

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Московский государственный университет
дизайна и технологии»

На правах рукописи

Муртазина Альфия Рустямовна

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ВЕРХА
ОБУВИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ
ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ**

Специальность 05.19.05-
«Технология кожи, меха, обувных и кожевенно -
галантерейных изделий»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
доцент Разин И.Б.

Москва – 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....	11
1.1. Основные модули и функциональные возможности САПР легкой промышленности.....	11
1.2. Анализ устройств ввода графической информации в САПР легкой промышленности.....	37
ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ.....	46
2. РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ МОДУЛЯ «ОЦИФРОВКА».....	47
2.1. Особенности векторизации чертежей конструкций верха обуви с использованием средств технического зрения	47
2.2. Экспериментальная векторизация чертежей конструкций верха обуви с использованием цифрового фотоаппарата и сканера.....	60
2.3. Способ сохранения информации о векторном представлении чертежей конструкций верха обуви	78
ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ.....	85
3. РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ МОДУЛЯ «ПРОЕКТИРОВАНИЕ».....	86
3.1. Технологические преобразования конструктивной основы параметрическими кривыми	86
3.2. Описание шаблонов деталей верха обуви параметрическими кривыми	111
3.3. Способ интеграции в модуль «Раскладка» информации о шаблонах деталей обуви.....	133
ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ.....	140
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СРЕДСТВ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ В САПР ОБУВИ.....	141
4.1. Векторизация чертежей грунт-моделей и конструкций обуви	141

4.2. Концепция использования в обувном производстве открытых программ 3D моделирования.....	157
4.3. Экономическая эффективность применения средств технического зрения в производстве обуви	166
ВЫВОДЫ ПО ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ.....	167
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ	168
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	170
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	180
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	182
ПРИЛОЖЕНИЕ С.....	184
ПРИЛОЖЕНИЕ D.....	186
ПРИЛОЖЕНИЕ E.....	194
ПРИЛОЖЕНИЕ F.....	196
ПРИЛОЖЕНИЕ G.....	202

Введение

Актуальность темы. Обувная промышленность ежегодно поставляет товары миллионам людей по всему миру, и удовлетворение потребностей каждого покупателя является важнейшей целью отрасли. Предприятия этой сферы производят разнообразные конструкции повседневной обуви для мужчин, женщин, детей, а также ортопедической, зимней, демисезонной, специальной, спортивной, производственной и др. Изготовители стремятся удовлетворить большинство потребителей комфортной, высококачественной обувью. В последние годы эта тенденция нарастает в связи с расширением международной торговли, усилением конкуренции, изменением потребительского спроса. Увеличение численности населения и развивающаяся розничная Интернет-торговля также обусловили повышение спроса на мировом рынке в целом и рынке обуви, в частности. В то же время, усугубление экологических проблем, рост цен на сырье, экономический кризис, избирательность потребителей выступают в качестве ограничений на рынке обуви. В этих условиях производителям необходимо представить изделия в широком ассортименте. Основные стратегии дифференциации, позволяющие достичь конкурентного преимущества, включают в себя дизайн продукта, качество, имидж фирмы, цену, маркетинг и продвижение, поддержку и обслуживание клиентов, способность удовлетворять обязательства доставки для розничной торговли. Процесс разработки новых коллекций и доставка их клиенту требует определенных временных затрат, сокращение продолжительности которых позволяет быстро реагировать на тенденции спроса и создавать конкурентоспособную обувь. Время на создание готового изделия и его реализацию можно минимизировать путем:

- размещения производства в России или создания закупочных союзов;
- организации продаж через Интернет;
- интеграции новых технологий в производственный процесс.

Сокращение сроков поставки за счет размещения производства в России снизит себестоимость и обеспечит быстрый доступ к материалам и компонентам. При создании закупочных союзов стоимость на необходимые ресурсы может быть снижена на 20% [1]. Реализация продажи через Интернет также позволяет сократить время на поставку, развивать маркетинговую кампанию и распространение товара на рынке, продвигать бренд. Кроме того, возрастающая роль электронной коммерции мотивирует потребителей все больше использовать Интернет при покупке товара. Основными причинами, по которым покупатели совершают заказ в сети, являются экономия времени, качество обслуживания, большой выбор и возможность отследить процесс доставки.

Согласно стратегии развития информационного общества в Российской Федерации (утверждена Президентом Российской Федерации 7 февраля 2008 года № Пр-212) необходимо повысить качество жизни граждан, обеспечить конкурентоспособность России, развить экономическую, социально-политическую, культурную и духовную сферы жизни общества, совершенствовать систему государственного управления на основе использования информационных и телекоммуникационных технологий. К числу основных задач, способствующих достижению поставленной цели, относятся [2]:

- формирование современной информационной и телекоммуникационной инфраструктуры, предоставление на ее основе качественных услуг и обеспечение высокого уровня доступности для населения информации и технологий;
- развитие экономики Российской Федерации на основе использования информационных и телекоммуникационных технологий;
- развитие науки, технологий и техники, подготовка квалифицированных кадров в сфере информационных и телекоммуникационных технологий.

В соответствии со Стратегией развития легкой промышленности в Российской Федерации на период до 2025 года необходимо совершенствовать организацию производства путем внедрения новых технологий и инноваций. Не-

смотря на высокую организационно-техническую обеспеченность в производстве обуви сохраняются возможности его совершенствования. Так, на стадии разработки проектной и конструкторской документации новой модели обуви имеется ряд «узких мест», формализация которых с применением средств компьютерной графики, позволила бы существенно снизить субъективность решений проектировщика-конструктора или освободить его от выполнения однотипных от проекта к проекту процедур. Это положительно отразилось бы не только на эффективности его деятельности, но и производства в целом. Использование систем автоматизированного проектирования призвано сократить время на разработку новой продукции, упростить процессы конструирования, моделирования и графирования. Однако, на практике в известных САПР алгоритмы предварительной обработки изображения не учитывают специфику чертежей деталей обуви. Несмотря на множество решений задачи векторизации (включая коммерческие разработки в области программного обеспечения) до сих пор не существует алгоритма, обладающего достаточной автоматизированностью, универсальностью и эффективностью. Различные пакеты прикладных программ автоматизации обувного производства решают проблему векторизации посредством ввода специального набора параметров, в которых используются обобщенные методы распознавания изображений и чертежей [3]. К тому же сложность подбора оптимальных параметров векторизации замедляет сам процесс, а ввод значений, осуществляемый инженером-оператором, лишает систему автоматизма. Следовательно, разработка системы проектирования конструкций верха обуви с использованием средств технического зрения является актуальной.

Объект исследования — процессы проектирования конструкций верха обуви, системы автоматизированного проектирования коженно-галантерейных изделий.

Предмет исследования — чертежи конструкций верха обуви и процессы их ввода в САПР.

Целью работы является повышение качества и конкурентоспособности обуви на основе совершенствования процессов ее проектирования с использованием средств технического зрения в конфигурации отечественных САПР.

В соответствии с поставленной целью в диссертации:

- ✓ Проведен анализ конфигурации современных САПР, составлена сравнительная таблица;
- ✓ Исследованы средства ввода и распознавания графической информации, выбраны наиболее эффективные;
- ✓ Исследованы алгоритмы предварительной обработки изображений для их адаптации применительно к задачам проектирования конструкций верха обуви;
- ✓ Установлен размер порога бинаризации чертежей конструкций верха обуви;
- ✓ Получен набор апертур для обнаружения реперных точек чертежей конструкций верха обуви;
- ✓ Разработан и апробирован топологический алгоритм векторизации скелета сканированных изображений грунд-модели обуви;
- ✓ Разработан метод поиска замкнутых контуров деталей обуви;
- ✓ Разработана методика проектирования конструкций верха обуви с использованием математического аппарата графического редактора;
- ✓ Разработан и апробирован рациональный формат математического описания сплайна для сглаживания контуров шаблонов обуви;
- ✓ Разработан и апробирован способ интеграции информации о шаблонах деталей обуви;
- ✓ Предложена рабочая гипотеза использования в обувном производстве открытых программ 3D-проектирования;
- ✓ Рассчитана экономическая эффективность применения средств технического зрения в производстве обуви.

Исследования проводились на кафедрах «Художественное моделирование, конструирование и технология изделий из кожи» и «Информационные технологии» Московского государственного университета дизайна и технологии в рамках тематического плана НИР МГУДТ (2014-2018 г.) по направлению №2 «Проблемно-ориентированные исследования в области перспективных технологий и дизайна» тема 2.3 «Совершенствование методов компьютерного дизайна и проектирования изделий легкой промышленности» и направлению №4 «Конкурентоспособный ассортимент индустрии детских изделий с использованием информационно-телекоммуникационных технологий» тема 4.3 «Создание конкурентоспособного ассортимента детской обуви различного назначения с использованием информационно-телекоммуникационных технологий».

Методы исследования и технические средства решения задач.

