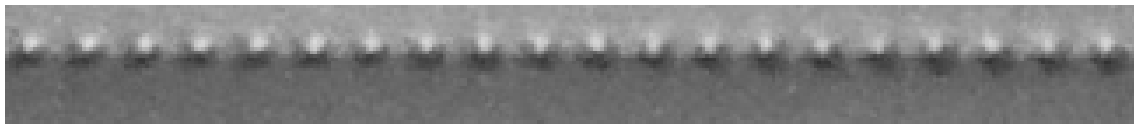


Fig.11



Fig.12

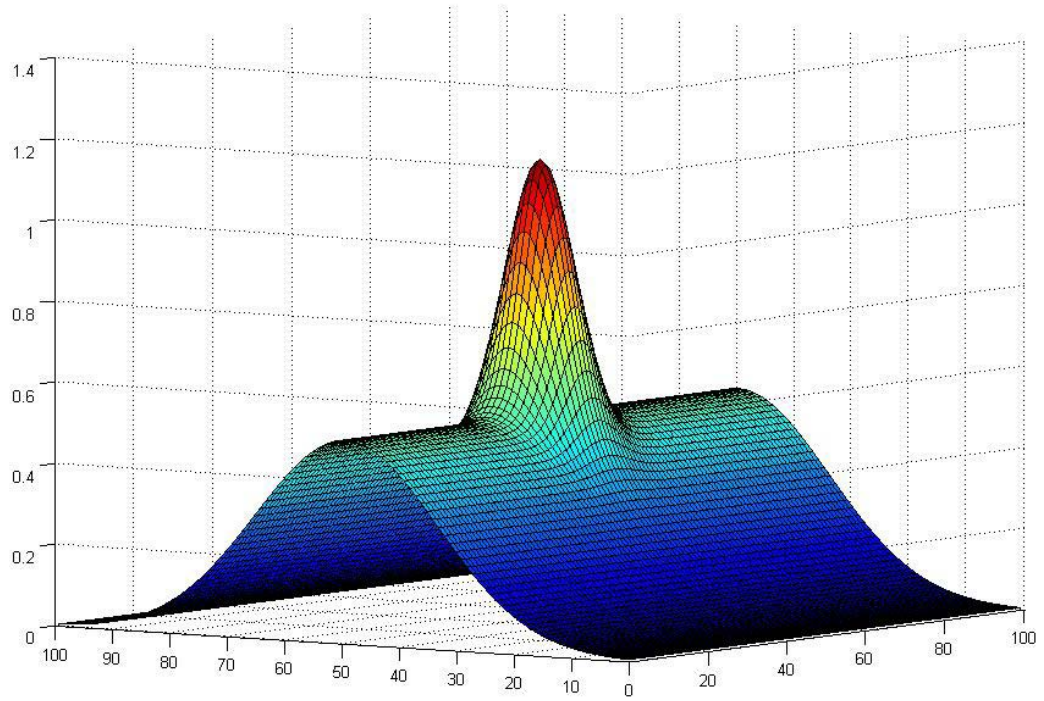
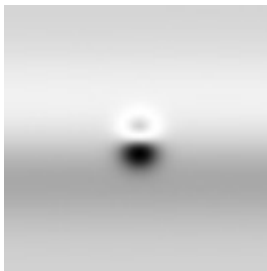
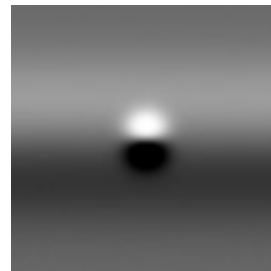


