

На правах рукописи



КУЗЬМИН Михаил Иванович

**Информационно-измерительная система распознавания
поверхностных дефектов листового проката
на основе метода окрестностей**

**Специальность:
05.11.16 – Информационно-измерительные
и управляющие системы (в промышленности и медицине)**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Оренбург – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Оренбургский государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Соловьев Николай Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Логунова Оксана Сергеевна
ФГБОУ ВО «Магнитогорский технический университет им. Г.И. Носова», заведующий кафедрой вычислительной техники и программирования

доктор технических наук, доцент
Котов Владислав Викторович
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», профессор кафедры робототехники и автоматизации производства

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара

Защита диссертации состоится 03 марта 2017 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.288.02 на базе ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» по адресу: 450008, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» и на сайте www.ugatu.su.

Автореферат разослан «___» _____ 20__ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент



А.Ю. Демин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Продукция прокатного производства цветных металлов получила широкое применение на предприятиях авиационной, автомобильной и пищевой промышленности, при этом повышенный интерес вызывает холоднокатаный прокат. Задача оценки качества продукции становится одной из центральных в связи с ростом поверхностных дефектов при переходе к производству тонколистового проката. Для решения этой задачи используются оптико-электронные информационно-измерительные системы (ОЭИИС) обнаружения поверхностных дефектов, по данным которых корректируются входные параметры систем автоматического регулирования прокатных станов для последующего устранения дефектов в процессе производства.

Исследованиям ОЭИИС оценки качества металлопроката посвящены работы российских ученых: Ермакова А.А., Логуновой О.С., Орлова А.А., Пчелинцева Д.О., Трофимов В.Б., Шевченко Н.А., а также зарубежных исследователей *R. Medina, J. Li, G. Wu*. Обобщая результаты исследований, можно сделать вывод о том, что в настоящее время сложилась система методов, моделей и средств оценки качества металлопроката, разработаны общеметодологические принципы их использования, позволяющие решать задачу обнаружения поверхностных дефектов для их устранения в процессе производства готовой продукции за счет изменения входных параметров реверсивных прогонов технологического процесса. Вместе с тем установлено, что число дополнительных реверсных прогонов зависит от типа устраняемого дефекта. Это определяет актуальность проведения исследований в области совершенствования ОЭИИС на основе распознавания поверхностных дефектов тонколистового металлопроката.

Объект исследования – ОЭИИС оценки качества продукции холодной обработки цветных металлов давлением, **предмет исследования** – методы, модели и средства распознавания поверхностных дефектов по изображениям металлопроката.

Цель исследований – разработка оптико-электронной информационно-измерительной системы оценки качества продукции холодной обработки цветных металлов давлением на основе распознавания поверхностных дефектов в процессе производства.

Задачи исследования:

1. Анализ проблем оценки качества готовой продукции холодного тонколистового проката цветных металлов.
2. Разработка модели изображения поверхности листового металлопроката для оценки качества готовой продукции на основе распознавания поверхностных дефектов.
3. Разработка методики формирования изображения листового проката для распознавания поверхностных дефектов и алгоритмов распознавания в реальном масштабе времени.

4. Разработка прототипа ОЭИИС оценки качества готовой продукции холодного тонколистового проката цветных металлов и оценка точности и быстродействия распознавания поверхностных дефектов.

Методы исследования, достоверность и обоснованность результатов.

Теоретические исследования выполнены с использованием теорий информационно-измерительных и управляющих, метрологии, цифровой обработки изображений, методов распознавания и объектно-ориентированного программирования. Экспериментальные исследования проводились на основе метода k-подмножеств. Достоверность научных положений работы обеспечивается обоснованностью принятых ограничений при разработке моделирующего аппарата, сходимостью результатов исследования с экспериментальными данными.

Научная новизна положений, выносимых на защиту:

1) обоснованы классы поверхностных дефектов, имеющие существенные метрологические отличия, выявлены спектральные, геометрические и оптические признаки дефектов и метрики их оценки;

2) разработана модель изображения поверхности проката, отличающаяся от известных представлением изображения в виде пакетов пикселей для увеличения быстродействия алгоритма обнаружения дефектов за счет использования векторных команд процессора и расширенного поля признаков классификации дефектов для повышения точности распознавания;

3) разработана методика обнаружения дефектов, отличающаяся от известных использованием медианного фильтра для подавления помех и бинаризацией матрицы вейвлет-модели изображения по динамическому порогу для формирования области дефектов, сокращающей объем информации при решении задачи распознавания;

4) разработана методика и алгоритмы распознавания поверхностных дефектов, отличающаяся от известных использованием метода окрестностей с векторной индексацией упорядоченного пространства признаков дефектов и бинарным поиском образцов для повышения быстродействия ОЭИИС.

Практическая значимость работы заключается в разработанном программном обеспечении ОЭИИС распознавания поверхностных дефектов листового проката, что подтверждается актом внедрения ООО «Уральский медный прокат» (г. Гай, Оренбургской области), государственной регистрацией 2-х программных продуктов и использованием в учебном процессе ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет».

Апробация полученных результатов. Основные результаты работы прошли апробацию на студенческой научной конференции Оренбургского государственного университета (Оренбург, 2012), Всероссийских научно-практических конференциях «Современные информационные технологии в образовании, науке и практике» (Оренбург 2012, 2014), Всероссийской школеконференции молодых ученых «Управление большими системами» (Уфа, 2013), Всероссийской научно-практической конференции «Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии» (Оренбург, 2013).

Публикации по теме. По результатам диссертационной работы опубликовано 9 печатных работ, в том числе 4 статьи в журналах из Перечня ВАК, две

из которых входят в базу *Scopus*, 4 публикации в сборниках материалов конференций международного и российского уровня, 2 свидетельства о гос. регистрации программы для ЭВМ в Роспатенте.