Исследования базировались на комплексном системном подходе с использованием возможностей современных информационных технологий и средств технического зрения. В ходе выполнения работы использованы теоретические положения конструирования обуви и разработки информационных систем, теория распознавания образов, методы сжатия данных с помощью нейронных сетей, алгоритмы программирования и автоматизированных систем.

Информационно-теоретической базой диссертации послужили труды отечественных и зарубежных ученых в исследуемой и смежных областях, энциклопедическая и справочная литература, конструкторско-технологическая документация.

Научную новизну исследования составляет концепция системы автоматизированного проектирования контуров шаблонов деталей и чертежей конструкций верха обуви с использованием средств технического зрения, включающая:

- методику преобразования растрового представления контуров шаблонов деталей и чертежей конструкций верха в векторное;
- методику выделения взаимосвязанных контуров деталей обуви;

- математическую модель и алгоритмы представления замкнутых контуров шаблонов деталей обуви;
- рекуррентный компьютер для оперативного регулирования числа точек в контуре;
- рабочую гипотезу использования открытых программ 3D-проектирования.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке математической модели и алгоритмов векторизации чертежей конструкций верха обуви и контуров шаблонов.

Практическая значимость состоит в расширении возможностей известных САПР, что позволяет сократить время ввода информации и процесс проектирования обуви.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) Предложенная структурно-логическая схема модуля «Оцифровка»;
- 2) Разработанный топологический алгоритм векторизации, позволяющий преобразовывать растровое представление контуров шаблонов деталей и чертежей конструкций верха в векторное;
- 3) Предложенная концепция модуля «Проектирование» и математическое описание необходимых функций для работы с контурами;
- 4) Разработанный алгоритм поиска замкнутых контуров деталей, позволяющий сократить время на проектирование обуви;
- 5) Разработанная математическая модель кубического сплайна для описания деталей верха обуви;
- 6) Рекуррентный компьютер для оперативного регулирования числа точек в контурах чертежей конструкций верха обуви;
- 7) Рабочая гипотеза использования открытых пакетов проектирования в 3D-пространстве.

Апробация и реализация результатов работы. Результаты диссертации докладывались на заседаниях кафедр художественного моделирования, конструирования и технологии изделий из кожи и информационных технологий Московского государственного университета дизайна и технологии, Международной заочной научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития современной науки и образования», Международной научно-технической конференции «Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности» (ИННОВАЦИИ-2013 и 2014), Международной научно-практической конференции «Роль науки в развитии общества», 62 научной конференции студентов и аспирантов «Молодые ученые – XXI веку», посвященной 80-летию университета (г. Москва, МГУДТ 12-14 апреля 2010).

Результаты используются в учебном процессе на кафедрах информационных технологий МГУДТ в виде лабораторного практикума «Обработка изображений», «Компьютерная графика» и художественного моделирования, конструирования и технологии изделий из кожи в форме учебного пособия «Электронные средства обучения для лиц с ограниченными возможностями по здоровью: практические примеры интерфейсов».

Проведена апробация разработанного модуля «Оцифровка» на ЗАО МОФ «Парижская Коммуна», которая подтверждена соответствующим актом.

Публикации. Основные положения диссертационной работы опубликованы в 11 печатных работах, 5 из которых – в реферируемых изданиях ВАК.

Структура и объем работы. По своей структуре диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов по каждой главе, общих выводов по работе, списка литературы, приложений. Работа изложена на 179 страницах машинописного текста, содержит 108 рисунков, 13 таблиц. Список литературы включает 135 библиографических и электронных источников. Приложения представлены на 25 страницах.

1. СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

1.1. Основные модули и функциональные возможности САПР легкой промышленности

Технологии САПР для точного представления формы изделия первыми стали использовать автомобильная и аэрокосмическая промышленности. В то время требуемое специализированное программное и аппаратное обеспечение главным образом предоставлялась поставщиками САПР, однако проектирование было очень дорогими, а технологии компьютерной графики только начинали развиваться [4].

Первые САПР выполняли только моделирование в 2D. Но и сегодня 2D-проектирование по-прежнему остается актуальным. В середине 1980-х, после прогресса в технологии 3D-моделирования и развития программного обеспечения, системы пространственного моделирования становятся очень популярными. Моделирование в 3D базируется на создании каркаса модели, и последующей визуализацией готового продукта с наложением текстуры, света и тени, применением алгоритмов скрытия невидимых граней [3]. В то же время твердотельное моделирование хотя и признано единственным способом, который может обеспечить однозначное представление продукта, однако он не пригоден для сложных соединений. Современные технологии твердотельного и поверхностного моделирования используются в комбинации. Такие системы предназначены для проектирования объектов, находящихся в динамике (механизмы, самолеты, машины и т.п.). Системы автоматизированного проектирования распространены во всех промышленных секторах, таких как электроника, текстиль, упаковка, одежды, кожи и обуви и т.д [5].

Весной 2015 года аналитическая компания Jon Peddie Research (JPR) представила отчет о состоянии рынка САД-решений. Исследователи отмечают невысокую динамику продаж систем в период с 2009 по 2015 годы (рис. 1.1) [6].

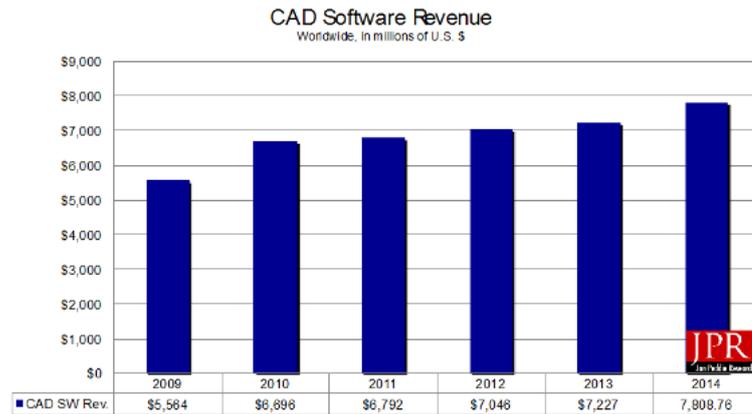


Рисунок 1.1 Продажи CAD-систем [6]

На развитие CAD/CAM-решений повлиял экономический кризис 2008-2009, в результате которого возросла конкуренция, а потребитель стал более требователен к продукции. Поставщики были вынуждены охватывать новые области, развивать функциональные возможности предлагаемых решений, чтобы сохранить клиентов и привлечь новых.

В тройку лидеров поставщиков САПР вошли ожидаемые компании: Autodesk, доля которой составляет 29%; Dassault Systèmes (22%), Siemens (11%) (рис. 1.2). По мнению вице-президента и главного редактора JPR Кэтлин Махер (Kathleen Maher) на рынке CAD/CAM-решений имеются ниши для новых компаний, которые могут привнести новые технологии, такие как моделирование, анализ, 3D-печать, визуализация, облачные системы, управления жизненным циклом изделия (PML) [6].

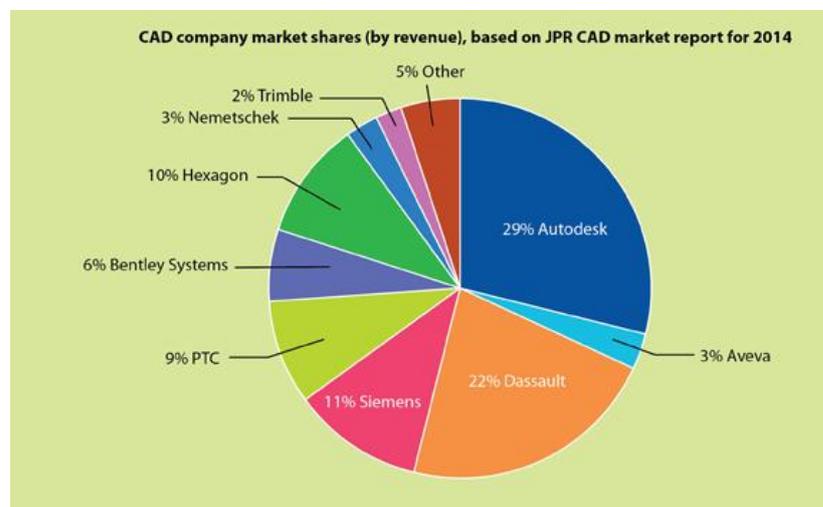


Рисунок 1.2 Доля на рынке (по доходам) поставщиков САПР [6]

Autodesk – американская корпорация, поставляющая программное обеспечение для объектов архитектуры, строительства, индустрии развлечений, обрабатывающей промышленности и других сфер. В начале 1980 годов компания первой предложила на базе персонального компьютера программное решение AutoCAD, которое до сих пор сохранило свою популярность. В настоящее время Autodesk развивает широкий спектр программного обеспечения для проектирования, инжиниринга и развлечений, а также линию программного обеспечения для потребителей, в том числе Sketchbook, Homestyler и Pixlr. 6 февраля 2014 года Autodesk сообщила о завершении сделки по приобретению компании Delcam, одного из лидирующих поставщиков программного обеспечения CAD / CAM для промышленности. Было объявлено, что Delcam будет работать как дочерний независимый филиал Autodesk [7]. Компании предлагают решения задач легкой промышленности, в частности и обувной. Таковым является Crispin, состоящий из нескольких пакетов: работа с колодкой (LastMaker), дизайн (ShoeMaker, SoleEngineer, ShoeStyle, VRED), производство обуви (Engineer, TechPac, StitchTec, ShoeCost, KnifeCut, PatternCut), индивидуальный пошив и ортопедическая обувь (OrthoModel, OrthoMill, Engineer Ortho, OrderManager, iQube) [8]. Как видно из перечисленного списка программных продуктов, решение Crispin охватывает полностью процесс проектирования и производства обуви, как массового, так и индивидуального.