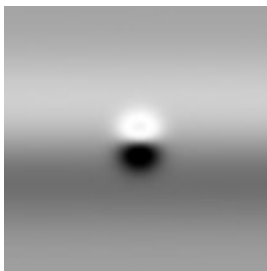
Fig.13



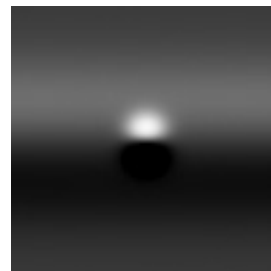
30 degree



c) 60 degree



b) 45 degree



d) 75 degree

Fig. 14

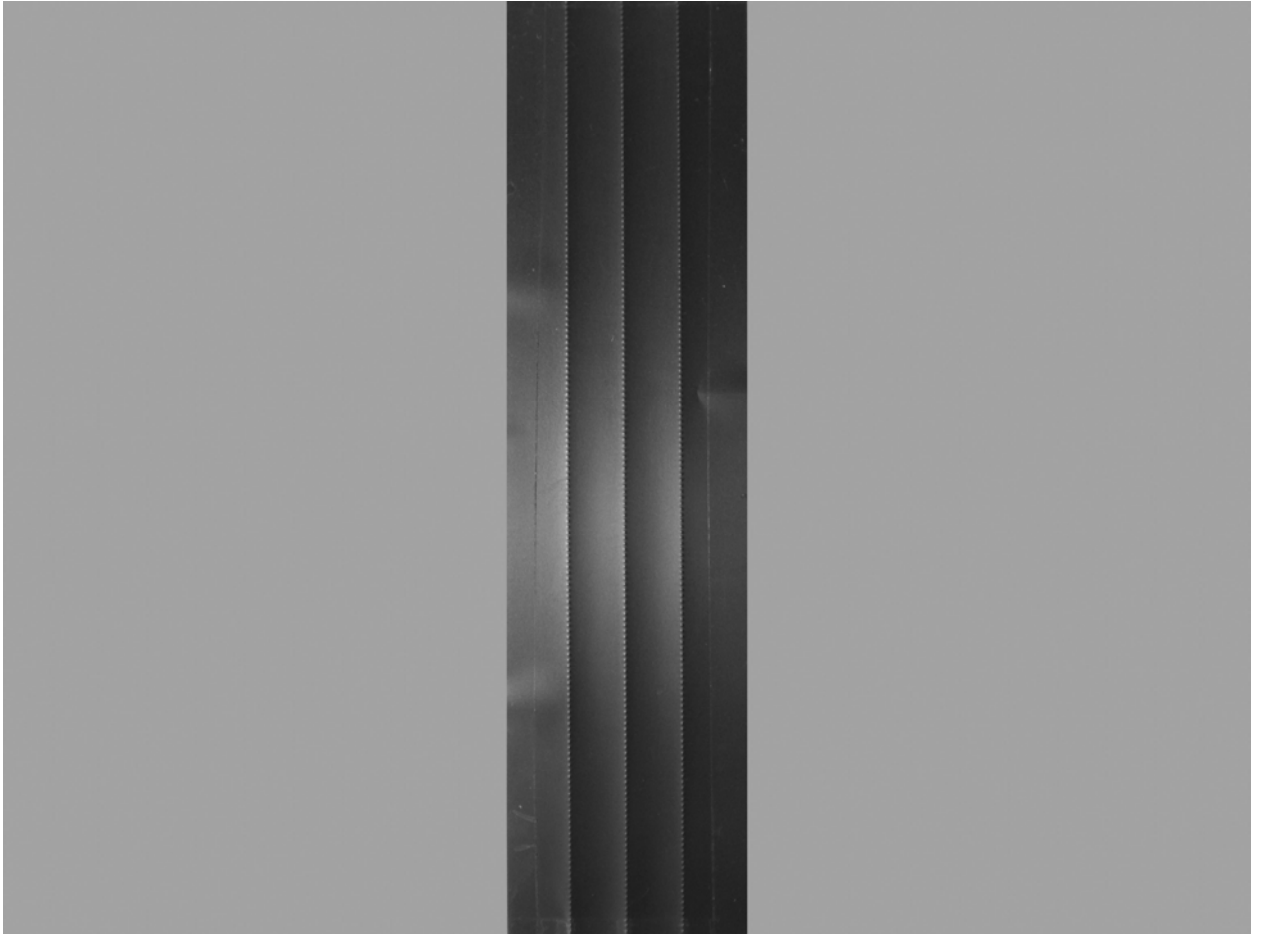


Fig.15

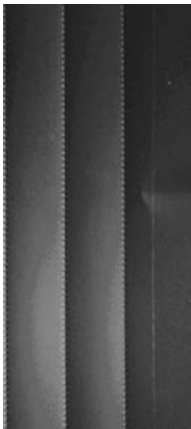