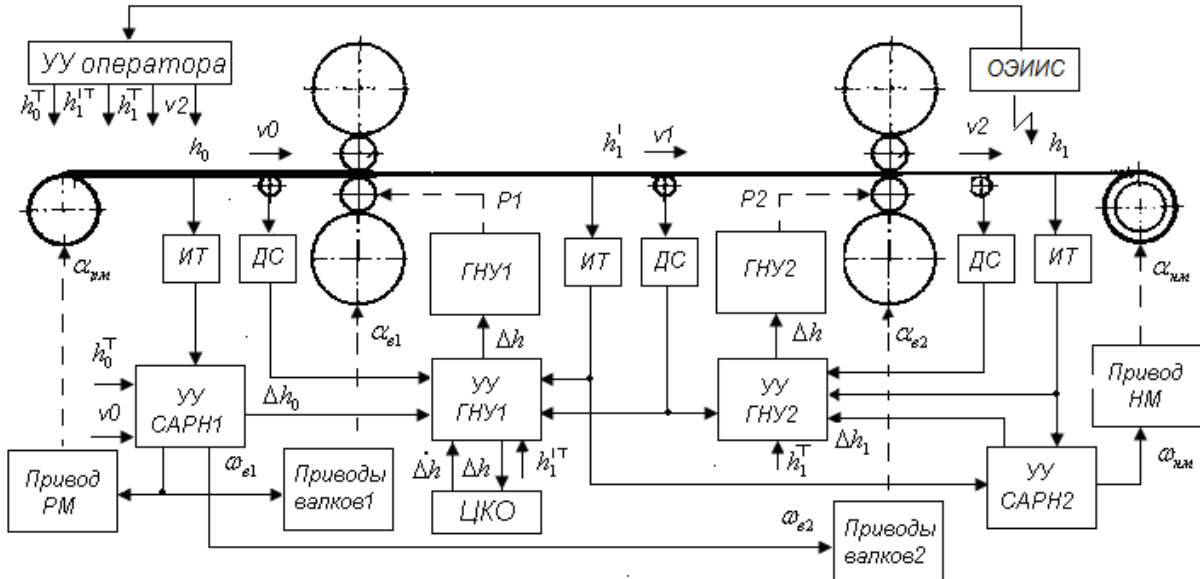
Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, выводов, списка использованных источников, содержащего 120 наименований, и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены обоснование актуальности совершенствования ОЭИИС на основе распознавания поверхностных дефектов тонколистового проката цветных металлов, сформулированы цель и задачи исследования, методы их решения, положения, выносимые на защиту, оценена научная новизна и практическая значимость работы.

В первом разделе приведено решение задачи анализа проблем оценки качества готовой продукции холодного тонколистового проката цветных металлов.

На рисунке 1 представлена система управления стана холодного проката цветного металла «КВАРТО 400 ŠKODA» с ИИС оценки качества готовой продукции, в состав которой входят измерители толщины (ИТ) листа, датчики скорости (ДС) проката и оптикоэлектронная ИИС обнаружения поверхностных дефектов на основе цифровой линейной видеокамеры *BaslerWeb Ral2048*.



УУ – устройство управления
САРН – система автоматического регулирования натяжения
ИТ – измеритель толщины

ДС – датчик скорости
ЦКО – цепь коррекции ошибки
НМ/РМ – намоточно/размоточный механизм
ГНУ – гидронажимное устройство

Рисунок 1 – Система управления двухклеточного стана холодного проката с ОЭИИС обнаружения поверхностных дефектов

Оператор стана при увеличении числа поверхностных дефектов по данным ОЭИИС изменяет входные технологические параметры проката, такие как

скорость проката после второй клетки v_2 , требуемую толщину полосы на выходе клеток h_1^{IT}, h_1^T , что позволяет на последующих технологических операциях реверсного прогона устранить часть дефектов. Однако эксплуатация существующей ОЭИИС показала, что число дополнительных реверсных прогонов зависит от типа устраняемого дефекта. Выдвинута гипотеза о том, что распознавание класса поверхностных дефектов позволит сократить число дополнительных реверсных прогонов проката для их устранения.

Выявлены следующие классы поверхностных дефектов, имеющие существенные метрологические отличия: отверстие, плена, риска, мягость.

Для решения задачи распознавания класса дефектов предложено расширенное пространство метрологических признаков ИИС, представленное на рисунке 2.



Рисунок 2 – Пространство признаков ОЭИИС для задачи распознавания

Определены метрики оценки признаков классификации поверхностных дефектов: периметр P_{def} и площадь S_{def} дефекта; компактность q_{def} ; средние значения (СЗ) и среднеквадратические отклонения яркости в области дефекта (ОД) m, σ , вейвлет-коэффициенты (ВК) w_z^i разложения изображения в ОД, их средние значения mw и среднеквадратические отклонения σw .

На рисунке 3 представлен новый принцип построения ОЭИИС обеспечения качества тонколистового проката цветных металлов, в основе которого лежат два процесса: обнаружение и распознавание дефекта.



Рисунок 3 – Новый принцип построения ОЭИИС оценки качества проката

На основе анализа противоречий между проблемами практики и состоянием теории обнаружения и распознавания поверхностных дефектов тонколистового металлопроката сформулирована цель работы и научные задачи.

Таким образом, обоснованы классы поверхностных дефектов, имеющие существенные метрологические отличия, выделены их спектральные, пространственные и оптические признаки и метрики их использования для решения зада-

чи распознавания.

Второй раздел посвящен разработке модели изображения поверхностности тонколистового проката для задачи классификации дефектов.

В соответствии с принципом совершенствования ОЭИИС на этапе обнаружения дефектов осуществляется вейвлет-преобразование (ВП) изображения проката для фиксации их наличия и формирования области дефектов (ОД).