На сайтах Autodesk и Delcam имеются страницы с поддержкой и форумами, по результатам анализа которых построены диаграммы активности посетителей в зависимости от темы форума (рис. 1.3). Доля Crispin составляет всего 0.3%, а OrthoModel – 0.05%. Наиболее популярные программы Delcam: PowerMILL – 53%, PowerSHAPE – 19% , PowerINSPECT – 11% ;Autodesk: Revit & BIM – 39%, Inventor – 19% и AutoCAD – 18%.

Нами исследованы сайты, посвященные непосредственно обувной промышленности: shoemasters.org [9] и forum.shoemaker.ru [10]. В процессе анализа были

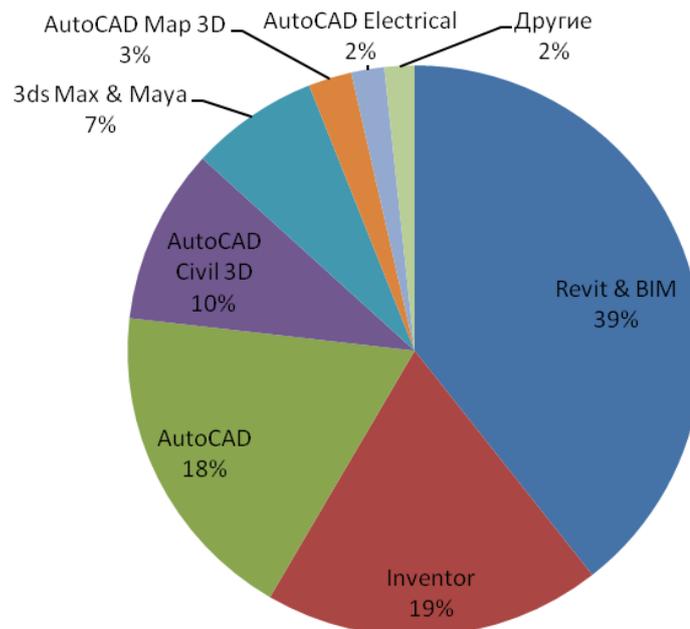
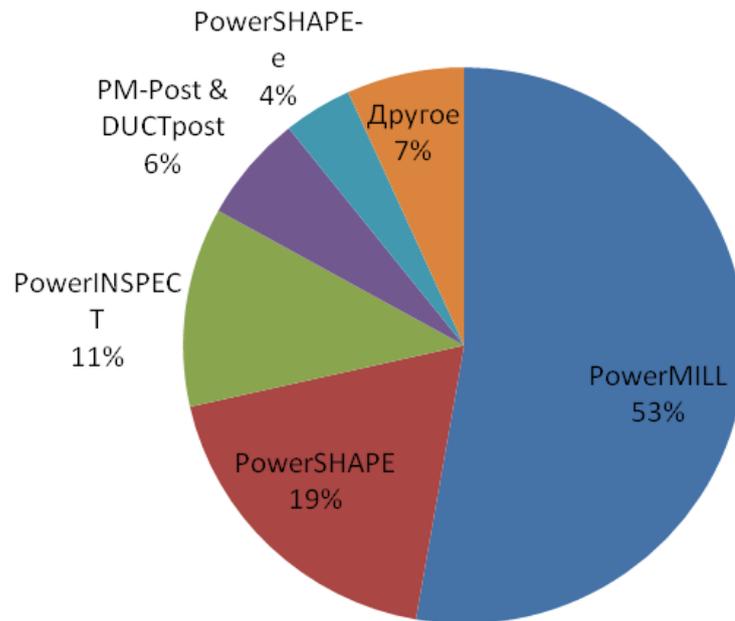


Рисунок 1.3 Диаграмма активности посетителей форумов Delcam и Autodesk

использованы следующие интернет-ресурсы: Similar Web [11], pr-cy[12] , prodvigator [13], Google Тренды, alexa [14].

Основную аудиторию составляют граждане России (около 53%) и СНГ: Украина 39%, Беларусь 3%, Таджикистан 4% и Казахстан 1%). Из диаграммы видно, что посетителей интересует индивидуальное изготовление обуви, и меньше всего

вопросы автоматизации (рис. 1.4). Эта тенденция объясняется ростом экономической конкуренции и последствиями кризиса 2008-2009 годов. Производители вынуждены подстраиваться под требования заказчиков, чтобы сохранить и укрепить свою нишу на рынке. Максимально угодить клиенту можно лишь в случае выполнения индивидуальных или эксклюзивных заказов.



Рисунок 1.4 Диаграмма активности посетителей shoemasters

Из сообщений пользователей САПР выявлено, что в настоящий момент известные системы не могут полностью автоматизировать процесс изготовления изделия в силу нехватки необходимого оборудования. Ниже приведено сообщение от 08 апреля 2015 одного из пользователей форума:

“Здравствуйте, уважаемые участники форума. Очень интересная ветка, особенно вопросы касательно продуктов Delcam. ... Для себя определил 2 варианта: либо сканирую слепок, либо цифрую колодку. 2-ой способ предпочтительней с точки зрения идеологии САМ. Для векторизации изображений со сканера использую Cogel, в ручном режиме обводя линии кривыми безье ... Автоматическая трассировка везде работает коряво и требует предварительной серьезной подготовки изображения специальными фильтрами. На счет сканирования колодки даже не знаю... Если отсканировать 3D, отдав за эту операцию по местным ценам 5000 рублей, это пол беды. Потом файл-сетку *.stl (экспортируется большинством 3D сканеров) нужно корректировать, чтобы избавиться от косяков сканера, преобразовать сетку в поверхность и экспортировать уже в формат, понятный большинству САМ пакетов. Это делается ПО GeoMagic по-моему. Есть еще один вариант: если станок, на котором катают колодки, имеет ЧПУ, то управляющую программу можно преобразовать в STL (это уже без 3D сканера), затем GeoMagic и Ваш

CAD или CAM. Это можно сделать утилитами, которые обычно поставляются с ПО ЧПУ станка. Можно пойти от обратного: спроектировать колодку в Delcam LastMaker, затем пропустить полученную модель по цепочке ShoeMaker -> Engineer, ну и конечно обточить ее на станке с ЧПУ (Таков замысел творцов DelCAM, наверно). Еще один экстремальный вариант я рассматривал для себя: если иметь множество сечений перпендикулярно оси колодки, и точно знать, как они располагаются в пространстве друг относительно друга, то можно построить 3D модель колодки в любом САПР твердотельного моделирования. Однако встал вопрос определения измерительных баз (Относительно какой линии, плоскости или чего либо формировать базу при сняти сечений)” [9]

(пунктуация и грамматика автора).

У пользователей возникают соответствующие вопросы, поэтому 2-ое место по активности занимает тема «Оборудование для изготовления и ремонта обуви». Заметим, что данный вопрос актуален не только для рассматриваемой промышленности. На форуме sscr3d общаются специалисты в области CAD, CAM, CAE и PDM. Анализ сообщений показывает не только актуальность темы оборудования, но и производственных проблем (рис. 1.5).