Fig.16

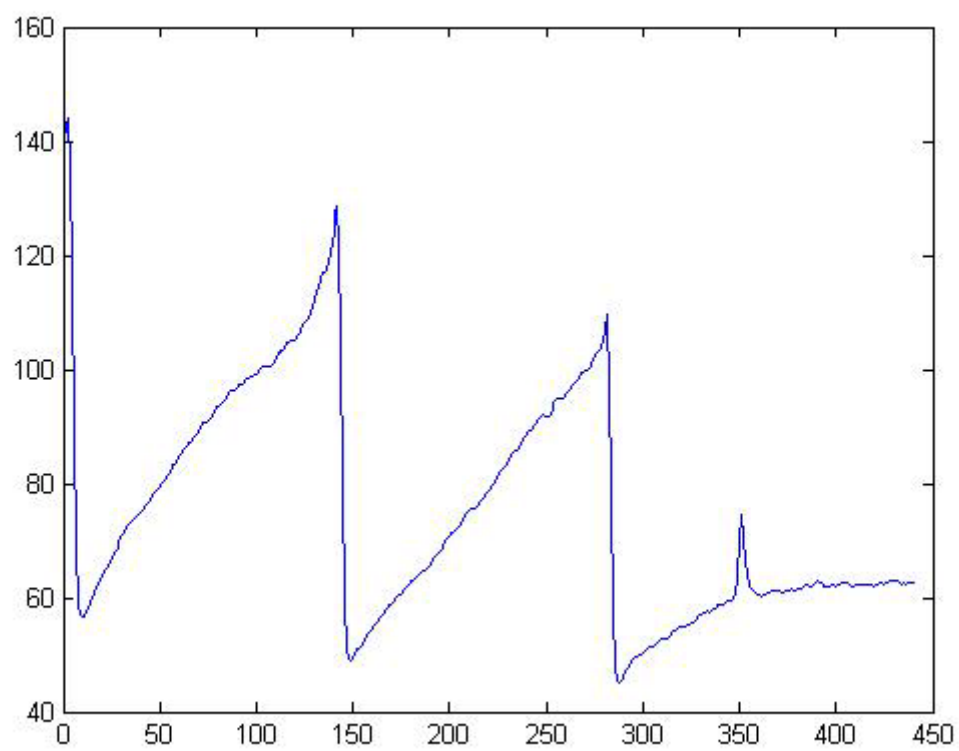


Fig.17

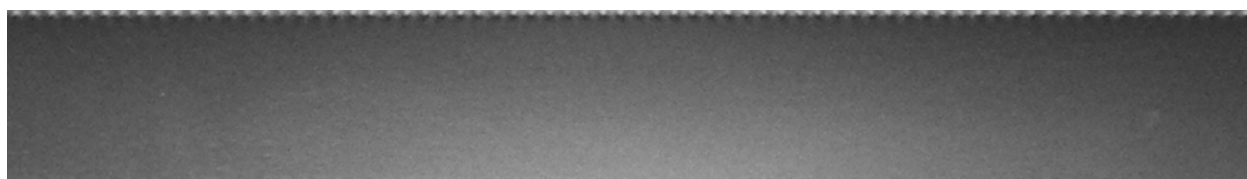


Fig. 18