Для обнаружения дефектов сформированного изображения поверхности проката использована модель случайного двумерного поля в виде суммы двух компонент: стационарного поля (текстурная компонента) и меняющегося поля дефектов. Такое представление хорошо согласуется с вейвлет-моделью изображения I (матрица яркости пикселей $n \times n$) вида

$$I(x, y) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{j,k} \varphi\varphi(x, y) + \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} (w_{1j,k}^{(i)} \varphi\psi_{j,k}^{(i)}(x, y) + w_{2j,k}^{(i)} \psi\varphi_{j,k}^{(i)}(x, y) + w_{3j,k}^{(i)} \psi\psi_{j,k}^{(i)}(x, y)), \quad (1)$$

где $\varphi\varphi(x, y) = \varphi(x)\varphi(y)$, $\varphi\psi(x, y) = \varphi(x)\psi(y)$, $\psi\varphi(x, y) = \psi(x)\varphi(y)$, $\psi\psi(x, y) = \psi(x)\psi(y)$ – комбинация тензорных произведений базисных функций: скейлинг-функции $\varphi(\cdot)$; вейвлет-функции $\psi(\cdot)$ – по координатам пикселей изображения x, y ; $c_{j,k}$ – аппроксимирующие ВК, характеризующие текстурную компоненту изображения; $w_{1j,k}^{(i)}$, $w_{2j,k}^{(i)}$, $w_{3j,k}^{(i)}$ – детализирующие ВК, характеризующие дефекты поверхности по горизонтали LH , вертикали HL и диагонали HH на i -ом уровне ВП.

Современные процессоры позволяют использовать команды для оперирования векторами по 128 бит, то есть по 8 двухбайтных чисел. Для использования векторных команд процессора матрицу сформированного изображения $I(x, y)$ предложено модифицировать в матрицу пакетов пикселей $V_{i,j..k}$.

$$I(x, y) = \begin{bmatrix} V_{1,1..8} & V_{1,9..16} & \dots & V_{1,n-7..n} \\ V_{2,1..8} & V_{2,9..16} & \dots & V_{2,n-7..n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ V_{n,1..8} & V_{n,9..16} & \dots & V_{n,n-7..n} \end{bmatrix}, \text{ где } V_{i,j..k} = [I_{i,j}, I_{i,j+1}, \dots, I_{i,k}]. \quad (2)$$

Отсюда, расчет ВК по строкам можно реализовать в виде

$$c_{i,j..j+7} = ((V_{i,2j..2j+7} + (V_{i,2j..2j+7} \ll 1)) \downarrow) + ((V_{i,2j+8..2j+15} + (V_{i,2j+8..2j+15} \ll 1)) \downarrow \gg 4),$$

$$w_{i,j..j+7} = ((V_{i,2j..2j+7} - (V_{i,2j..2j+7} \ll 1)) \downarrow) + ((V_{i,2j+8..2j+15} - (V_{i,2j+8..2j+15} \ll 1)) \downarrow \gg 4),$$

где \gg , \ll - операции сдвига элементов вектора вправо и влево соответственно на 1 или 4 элемента; \downarrow - обозначает операцию прореживания вдвое; $V_{i,j..j+7} \downarrow = [V_{i,j}, V_{i,j+2}, V_{i,j+4}, V_{i,j+6}, 0, 0, 0, 0]$ - результат прореживания.

Расчет ВК по столбцам реализован в виде $c_{i..k,j} = V_{2i,j..k} + V_{2i+1,j..k}$, $w_{i..k,j} = V_{2i,j..k} - V_{2i+1,j..k}$.

Предложенная модификация вейвлет-модели изображения проката позволит использовать векторные команды процессора для сокращения временных затрат на алгоритм обнаружения дефектов за счет снижения алгоритмической сложности вычислений ВК.

Для решения задачи распознавания дефектов необходимо расширение информационного поля классификации. В дополнение к метрикам спектральных признаков, извлекаемых в процессе ВП изображения: детализирующих ВК w_Z^i , где i – уровень разложения, $1 \leq i \leq 3$, Z – направление преобразования, $Z \in \{LH, HL, HH\}$ и их статистических метрик $mw_{HL}^1, mw_{LH}^1, mw_{HH}^1, \sigma w_{HL}^1, \sigma w_{LH}^1, \sigma w_{HH}^1$, сформировать метрики оптических и пространственных признаков.

Для извлечения пространственных признаков используются метрики $P_{def}, S_{def}, q_{def}$ из матрицы ОД Map , в которой пикселям, принадлежащим дефекту, соответствуют значения равные единице, а пикселям, относящимся к текстурной области – значения, равные нулю.

Для определения оптических признаков используются статистические метрики m, σ на основе обработки матрицы изображения $I(x, y)$.

Отсюда, модель изображения проката для задачи распознавания дефектов принимает вид:

$$u = \left(P_{def}, S_{def}, q_{def}, m, \sigma, mw_{HL}^1, mw_{LH}^1, mw_{HH}^1, mw_{HL}^2, mw_{LH}^2, mw_{HH}^2, mw_{HL}^3, mw_{LH}^3, mw_{HH}^3, \sigma w_{HL}^1, \sigma w_{LH}^1, \sigma w_{HH}^1, \sigma w_{HL}^2, \sigma w_{LH}^2, \sigma w_{HH}^2, \sigma w_{HL}^3, \sigma w_{LH}^3, \sigma w_{HH}^3 \right), \quad (3)$$

Таким образом, разработана модель изображения поверхности проката, отличающаяся представлением изображения проката в виде пакетов пикселей для увеличения быстродействия алгоритма обнаружения дефектов за счет использования векторных команд процессора и расширенным информационным полем классификации дефектов на основе метрик спектральных, пространственных и оптических признаков для повышения достоверности распознавания класса дефекта.

В третьем разделе приведено решение задачи разработки методики использования модернизированной модели изображения и алгоритмов распознавания поверхностных дефектов листового проката в процессе производства.

При использовании линейной видеокамеры изображение для обработки формируется путем накопления строк. Вследствие попадания в экспозицию камеры дублирующих участков при формировании изображения предложено пропускать $k = \frac{l_{pixw}}{dl_{pixl}} - 1$ кадров, где $l_{pixw} = \frac{b}{c}$, $dl_{pixl} = \frac{v}{f}$, b – ширина прокатного листа, c – число пикселей в строке, v – скорость проката, f – частота съемки. Отсюда, время обработки одного изображения из 1024 строк для скорости проката 8 м/с должно быть не более 0,0683 с.

Таким образом, предложенная методика формирования изображения проката с линейной видеокамеры, отличающаяся пропуском части кадров, содержащих дублирующую информацию, позволит ОЭИИС обнаруживать дефекты на потенциально возможных скоростях проката.