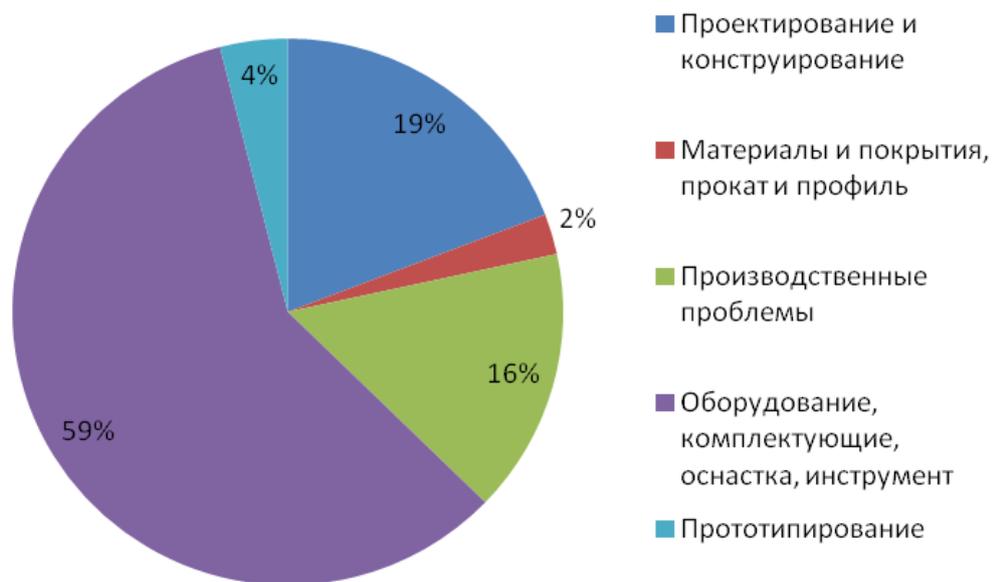


Рисунок 1.5 Диаграмма активности посетителей sscr3d3

Если рассматривать вопрос использования CAD, CAM, CAE, PDM и пр. систем, то здесь распределение примерно равномерное. Исключение составляет автоматизация и реинжиниринг бизнес-процессов (PDM, PLM, CALS и т.п), которые занимают 3% от общего числа (рис. 1.6). Таким образом, можно сделать вывод, что, хотя новые технологии и доступны, но фирмы не спешат их использовать.

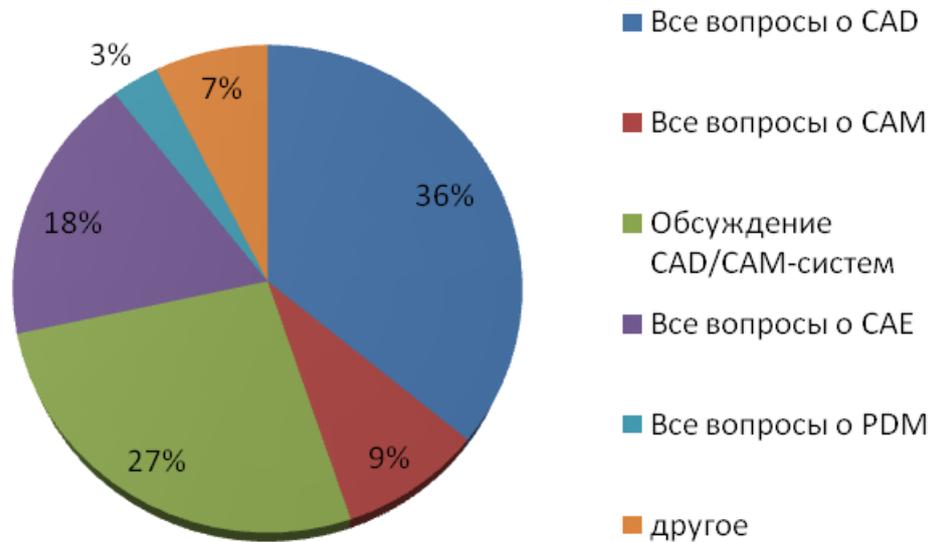


Рисунок 1.6 Диаграмма актуальности САПР в проектировании и производстве на основе cср3d3

Вопрос использования конкретной САПР ещё более сложен, поскольку каждое предприятие руководствуется своими принципами при выборе программного обеспечения (ПО). Как правило, основными критериями являются: функциональные возможности, опыт применения, совместимость с другими системами, стоимость, поддержка в России и СНГ и репутация разработчика. «Например, в обувной промышленности самыми распространенными являются АСКО-2Д (РосЗИТЛП), «ShoesModel» (МГУДТ), Ассоль (МФТИ), Nahos (фирма «TESEO», Италия), ClassiCAD (Чехия), Crispin от Delcam (Великобритания), Shoemaster от CSM3D International Limited (Великобритания)» [3]. В последние 4 года становится популярной Rhino от фирмы Rhinoceros (США), разрабатывающей плагины для обувной промышленности: ImagineElf, LastElf, 3dm-shoes, Butterfly, CastingElf, EvaElf, ShoesKit, и SHOT [15]. Ниже представим перечисленные САПР более подробно.

Систему двумерного проектирования обуви АСКО-2Д [16] в течение 18 лет используют более 100 предприятий и обувных фирм в разных городах России и СНГ, таких как Москва, Брянск, Архангельск, Ростов-на-Дону, Казань, Кострома, Иркутск, Минск, Витебск, Киев и др.

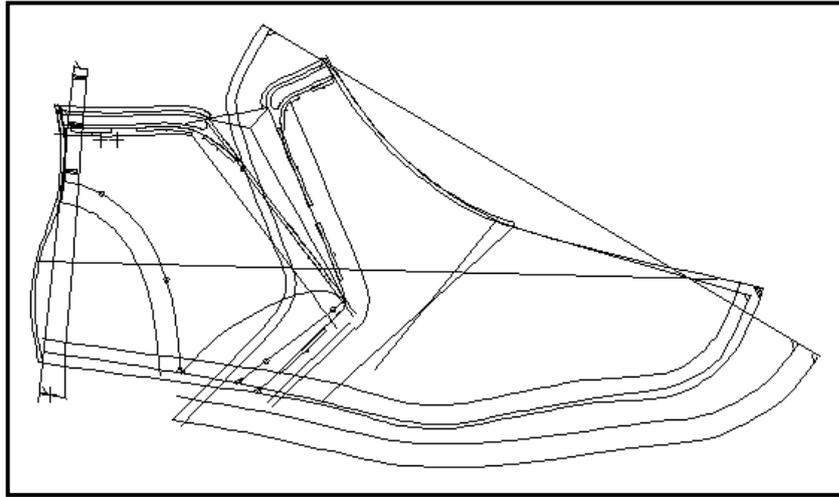


Рисунок 1.7 Проектирование обуви в АСКО-2Д [16]

Для обеспечения работы программы необходимы компьютер с ОС windows, принтер, дигитайзер и устройства вывода (графопостроитель, режущий плоттер). Разработчиками предложены простые средства создания эскизов, каталогов, подбора цвета материала, добавления декоративных элементов. Ввод исходной информации осуществляется с помощью дигитайзера, так же имеется возможность построения сборочного чертежа с помощью простых операций (припуск, гофры, симметрия, поворот, изменение линий). Программа позволяет получить детали верха базового размера с автоматическим обмером и оценкой процента укладываемости шаблонов; плоские детали низа. Создание серии шаблонов деталей доступно с использованием различных систем градирования. Система обеспечивает создание базы данных материалов, типовых технологических процессов и необходимой документации.

Удобная и простая в использовании АСКО-2Д существенно сокращает время на разработку модели, повышает точность и качество исполнения чертежей, предоставив модельеру возможность сосредоточиться на творческой стороне своей деятельности. Имея в своем арсенале большой выбор специализированных средств и приемов, модельер может действовать по произвольному сценарию и практически не менять обычного стиля работы.

АСКО-2Д позволяет оперативно создавать и анализировать различные варианты укладываемости деталей, рассчитывать процент использования и расход

основных материалов, определять себестоимость одной пары или партии обуви с указанием стоимости каждого компонента изделия. Самый трудоёмкий процесс – градирование осуществляется в автоматическом режиме и занимает считанные секунды. При градировании обеспечивается согласованное изменение размеров деталей. Предусмотрено создание новых серий с заданными параметрами и повторное градирование изделия после внесения корректировок. При просмотре серии деталей можно менять точку их совмещения. Все созданные детали автоматически маркируются. В процессе работы формируется комплект технической документации на разработанное изделие, предусмотрена возможность создания новых (дополнительных) форм документов по желанию заказчика.

На основе разработанных методов и алгоритмов в МГАЛП (МГУДТ) [17] создан программно-методический комплекс (ПМК) для расчета и оценки материалоемкости конструкций обуви. Он построен по модульному принципу и состоит из ряда взаимосвязанных подсистем, функционирующих под управлением операционной системы WINSOWS. В комплекс входят следующие программные модули:

1. управления базой данных моделей (главный модуль);
2. оцифровки деталей;
3. графического редактора конструкций обуви;
4. вычисления укладываемости деталей;
5. градирования;
6. пакета программ формирования раскладок обувных деталей для всех видов основных материалов;
7. печати деталей и раскладок.

Главный модуль получает управление при загрузке ПМК «ShoesModel» и постоянно находится в памяти компьютера. Все остальные модули вызываются из главного модуля по мере надобности.

Процесс оценки и расчета материалоемкости модели обуви состоит из последовательности шагов:

1. Создание новой записи в базе данных моделей;

2. Заполнение списка деталей новой модели;
3. Ввод геометрической информации о конструкции обуви;
4. Расчет площадей и укладываемости деталей среднего размера;
5. Предварительная оценка материалоемкости;
6. Создание раскладок деталей модели;
7. Расчет материалоемкости модели;
8. Градирование, вычисление площадей деталей серии и создание модельного паспорта.