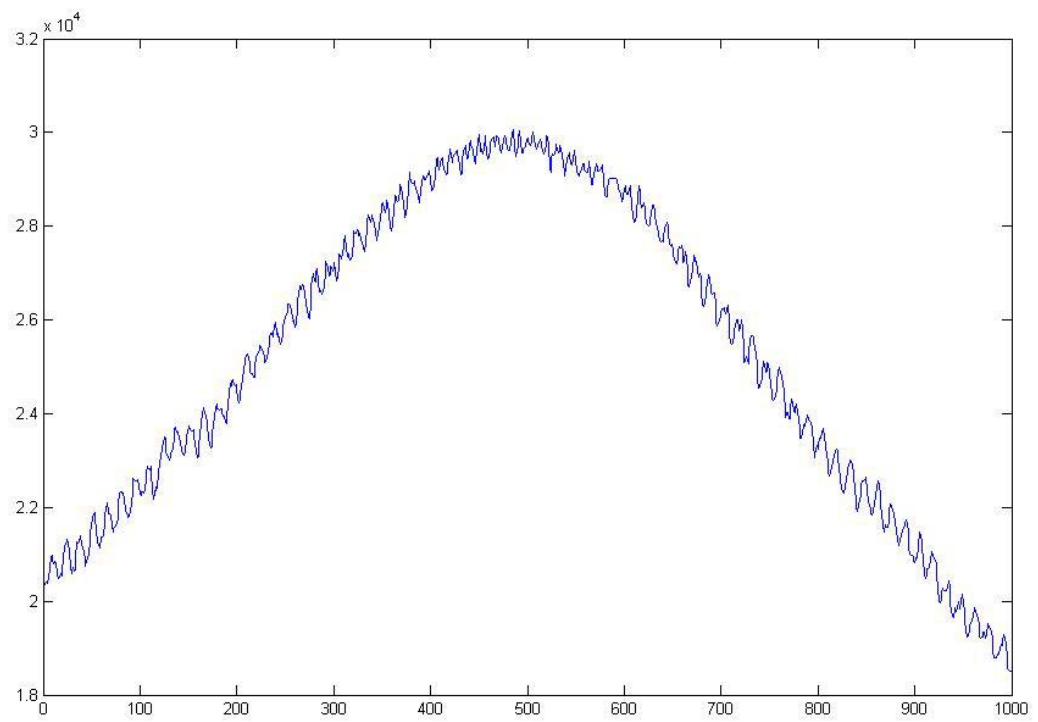


Fig.19

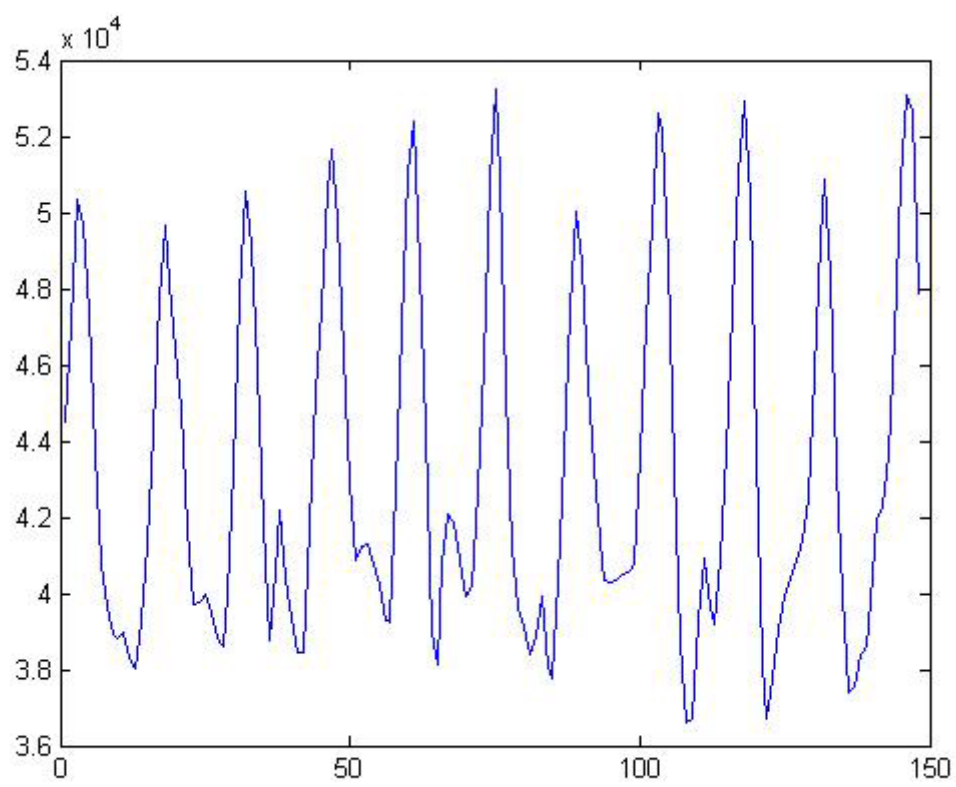


Fig. 20

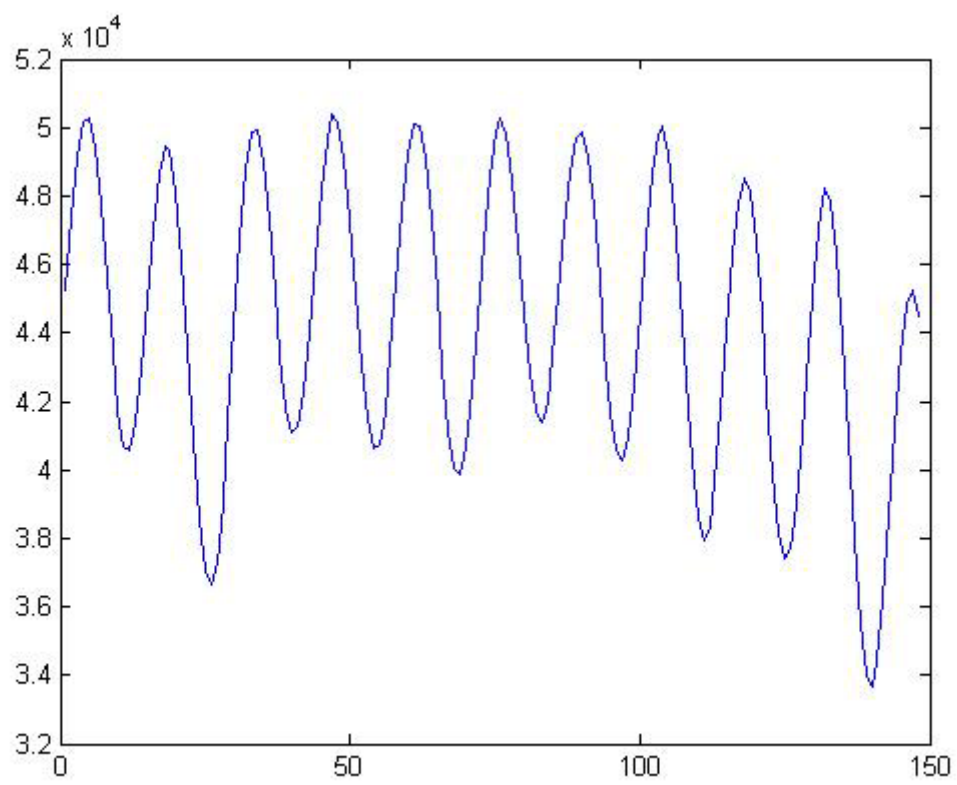