На рисунке 4 представлена архитектура ОЭИИС оценки качества проката.

Для подавления шума изображений предлагается медианная фильтрация матриц детализирующих ВК w_Z^i . Отклик медианного фильтра для каждой четверти ВП на каждом уровне разложения вычисляется по зависимости:

$$w_{\Phi Z}^i(x, y) = \text{med}\{w_z^i(x+m, y+n) : m = -1, 0, 1; n = -1, 0, 1\}, \quad (4)$$

где w_z^i - исходные ВК; $w_{\Phi Z}^i$ - ВК после применения фильтра.



Рисунок 4 – Архитектура ОЭИИС оценки качества проката

Для определения элементов матриц, лежащих на границе ОД, предложена бинаризация матрицы детализирующих ВК по динамическому порогу, определяемому по принципу: $w_{BZ}^i(x, y) = \begin{cases} 1, w_z^i(x, y) \geq \text{threshold}^i_Z \\ 0, w_z^i(x, y) < \text{threshold}^i_Z \end{cases}$, с порогом значений ВК

$$\text{threshold}^i_Z = 3 \sqrt{\frac{1}{nw_i^2} \sum_{x=1}^{nw_i} \sum_{y=1}^{nw_i} (w_{\Phi Z}^i(x, y) - mw_{\Phi Z}^i)^2}, \quad \text{где } nw - \text{размерность матриц } w_{BZ}^i,$$

$nw_i = \frac{n}{2^i}$, n – размерность матрицы изображения, $n = 1024$, i – уровень разложения, $1 \leq i \leq 3$, Z – направление преобразования, $Z \in \{LH, HL, HH\}$.

Для формирования ОД первоначально выполняется операция слияния для восстановления границы дефекта на изображении и получения карты дефектов Map :

$$Map(x, y) = \bigcup_{i=1}^3 \bigcup_{Z \in \{LH, HL, HH\}} w_{BZ}^i(x \text{ div } 2^i, y \text{ div } 2^i), \quad (5)$$

В результате формируется матрица, отражающая ОД, в которой границе области соответствуют значения, равные 1.

Для объединения близкорасположенных частей границы дефекта в одну ОД используется операция утолщения границы по следующему правилу: если $Map(x,y)=0$ и существует $Map(x+m,y+n)=1$; $m \in -1,0,1$; $n \in -1,0,1$, то значение $Map(x,y)$ принимается равным 2.

С целью выделения ОД в рамках сформированных границ предложен следующий алгоритм:

1) определяется значение $Map(x,y) \neq 0$;

2) начиная с элемента по п.1, выполняется поиск в ширину для копирования объекта в отдельную матрицу M . На исходной карте дефектов объект при этом заполняется нулевыми значениями (стирается). Матрица M , в которую путем копирования выделяется объект, создается таким образом, чтобы крайние значения в матрице были равны нулю;

3) повторяются действия по пунктам 1 и 2 до тех пор, пока на карте дефектов обнаруживаются элементы $Map(x,y) \neq 0$.

4) отделяется текстурная компонента изображения от ОД.

Для этого от крайнего пикселя $M(0,0)$ выполняется поиск в ширину для значений, равных 0, и их значения переопределяются на 3, что позволяет разграничить пиксели с нулевым значением, расположенные вне ОД и внутри ОД. Последним этапом формирования ОД является разделение границы дефекта и внутренней ОД. Выделение границы осуществляется по следующему принципу: если $M(x,y) \neq 3$ и существует $M(x+m,y+n)=1$; $m \in -1,0,1$; $n \in -1,0,1$, то $M(x,y)$ принимается равным 4. Тогда внутреннюю ОД можно выделить по принципу: если $M(x,y) \neq 3$ и $M(x,y) \neq 4$, то $M(x,y)$ принимается равным 5.

Предложенная методика формирования ОД позволяет исключить текстурную компоненту модели I (1) и определить геометрические признаки дефекта.

Таким образом, разработана методика обнаружения дефекта, отличающаяся использованием медианного фильтра для подавления помех и бинаризацией матрицы ВК модели изображения по динамическому порогу, обеспечивающей пространственное выделение ОД для сокращения объема информации при решении задачи распознавания.

Матрицы Map , I и $w_{\Phi Z}^i$ являются основой расчета метрик признаков дефектов для принятия решений в задаче распознавания.

Для решения задачи распознавания дефектов используется метод окрестностей, который определяет степень выраженности каждого признака в рамках 2^m градаций, где m двоичная метрика, определяющая отображения численных значений признаков на множество $\{0,1,\dots,2^m-1\}$.

Каждый распознаваемый объект (обнаруженный дефект) $u = (u_1, \dots, u_N)$ интерпретируется как точка в гиперпространстве (пространстве признаков)

$$D = \left\{ u \in R^N : -2^{-1} \leq u_i \leq 2^m - 2^{-1}, 1 \leq i \leq N \right\} \quad (6)$$

Распознавание, т.е. указание принадлежности объекта к одному из классов Ω_v , осуществляется на основе принципа прецедентности путем оценки близости объекта к элементам заданного обучающего набора объектов $U = \{u^j\}$, принадлежность которых к классам дефектов известна.

Первым шагом методики распознавания является построение системы окрестностей в пространстве D . Для этого выполняются следующие операции:

1) вводится вспомогательный гиперкуб

$$D_0 = \{u \in R^N : -2^{-1} \leq u_i \leq 2^{m+1} - 2^{-1}, 1 \leq i \leq N\}, \quad (7)$$

и набор отображений

$$g_n(u) = u - h_n, \quad h_n = (2^{n-1}, \dots, 2^{n-1}) \quad (8)$$

порождающих набор образов

$$D_n = g_n(D_0), \quad 1 \leq n \leq m+1, \quad (9)$$

гиперкуба D_0 , каждый из которых включает гиперкуб D , т.е. $D = D \cap D_n, 0 \leq n \leq m+1$.