Одна из версий программно методического комплекса для расчета рационального использования материалов внедрена на нескольких обувных предприятиях России. Комплекс используется на этапе конструкторско-технологической подготовки производства для предварительной оценки материалоемкости изделия. Результаты анализа апробации разработанных методов и алгоритмов, реализованных в «ShoesModel» показали их высокую согласованность, а, следовательно, и достоверность. Внедрение комплекса позволило исключить из технологического процесса морально и физически устаревшее оборудование для обмера площадей деталей, а также ускорить запуск новой конструкции в производство за счет устранения трудоемких ручных операций по вычислению площадей и укладываемости деталей [18].

Центр **АССОЛЬ** в течение последних 8 лет разрабатывает и представляет на Российском рынке программные продукты для легкой промышленности. На сегодняшний день АССОЛЬ-ОБУВЬ содержит средства, автоматизирующие работу конструктора на плоскости. АССОЛЬ-ОБУВЬ обеспечивает следующие функциональные возможности:

- ввод средней копии или грунт-модели в компьютер с помощью дигитайзера или сканера.
- построение модели на основе средней копии, автоматически сориентированной в требуемых системах координат. Специализированные команды конструирования задают необходимые связи на грунте, позволяют ускорить и упро-

стить процесс моделирования. Прошедший обучение конструктор затрачивает на разработку в компьютере чертежа модели не более одного часа [19].

- выполнение детализации с грунт-модели. При выполнении детализации автоматически создаются необходимые связи между деталями и грунт-моделью, обеспечивающие точность градации. И в тоже время на любом этапе можно легко внести необходимые изменения или выполнить дополнительные построения [19].

- автоматическое размножение по стандартным системам: штихмассовой и метрической, а также любым другим приращениям, по желанию конструктора, что обеспечивает гибкость при градировании. Поддерживается выполнение градирования по полнотам и половинным размерам (рис. 1.8) [19].

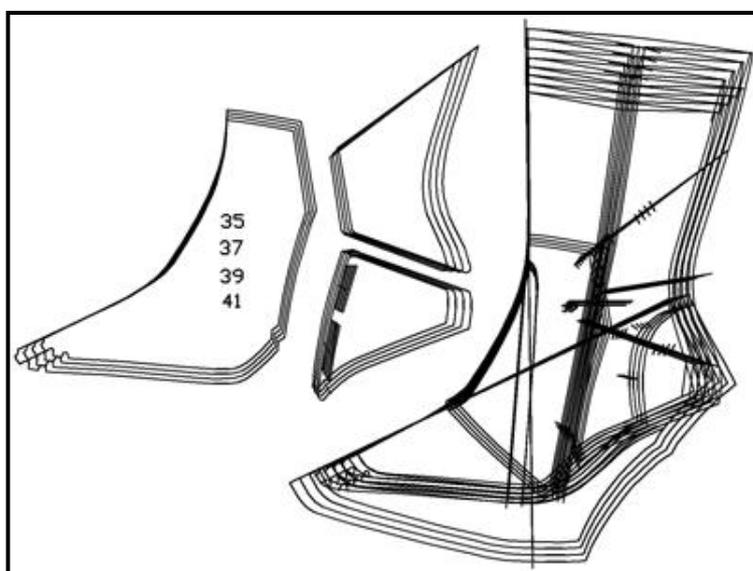


Рисунок 1.8 Проектирование деталей верха в АССОЛЬ [19].

- автоматическая маркировка деталей по заданному пользователем шаблону, в соответствии с принятыми на предприятии требованиями [19].

- автоматический расчет площадей и периметров. Как только конструктор сформировал деталь, вся информация о ней автоматически заносится в специальную таблицу, доступную для просмотра в любой момент [19].

- автоматический расчет укладываемости. После детализации автоматически подсчитывается максимальный процент укладываемости каждой детали. Эта информация заносится в сводную информационную таблицу деталей, где хранятся показатели их площадей, периметров и другая информация, а также

паспорта моделей. Кроме этого, есть команда графического отображения всех возможных способов укладываемости для выбранной детали или выбранного набора деталей одной или нескольких моделей. Эти функции гарантируют абсолютно точный результат и помогают экономить сырье [19].

- автоматическая корректировка деталей при внесении изменений в грунт-модель [19].
- автоматическое создание паспорта и другой сопроводительной документации на модель по заданной пользователем форме [19].
- вывод деталей на печать или вырезающее устройство. Автоматическая подготовка шаблона вывода. Конструктор задает размер листа (для картона) или ширину рулона (для бумаги), выбирает детали и диапазон размеров – система автоматически чертит экономную конфигурацию расположения деталей на листах (рулоне) и выдает необходимое число слоев настила или длину рулона [19].

Другим очевидным преимуществом программы АССОЛЬ-ОБУВЬ – ее стоимость – она намного ниже зарубежных аналогов.

Процесс моделирования в трехмерной САПР—**Naxos 3D** [20] (Италия, фирма «Teseo») предусматривает создание фасона колодки в автоматизированном режиме в соответствии с направлением моды или персональным заказом.

Для создания фасона колодки в трехмерной системе на экран монитора выводят прототип колодки, на базе которого создают новый фасон носочной части, то есть ее форму, длину, ширину и наполненность, приподнятость носка и пяточной части. В процессе формирования фасона колодки ее можно поворачивать в удобное для обозрения положение.

При персональном проектировании обуви получают полную информацию о размерах стопы путем сканирования ее трехмерным дигитайзером или лазерным сканером. Выбирают из базы данных колодку, подходящую к данной стопе.

Стилист, используя компьютерную технику, считывает созданную форму колодки для разработки эскиза модели. Из системы САД-САМ виртуально определяют прототип подошвы и каблука и вводят их в систему эскизного проектиро-

вания, которая слой за слоем позволяет получить конфигурацию прототипа. На колодку наносят вспомогательные для построения модели линии — линию кальцаты (см. итальянскую методику проектирования «ARS Sutoria») и две параллельные ей линии, делящие осевую линию гребня (от точки кальцаты до наиболее выступающей точки гребня) на три равные части, и линию косога взъема [10].

Внедрение САПР в производство позволяет повысить эстетический и технический уровень создаваемой продукции, способствует унификации и стандартизации изделий, расширяет их ассортимент, сокращает сроки проектирования, качественно меняет труд проектировщиков, обеспечивает использование машинных методов решения задач, связанных с выбором проектных ситуаций, разработкой конструкторско-технологической документации, изготовлением изделий на станках с числовым программным управлением.

Модульная система проектирования обуви «NAXOS» состоит из нескольких блоков.

Блок трехмерного проектирования обеспечивает:

1. Ввод каркаса колодки в компьютер при помощи 3D-дигитайзера.

Колодку перед вводом предварительно размечают. Последовательно по точкам вводят линии каркаса наружной и внутренней поверхности, следа и базисной площади колодки. По опорным точкам осуществляют сочленение всех поверхностей. Колодку закрашивают выбранным из палитры цветом с нанесением бликов и теней для реального объемного восприятия. Линии сочленения поверхностей отображаются на экране соответствующим цветом [21].

2. Нанесение основных и конструктивных линий

На колодке автоматически отображаются: линия кольца союзки, две параллельные ей линии, линии косога взъема и середины пяточной части.

Для нанесения конструктивных линий используется специальный режим рисования - «3D линии». Так, при проектировании конструкции полуботинок на резинках с овальной вставкой для построения линий канта и овальной вставки необходимо поставить точку на основной линии середины пятки (высота берцев), а далее по точкам вводить остальные линии членения. Линии наносятся на наруж-

ную поверхность колодки. Для нанесения линии членения на внутреннюю поверхность используют функцию симметрии [21].

3. Создание виртуальной модели

В системе это достигается применением специальных заливок, которые могут быть введены в компьютер путем сканирования реальных обувных материалов. Для выполнения заливки предварительно выделяются линии, определяющие заливаемую деталь. Блики и тени отображаются на применяемой текстуре для сохранения объемности изображения. Добавление нужных подошвы и каблука, удаление изображения колодки завершают формирование модели [21].

4. Модификация изображений колодок

Система позволяет модифицировать форму каблука, изменяя высоту приподнятости пяточной части, форму и приподнятость носочной части, высоту колодки. Такая колодка в дальнейшем может быть изготовлена на специальных фрезерных станках, предлагаемых фирмой «TESEO». Применив модификацию, необходимо убедиться в том, что спроектированная колодка соответствует стопе. Получение разверток и перенесение конструкторских линий на плоский чертеж выполняется автоматически при работе отдельных модулей 3D-блока [21].