Fig. 21

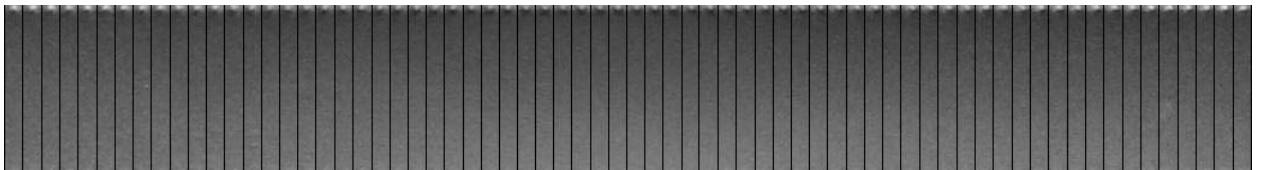


Fig. 22

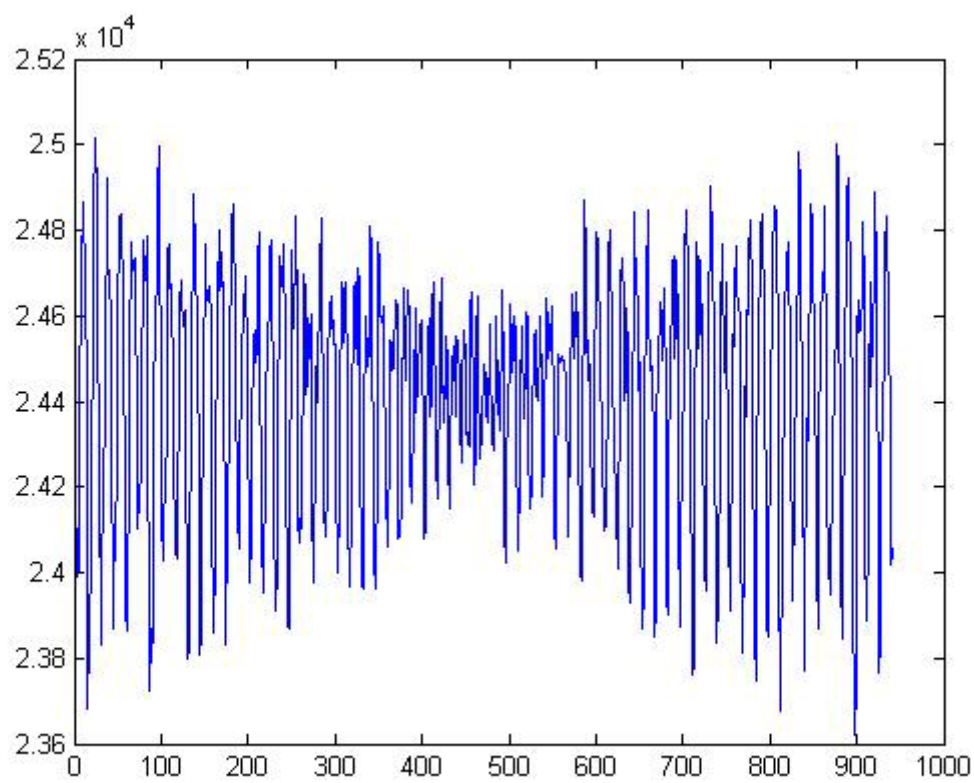


Fig. 23