Вспомогательный гиперкуб D_0 делится на 2^N гиперкубов «первого разбиения» гиперплоскостями, параллельными координатным и проходящими через серединные точки его ребер, ортогональных к этим гиперплоскостям. Каждый из гиперкубов первого разделения разбивается тем же приемом на 2^N гиперкубов второго разделения. Последовательное разбиение продолжается до тех пор, пока не будут построены гиперкубы $m+1$ разбиения с длиной ребра, равной 1. Необходимо отметить, что общее число подкубов 1-го разбиения равно 2^{lN} и длины их ребер равны 2^{m+1-l} .

Предложено для индексации гиперкубов на каждом уровне разбиения использовать вектора значений $r = (r_1, \dots, r_N)$. Для этого необходимо выполнить деление отрезка $[-2^{-1}, 2^{m+1} - 2^{-1}]$ на 2^l равных частей для каждого уровня разбиения l . Тогда для каждого l получится упорядоченное множество отрезков $p_l = \{[a_i, b_i]\}$, где $a_i = -2^{-1} + (i-1) \cdot 2^{(m+1)-l}$, $b_i = -2^{-1} + (i) \cdot 2^{(m+1)-l}, 1 \leq i \leq 2^l$.

В этом случае каждое из ребер любого из подкубов l -го разбиения соответствует одному из отрезков p_l . Вектор значений r для уровня разбиения l формируется по следующему принципу: если ребро гиперкуба, лежащее на оси координат признака u_j , соответствует отрезку $[a_i, b_i]$, тогда $r_j = i$. Отсюда, подкуб l -го разбиения, соответствующий вектору r , будет обозначаться $D_0(l, r)$.

2) отображения g_n из (8), порождающие сдвинутые образы D_n из (9) гиперкуба D_0 из (7), одновременно порождают и образы $D_n(l, r) = g_n(D_0(l, r))$ введенных элементов разбиения этого гиперкуба. Принимается, что $D_0(0, 0) = D_0, g_0(u) = u$ и вводится система окрестностей в пространстве D из (6) как набор непустых пересечений $D(l, r, n) = D \cap D_n(l, r)$, где $0 \leq l \leq m+1, 0 \leq n \leq m+1$.

Полученная система окрестностей позволяет для любого распознаваемого объекта $u = (u_1, \dots, u_n)$ на каждом уровне разбиения l определить соответствующую ему окрестность $D(l, r, 0)$. Для определения соответствующего вектора r предложено: в множестве p_l осуществляется поиск отрезка $[a_i, b_i], 1 \leq i \leq 2^l$, такого, что $u_j \in [a_i, b_i]$ для каждого u_j . В силу упорядоченности множества p_l , нахождение соответствующего отрезка $[a_i, b_i]$ можно выполнить при помощи бинарного поиска. При этом вектор r формируется на основе правила: если $u_j \in [a_i, b_i]$, то $r_j = i$.

Для определения соответствующих окрестностей $D(l, r, n)$ в каждом из отражений n , $1 \leq n \leq m+1$, необходимо выполнить отображение g_n для множества p_l

$$g_n(p_l) = \{[a_i - 2^{n-1}, b_i - 2^{n-1}], 1 \leq i \leq 2^l\} \quad (10)$$

После этого вектор r формируется аналогично случаю $n = 0$, за исключением того, что поиск отрезков осуществляется в отображении $g_n(p_l)$.

Разработана методика обучения классификатора на основе метода окрестностей, которая сводится к построению на основе набора образцов U для каждого уровня разбиения l , $0 \leq l \leq m+1$ и номера отображения n , $0 \leq n \leq m+1$ списка $List(l, n)$, содержащего объекты $\{r, \Omega_v\}$, упорядоченные по векторам r .

При этом для векторов r^1 и r^2 принимается, что $r^1 = r^2$, если $r_i^1 = r_i^2, 1 \leq i \leq N$ и $r_i^1 < r_i^2$, если $\exists i: r_i^1 < r_i^2, 1 \leq i \leq N, \forall j < i, r_j^1 = r_j^2$.

На основе методики обучения классификатора разработан алгоритм обучения, представленный на рисунке 5.