Блок двухмерного проектирования выполняет:

- Ввод чертежа модели с плоского дигитайзера. Контуры чертежа вводятся последовательно. Каждый контур при вводе по умолчанию автоматически удлиняется с двух сторон, что обеспечивает впоследствии возможность определения точек пересечения контур выделения деталей [21].
- Построение припусков на обработку краев, соединение деталей и затяжной кромки.
- Построение линий подкладки с использованием контуров верха и функции припусков.
- Построение линий симметрии и разворот контуров.
- Детализовка чертежа с нанесением на деталь контуров обработки, наколов и гофр и т.д.

- Градирование чертежа модели в различных системах.
- Вывод на печать или вырезание деталей с необходимыми маркировками.

Блока двухмерного проектирования не имеет принципиальных отличий от отечественных систем плоскостного проектирования. Отличие заключается во внешнем интерфейсе, последовательности выполнения действий конструктора при проектировании и реализации специальных функций [21].

Блок расчета основных и вспомогательных материалов и технологии обработки деталей имеет следующие возможности:

1. Выбор материала для изготовления деталей модели осуществляется в специальном режиме «Материалы». Выделяются и заносятся в список все материалы, которые планируется использовать для данной модели. По каждому материалу указываются наименование (наппа, капретто и т.д.), тип (кожа для верха, подкладочная кожа и т.д.), цвет (черный, бежевый и т.д.). После этого устанавливается соответствие выделенных деталей материалу из списка [21].

2. Дополнительно задается размер деталей конструкции, для которых выполняются расчеты.

Система предлагает свое размещение, выделяет зону, ограничивающую раскладку, указывает чистую площадь комплекта деталей в зоне и процент использования материала. Часто предлагаемое размещение не является оптимальным, поэтому технологу предоставляется возможность изменять размещение выбранной деталей в диалоге. Для выполнения расчетов по новому размещению используют режим «Расчет». Выбранную схему размещения можно использовать для раскроя кож на автоматизированных раскройных системах РС4 фирмы «TESEO».

Завершается работа блока расчетом калькуляции на изготовление модели, включая затраты на закупку сырья и комплектующих, на рекламу и транспорт, планируемую прибыль, затраты внутри предприятия, затраты. Не до конца ясен вопрос, каким образом эта калькуляция получается [21].

Фирма «TESEO» утверждает, что по всему миру внедрено более 100 систем, в том числе на швейных, обувных и кожгалантерейных предприятиях, и представляет CD-диск с их наименованиями. Однако, несмотря на то, что фирма предлагает свои услуги на российском рынке более 5 лет, внедрения на отечественных предприятиях практически нет. Это объясняется двумя факторами: во-первых, ценой системы, которая в два-четыре раза превышает аналогичные российские разработки, а во-вторых - отсутствием положительных отзывов от отечественных производителей обуви. Несмотря на это, фирма продолжает предлагать свои услуги и уверена в скором успехе.

Чешская автоматизированная система «**Classi CAD**» [22], предназначенная для компьютерного проектирования обуви, кожгалантереи и расчета всевозможных затрат, включает семь программ, взаимосвязанных и совместимых между собой блоков САПР: CAD/Cobber, PAS-Cobber, Calc-Cobber и Classi-Base.

CAD/Cobber – система, предназначенная для выполнения конструирования и градирования, деталей верха и низа обуви, производит ввод модели с УРК, чертежа или другой САПР, выполняет чертеж модели, чертеж для операции спуска краев детали, вырезает картонные шаблоны деталей среднего размера и деталей градированных в соответствии с размерно-полнотным ассортиментом.

Pas-Cobber – система позволяет вносить изменения в конфигурацию отдельных деталей с целью достижения минимального расхода материала, производить автоматический расчет укладываемости, при размещении деталей методом параллелограмма, с учетом различных вариантов смещения и расчетом нормы брутто и себестоимости для составления калькуляции.

Calc-Cobber – система имитации раскладки на раскраиваемом материале, выполняет точный расчет калькуляции модели обуви, уже предназначенной для серийного производства.

Class-Base – модульная информационная система технологической подготовки производства. Составляет технико-экономическую документацию, технологические предписания цехам и определяет тарифы и зарплаты в цехах.

В числе плюсов системы можно отметить всесторонний подход к автоматизированному проектированию конструкторско-технологической подготовки производства обуви.

Специализированные зарубежные САПР Италии, Чехии имеют в своем составе средства проектирования на плоскости и в пространстве, но они не допускают возможность автоматической генерации карт раскроя и средств для технологической подготовки производства. Кроме этого зарубежные системы имеют значительно более высокую стоимость, низкий уровень поддержки, несоизмеримо большие сроки и затраты на освоение [23].

САПР **Crispin** от Delcam [24] включает семь пакетов, охватывающих всех этапы изготовления обуви: LastMaker, ShoeMaker, Engineer, iQube, OrthoMill, OrthoModel, OrderManager.

LastMaker предназначен для работы с колодкой: оцифровка с помощью 3D сканера, изменение геометрии, сохранение в библиотеке и поиск по ней. ShoeMaker пакет для дизайна обуви позволяет импортировать наброски и делать переход от эскиза в 3D, реалистично визуализировать созданное изделие (материал, фактура, освещение), добавлять декоративные элементы (логотипы, кружева, пряжки, стежки), поддерживает интеграцию с другими пакетами. Sole Engineer предназначен для проектирования подошвы. Пакет Engineer используют для 2D, имеется возможность оцифровки чертежей с помощью дигитайзера, здесь же выполняют градирование. В TechPac хранят техническую документацию, схемы сборки заготовки. KnifeCut и PatternCut предназначены для создания раскладок и вырезания деталей. ShoeCost позволяет рассчитать затраты на производство и создает отчеты.

Модули для пошива индивидуальной и ортопедической обуви: iQube поддерживает технологии сканирования ноги, в том числе и при ходьбе; OrthoModel, OrthoMill и Engineer Ortho предназначены для проектирования ортопедических стелек и деталей верха обуви, OrderManager помогает управлять рабочим процессом и отслеживать выполнение заказа.

Системные требования для Crispin 2014 и 2015: Windows 7 Pro 32 или 64 разрядная, Windows 8 и 10 Pro 64 разрядная; Crispin 2016: для всех 64 разрядные Windows 7,8,10 Pro, ShoeCost Classic и KnifeCut Windows 7 Pro 32. Любая из перечисленных Crispin поддерживает сетевую версию.

В **Shoemaster** [9] имеется возможность импорта оцифрованной колодки и её последующий дизайн. Кроме того, обеспечивается взаимодействие с такими графическими пакетами как Adobe Photoshop. Эта особенность позволяет дизайнеру использовать свой творческий подход, а результат передавать в Shoemaster, в котором осуществляется окончательная 3D визуализация. Помимо перечисленных функций рассмотренный пакет САПР предоставляет ряд команд по модифицированию колодки: масштабирование, изменение высоты каблука, носочной и пяточной частей. Этап завершается формированием полностью визуализированной модели изделия, которая пригодна для создания эскизов и презентации коллекции.

Коммерческий пакет **Rhinoceros (Rhino)** [15] предназначен для 3D моделирования, проектирования и анимации. Модели создаются на основе NURBS, что позволяет быстро и точно строить сложные объекты. Программа поддерживает импорт и экспорт из разных форматов, в том числе и от 3D сканеров. Имеется возможность преобразования NURBS в полигональную сетку с последующим рендерингом. В пакете присутствуют такие инструменты как вычисление длины, площади, угла, моментов, центра тяжести и др. В Rhinoceros много функций для реалистичной визуализации объекта: свет, текстура, прозрачность, материал, среда и др. Кроме того, написано множество плагинов для разных областей, в частности для обувной. Программа разработана для Windows, а с 5-ой версии почти все функциональные возможности доступны в среде Mac.

Отметим, что преобладающее положение занимают зарубежные производители ПО. Эта тенденция, наблюдаемая и в других сферах, послужила принятию мер по реализации плана импортозамещения. В соответствии с приказом Минкомсвязи России №96 максимальная доля импортного программного обеспечения для промышленности (PLM, CAD,CAM, CAE) к 2020 должна составлять 60%, а к 2025 – 50% [25]. Таким образом, необходимо использовать ПО с открытым ко-

дом на основе операционной системы Linux. Исследования, проведенные в настоящей работе ориентированы на отечественные САПР, в частности, ShoesModel, разработанную в МГУДТ под руководством Разина И.Б, и АСКО 2Д - профессора Кагана В. М. и доцента Бердниковой И. П. (РосЗИТЛП).