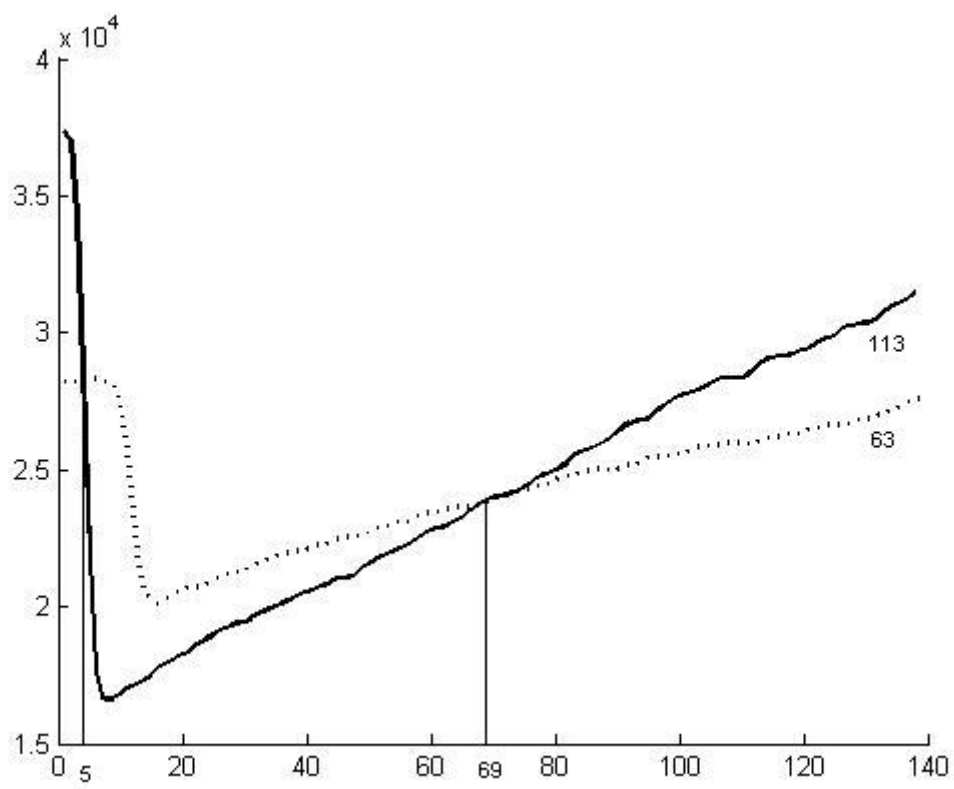


Fig. 24

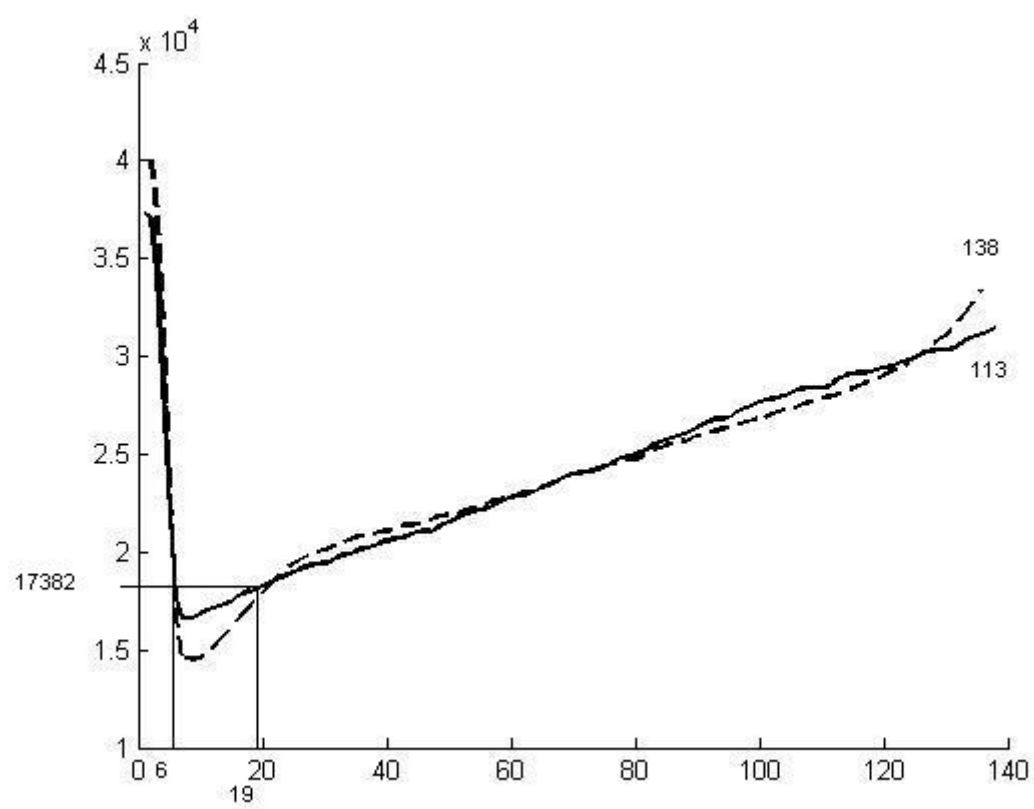


Fig. 25

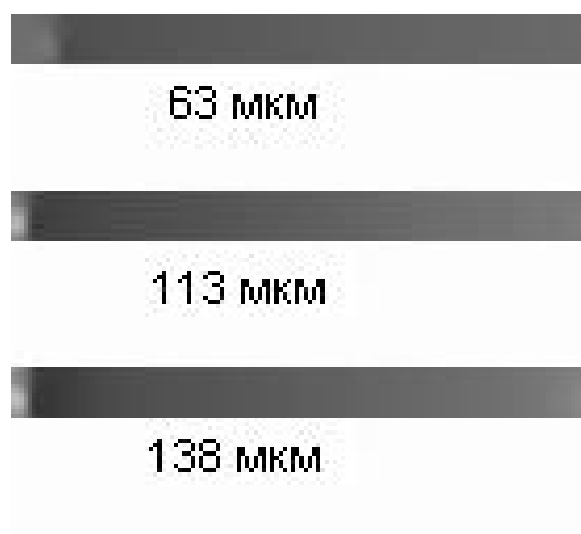