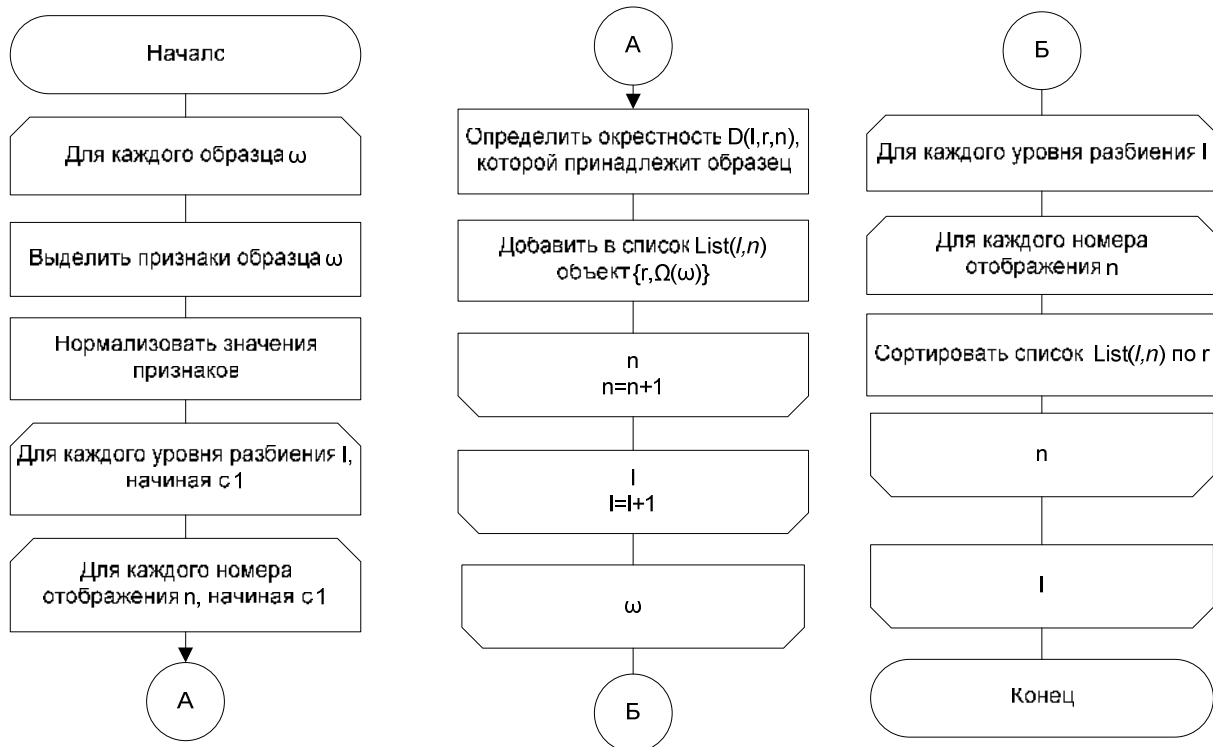


Рисунок 5 – Алгоритм обучения классификатора

Степень близости $L(u, u^j)$ объектов u и u^j характеризуется максимальным значением номера разбиения l , $1 \leq l \leq m+1$, при котором существует некоторая окрестность $D(l, r, n)$, охватывающая данные объекты

$$L(u, u^j) = \max\{l : (\exists r, n), u, u^j \in D(l, r, n)\}. \quad (11)$$

Для распознавания объекта следует:

1) найти максимальный уровень разбиения l , для которого существуют окрестности $D(l, z, n)$, охватывающие узлы, соответствующие распознаваемому объекту и не менее чем s образцов (экспериментально установлено $s = 3$). Данный уровень разбиения обозначается, как $\tau(u)$.

2) определить параметры распознавания:

$\mu(u)$ - количество образцов, принадлежащих тем же окрестностям $D(l,z,n)$, которым принадлежит и распознаваемый объект;

$\mu_v(u), 1 \leq v \leq q$ - количество образцов, принадлежащих тем же окрестностям $D(l,z,n)$, которым принадлежит и распознаваемый объект, и относящихся к классу объектов Ω_v .

$\gamma_v = \frac{\mu_v(u)}{\mu(u)}$ - доля образцов, принадлежащих тем же окрестностям $D(l,z,n)$, кото-

рым принадлежит и распознаваемый объект, и относящихся к классу объектов Ω_v .

3) определить класс объекта на основе порогового решающего правила. В работе эмпирическим путем подобрано следующее пороговое правило: экспериментально установлено – объект ω относится к классу объектов Ω_v , если $\tau(u) \geq m-2$ и $\gamma_v > 0.7$.

На основе методики распознавания разработан алгоритм (рис. 6).

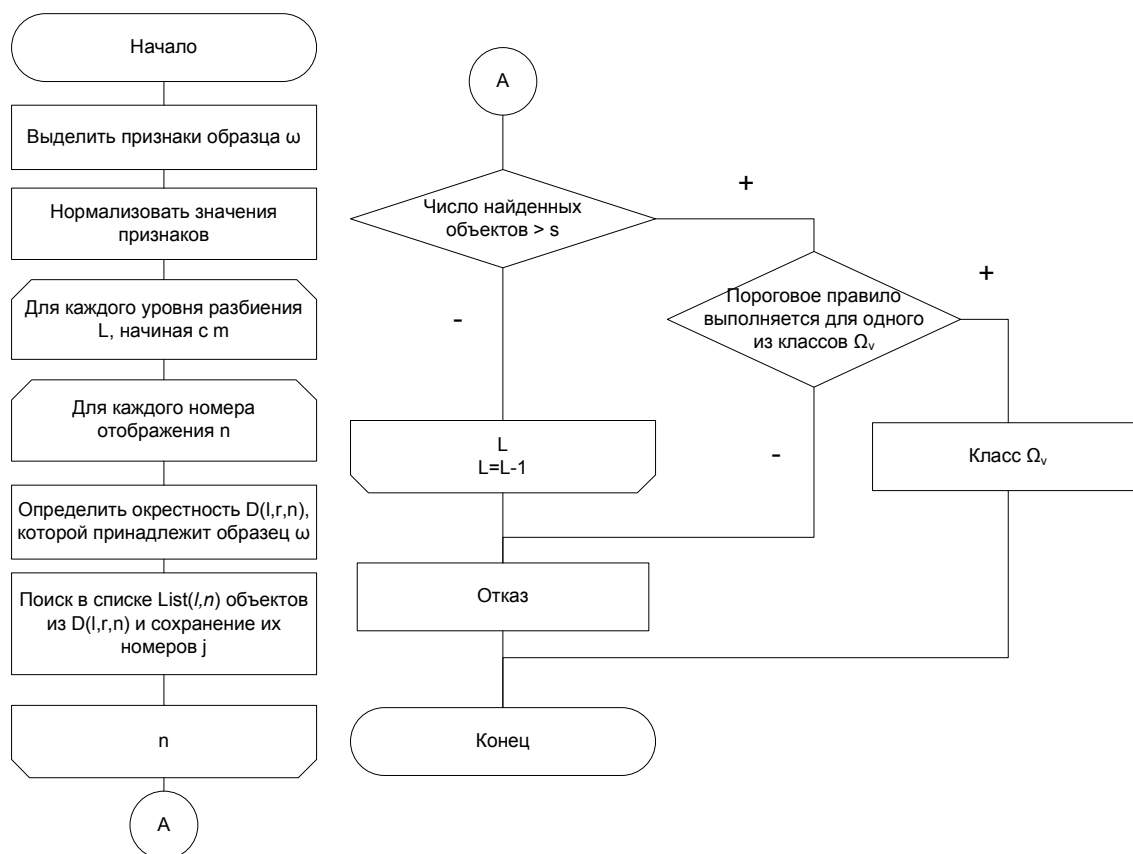


Рисунок 6 – Алгоритм распознавания дефектов

Вследствие того, что каждый из списков $List(l,n)$ является упорядоченным, в качестве метода нахождения образцов дефектов, принадлежащих соответствующим окрестностям, предложен бинарный поиск.

Таким образом, разработана методика и алгоритмы распознавания поверхностных дефектов листового проката в процессе производства, отличающаяся использованием метода окрестностей с векторной индексацией упорядо-

ченного пространства признаков дефектов и бинарным поиском образцов для повышения быстродействия алгоритма распознавания.