Набор программных модулей САПР и тип используемого оборудования зависит от поставщика. На основе анализа распространенных программных пакетов можно выделить следующие базовые модули [26]:

- дизайнер (создание каталога, эскиза);
- проектирование базовых конструкций (выбор исходной информации, ввод опорных точек, формирование чертежа модели);
- проектирование новых конструкций (преобразование контуров базовой модели, трехмерное проектирование);
- подсистема основных шаблонов и производных деталей (создание припусков, подкладки, вспомогательных шаблонов);
- градирование шаблонов (аппроксимация контуров шаблонов, градирование шаблонов, формирование чертежей шаблонов на все размеры и полноты, расчет площади шаблоны на все размеры проектируемой модели) [26];
- проектирование схем раскладок (расчет суммарной площади шаблонов на модель, зарисовка раскладки шаблонов на заданные сочетания размеров и полнот, расчет процента межлекальных отходов);
- проектирование технологии и процесса изготовления проектируемой обуви;
- вывод на графическое или печатающее устройство;
- подсистема норм расхода материалов (расчет норм расхода всех видов материалов на изделия заданных размеров и полнот, расчет кусков материалов);
- формирование паспорта модели [26].

В рамках настоящей работы интерес представляет рассмотрение основных этапов обобщенной САПР конструкторской подготовки обуви (рис. 1.9). По составленному техническому заданию на проектирование, в котором определены

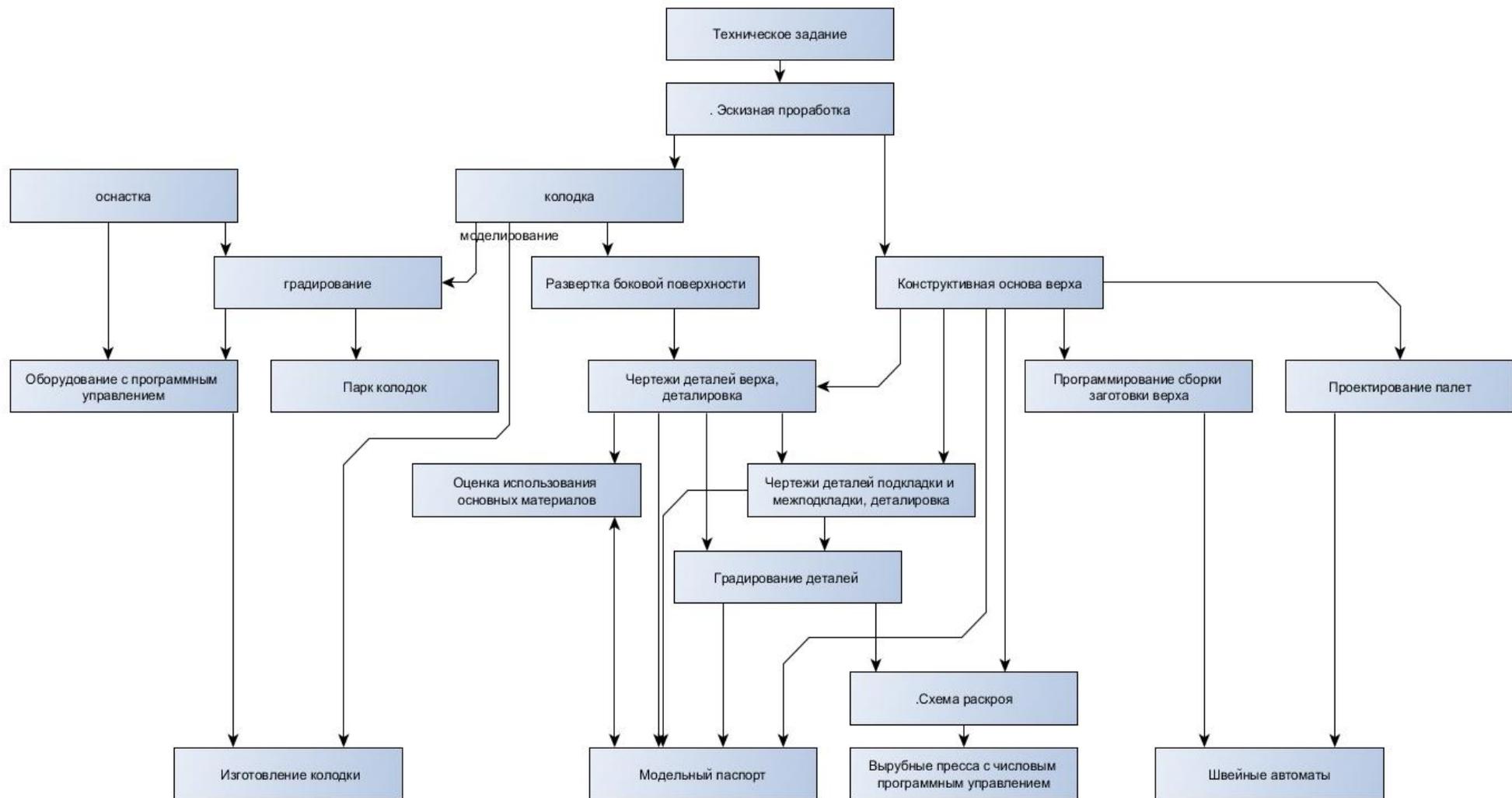


Рисунок 1.9 Основные этапы обобщенной схемы САПР конструкторской подготовки обуви

общие требования к изделию (модные тенденции, применяемые материалы, технология изготовления и др.), модельер создает наброски, которые отражают эстетику, стиль и цветовое решение будущего изделия. Результатом концептуального проектирования являются эскизы, иногда фотореалистичные изображения (рис. 1.10), созданные с помощью графических редакторов (например, Adobe Photoshop), которые в последующем могут быть использованы для изготовления макетов (прототипов). Затем возможны два варианта: подобрать подходящую колодку стандартного размера и изменять её геометрию до тех пор, пока она не будет соответствовать задуманному дизайну. Второй случай характерен для индивидуального изготовления, при котором моделируют колодку на основе антропометрических данных. После выбора или изготовления колодки получают развертку её боковой поверхности и приступают к проектированию.

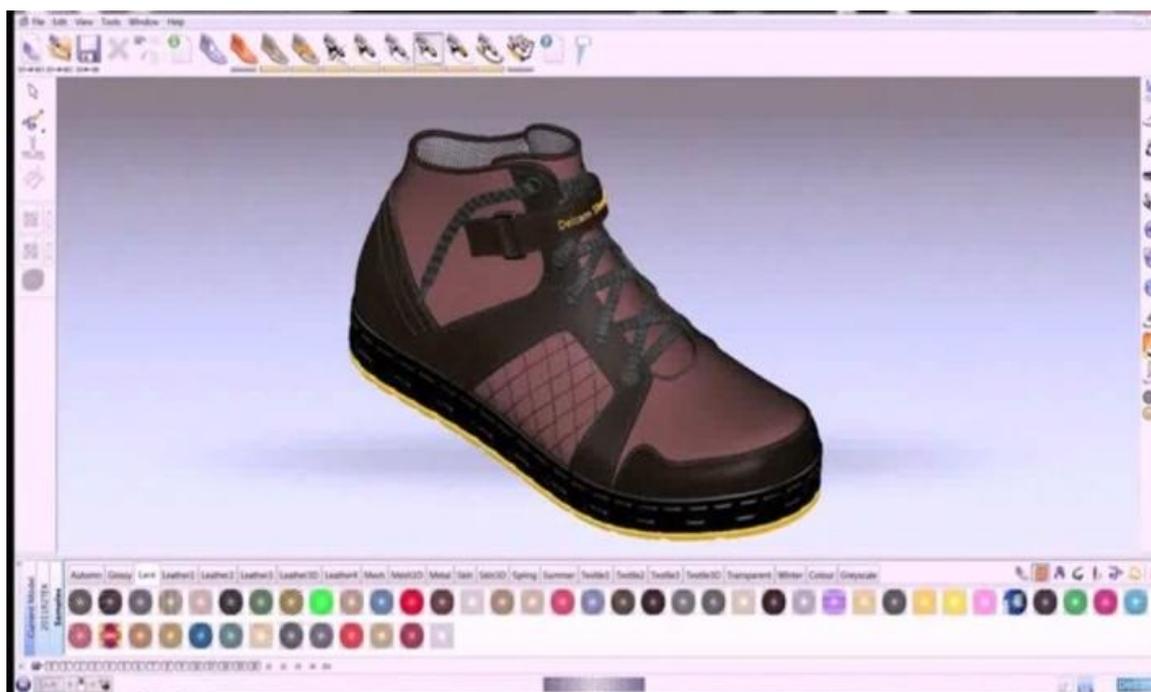


Рисунок 1.10 Визуализация готовой модели [9]

Функциональные возможности модуля проектирования зависят от способа создания конструкции (с нуля или ввода некоторой имеющейся исходной информации), который может быть выполнен как в 2D, так и 3D.

В первом случае оператор использует основные инструменты для создания шаблона: рисование простых фигур (прямоугольник, квадрат, круг, эллипс), модифи-

кация точек. На рисунке 1.11 приведен пример проектирования лекал швейной промышленности, аналогично получают шаблоны. Некоторые САПР позволяют проектировать не детали, а чертежи по определенным алгоритмам.