Fig. 26

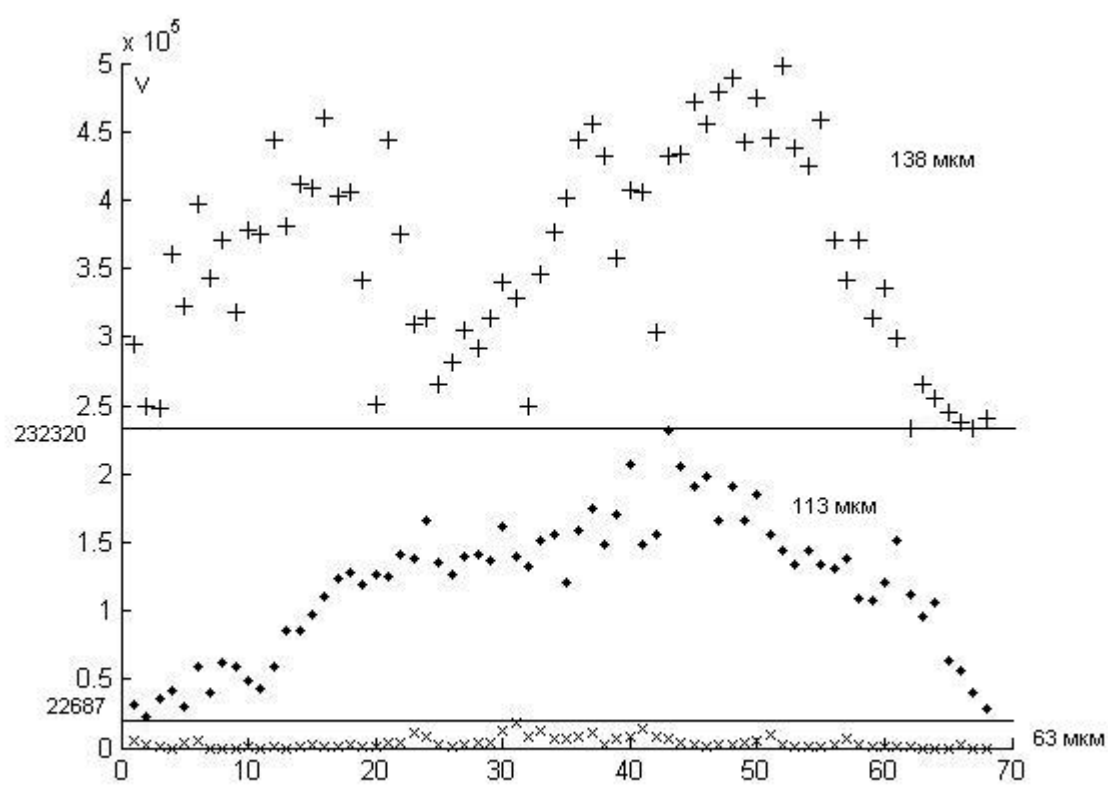


Fig. 27

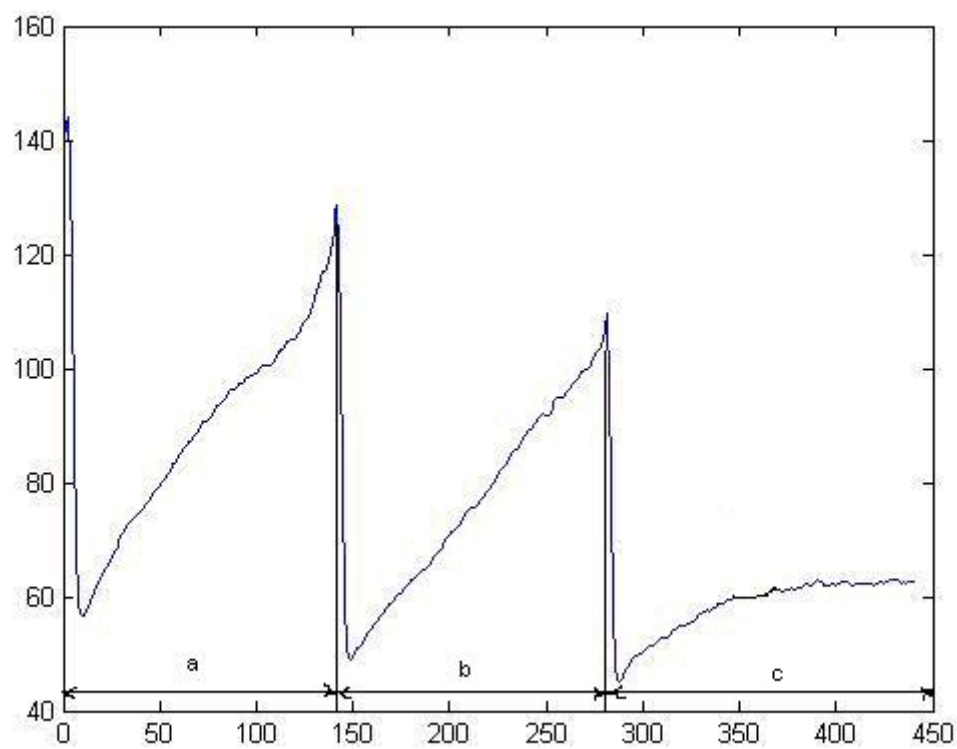


Fig. 28