В четвертом разделе изложено решение задачи технической реализации прототипа ОЭИИС распознавания поверхностных дефектов листового проката с экспериментальной оценкой ее точности и быстродействия.

Схема взаимодействия модулей программной системы распознавания поверхностных дефектов листового проката представлена на рисунке 7.

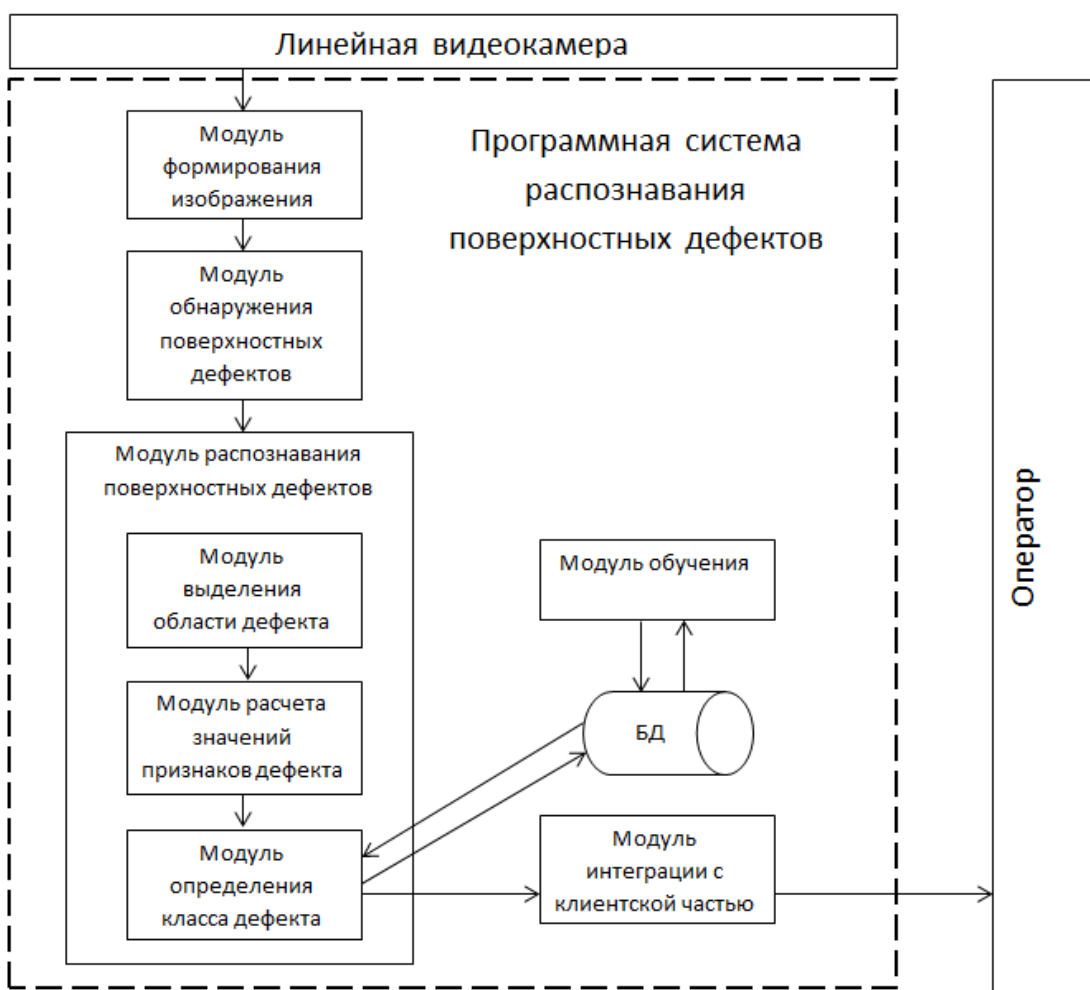


Рисунок 7 – Схема взаимодействия модулей программной системы распознавания поверхностных дефектов листового проката

Для хранения информации о классах дефектов, реализован проект базы данных, включающий 8 связанных таблиц, нормализованных до 3-ей нормальной формы с обеспечением целостности на основе ключевых реквизитов.

Оценка погрешности измерения метрик распознавания проведена на основе сравнения результатов эталонных измерений дефектов с матричной камерой *Canon PowerShot SX 530 HS* (статичное оцифрованное изображение) и измерений с линейной камерой *Basler Web Ral 2048gm* (в динамике проката). Суммарные (систематическая и случайная) относительные погрешности ОЭИИС свидетельствуют о возможности их использования в задаче распознавания.

Оценка предложенных техническим решением ОЭИИС проводилась на основе имитационного эксперимента с использованием метода k -подмножеств. В результате каждого запуска ОЭИИС фиксировались: средние значения ошибок 1-го (α) и 2-го рода (β), меры полноты (p) и точности (r), оценка качества классификации (F). Результаты эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты эксперимента

Класс дефекта	α	β	p	R	F -мера
Отверстие	0,1602	0,0031	0,8398	0,9886	0,9081
Плена	0,1861	0,0147	0,8139	0,9543	0,8785
Мятость	0,0884	0,0095	0,9116	0,9703	0,9401
Царапина	0,2487	0,0046	0,7513	0,9797	0,8504

Временные оценки основных этапов алгоритма распознавания: обнаружение дефекта – 0,012 с., выделение областей дефектов – 0,0045 с, расчет признаков дефектов – 0,0006 с., распознавание класса дефектов – 0,0029. Отсюда, среднее время работы ОЭИИС распознавания дефектов составляет 0,02 с., что на 95 % ниже требуемого для скорости проката 8 м/с.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований разработанной ОЭИИС с распознаванием поверхностных дефектов свидетельствуют о достаточном быстродействии средств оценки качества тонколистового металлопроката в процессе производства с точностью распознавания на уровне аналогов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Определены технологические параметры процесса металлопроката, влияющие на качество готовой продукции. Установлено возникновение поверхностных дефектов при переходе к тонколистовому прокату, обоснованы классы поверхностных дефектов, имеющие существенные метрологические отличия, и определены их признаки (спектральные, геометрические и оптические) и метрики измерения. Предложен принцип совершенствования ОЭИИС оценки качества листового проката цветных металлов на основе распознавания.

2. Модернизирована вейвлет-модель изображения проката для использования векторного процессора, обеспечивающая сокращение времени расчета спектральных признаков дефектов. Предложена модель дефекта для распознавания в виде вектора признаков, отличающаяся использованием в дополнение к спектральным признакам вейвлет-разложения изображения геометрических и оптических признаков обнаруженного дефекта.

3. Предложена методика формирования изображения путем накопления строк пикселей (кадров), полученных с линейной видеокамеры, отличающаяся пропуском строк пикселей, содержащих дублирующую информацию. Определено предельно допустимое время обработки одного кадра для обеспечения работы ОЭИИС в реальном масштабе времени. Предложена методика идентификации поверхностных дефектов по изображению проката и

определить его пространственные характеристики, отличающаяся использованием медианного фильтра для устранения шумов и бинаризации по динамическому порогу, а также выделением каждого обнаруженного дефекта в отдельную матрицу, что позволяет сократить время на расчет признаков дефектов. Разработан алгоритм распознавания поверхностных дефектов листового проката в процессе производства, отличающийся использованием метода окрестностей с векторной индексацией пространства признаков дефектов для повышения быстродействия распознавания.

4. Полученные погрешности являются допустимыми при использовании метрик для распознавания поверхностных дефектов. Разработана ОЭИИС распознавания поверхностных дефектов, обеспечивающая распознавание дефектов класса «отверстие» с погрешностью 16%, «плена» – 19%, «мятость» – 9%, царапина – 25%. Среднее время распознавания составляет 20 мс и является достаточным для работы при скоростях проката до 8 м/с.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

- в рецензируемых научных журналах из Перечня ВАК:

1. Кузьмин, М.И. Идентификация поверхностных дефектов листового проката методом вейвлет-анализа изображений с управляемым разрешением / Н.А. Соловьев, Д.А. Лесовой, М.И. Кузьмин // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2013. – №1(3). – С. 84 – 91.

2. *Kuzmin, M.I.* Распознавание поверхностных дефектов листового проката на основе метода окрестностей. *Recognition of surface defects of cold-rolling sheets based on method of localities /Gergel V.P., Kuzmin M.I., Solovyov N.A., Grishagin V.A. //International Review of Automatic Control.* – 2015. – Vol.8, № 1. – P. 51 – 55.

3. Кузьмин, М.И. Программное обеспечение системы распознавания поверхностных дефектов проката цветных металлов / М.И. Кузьмин, Н.А. Соловьев, Л.А. Юркевская // Современные наукоемкие технологии. –2016. – № 5, Ч. 1. – С. 46 – 51.

4. *Kuzmin, M.I.* Система компьютерного зрения для оценки качества продукции холодного проката. *System of Computer Vision for Cold-Rolled Metal Quality Control / V. I. Batischev, M.I. Kuzmin, A.M. Pischukhin, N.A. Solovyov // International Review of Automatic Control.* –2016. – Vol. 9, №. 4. – P. 259-263.

- свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

5. Св.-во гос. рег. прогр. для ЭВМ № 2013612245, Российская Федерация. Программа идентификации поверхностных дефектов по изображениям цифрового видеопотока холоднокатанного листового проката в реальном времени «*Defect Detector for Cold-Rolling Mill*» / М.И. Кузьмин, Н.А. Соловьев, Д.А. Лесовой.– № 2012661665; дата поступления 27.12.2012; дата регистр. в Реестре программ для ЭВМ 19.02.2013 г. - Оpubл. 20.03.2013 г., Эл.бюл.№ 1.

6. Св.-во гос. рег. прогр. для ЭВМ № 2016612832, Российская Федерация. Программа распознавания поверхностных дефектов листового проката на основе метода окрестностей / М.И. Кузьмин, Н.А. Соловьев.– № 2016610177; дата

поступления 12.01.2016; дата регистр. в Реестре программ для ЭВМ 10.03.2016 г. - Оpubл. 20.04.2016 г., Эл.бюл.№ 4.

- прочие публикации:

7. Кузьмин, М.И. Автоматизация обнаружения поверхностных дефектов листового проката / М.И. Кузьмин, Н.А. Соловьев // Перспектива. Сборник статей молодых ученых №15. – Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2012. – С. 502-505.

8. Кузьмин, М.И. Алгоритм фильтрации вейвлет-коэффициентов изображений поверхностных дефектов в реальном времени на основе векторных команд процессора / М.И. Кузьмин, Н.А. Соловьев // Современные информационные технологии в образовании, науке и практике: материалы X Всероссийской научно-практической конференции. – Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2012. – С. 74-77.

9. Кузьмин, М.И. Систематизация методов моделирования изображений для распознавания поверхностных дефектов листового проката/ М.И. Кузьмин // Управление большими системами: материалы X Всероссийской школы-конференции молодых ученых. Т. 3. – Уфа: УГАТУ, 2013. – С. 149-152

10. Кузьмин, М.И. Метрологическое обеспечение выделения областей дефектов для дальнейшего распознавания / М.И. Кузьмин, Н.А. Соловьев // Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции – Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2013. – С. 152-156

11. Кузьмин, М.И. Особенности распознавания поверхностных дефектов листового проката на основе метода окрестностей / М.И. Кузьмин, Н.А. Соловьев // Современные информационные технологии в образовании, науке и практике: материалы XI Всероссийской научно-практической конференции. – Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2014. – С. 38-40

Диссертант



Кузьмин М.И.

КУЗЬМИН Михаил Иванович

Информационно-измерительная система распознавания
поверхностных дефектов листового проката
на основе метода окрестностей

Специальность:
05.11.16 – Информационно-измерительные
и управляющие системы (в промышленности и медицине)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 28.12.2016 г. Формат 60x84¹/₁₆,
бумага офсетная, гарнитура «Таймс».
Усл. печ. листов 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 194.

Участок оперативной полиграфии ОГУ
460018, г. Оренбург, пр-т Победы 13,
Оренбургский государственный университет