Рисунок 1.11 Проектирование лекал

В системах 3D-моделирования оператор вводит параметры изделия. Например, для обуви – обхваты в сечениях колодки (рис. 1.12). В результате получают объемную модель изделия, для которой строят развертку.

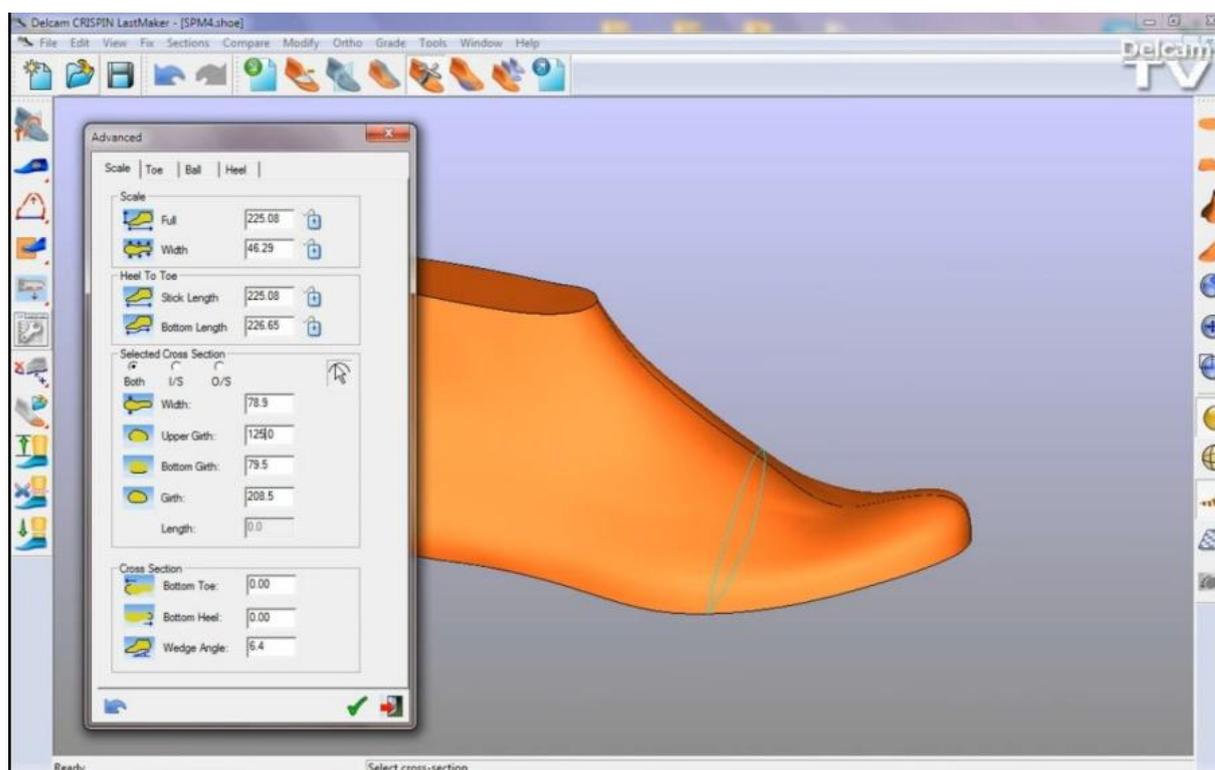


Рисунок 1.12 Экранное окно ввода параметров колодки [24]

Второй способ предполагает ввод исходных данных с помощью графического планшета (дигитайзер), светового пера, сканера, цифрового фотоаппарата и видеокамеры (рис. 1.13).

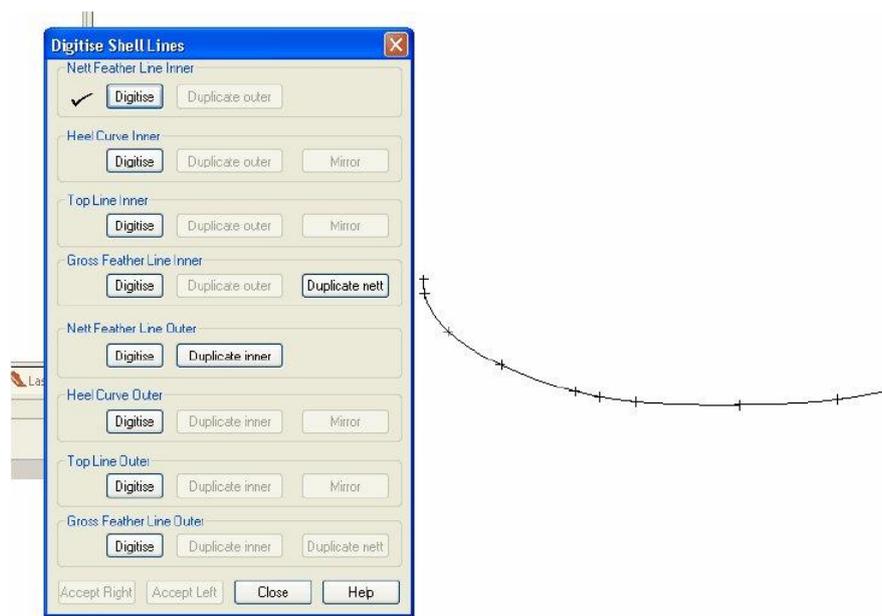


Рисунок 1.13 Экранное окно в процессе оцифровки чертежа с помощью дигитайзера [24]

Ввод информации о готовых шаблонах/лекалах с помощью дигитайзера является традиционным способом. В работе [27] Андреева описывает процесс «сколки» лекал. Оператор, прикрепив лекало к планшету, последовательно указывает точки контура лекала. Чтобы контур воспроизводился с требуемой точностью, необходимо указывать точки на достаточно близком друг к другу расстоянии. Тем же способом оператор вводит в компьютер внутренние контуры, долевы, надсечки, оси симметрии. В разных швейных САПР процесс «сколки» лекал организован с разной степенью удобства. Но в любом случае процесс ручного ввода занимает значительное время в работе конструктора, и может привести к ошибкам [27].

Альтернативный метод ввода лекал/шаблонов выполняется с помощью специальной программы и цифрового фотоаппарата. Шаблоны разделяют на первичные и вторичные: первичные вводят через фотоаппарат, некоторые из них фотографируют по частям. В программе векторизуют контуры шаблонов и на их основе достраивают вторичные линии (оформляют углы, надсечки, долевы, строят припуски, вводят спецификации шаблонов). Заметим, что все САПР обуви поддерживают только автоматический ввод лекал, а не чертежей [28].

Сегодня большинство САПР 2D-моделирования поддерживают автоматический ввод информации, однако он имеет ряд недостатков:

- требует предварительной подготовки: построение дополнительных линий, контрастный фон, обработка сканированного изображения (удаление шума, повышение контраста);
- алгоритм действует для готовых лекал/шаблонов, причем все вторичные линии (припуски, насечки) необходимо ввести после оцифровки» [3] (рис. 1.14).

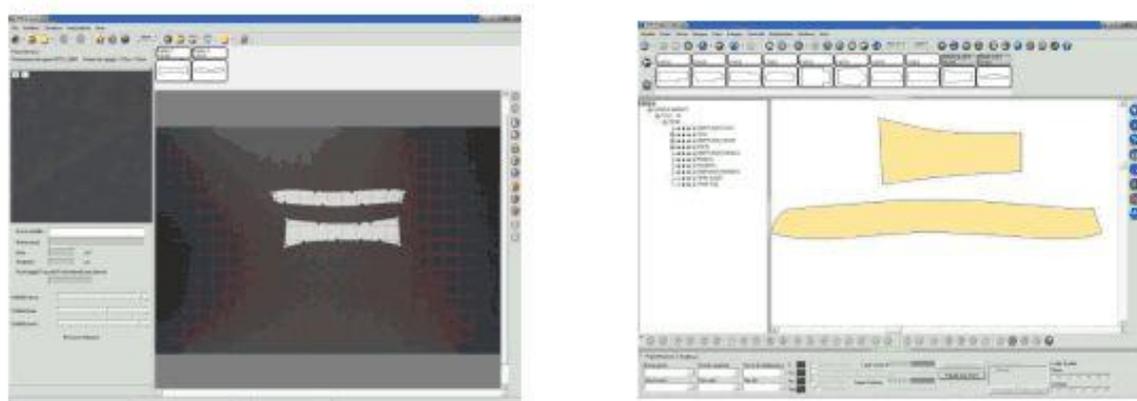


Рисунок 1.14 Оцифровка лекал [29]

Трехмерная модель колодки может быть получена путем сканирования физического прототипа контактной контрольно-измерительной машиной или бесконтактным 3D-сканером и оцифрована в соответствующем модуле [3]. Основная проблема трехмерного проектирования – распластывание оцифрованной 3D колодки. В 1997 Филипп Азариадис (Phillip Azariadis) и Никос Аспагатос (Nikos Aspragathos) предложили метод, который сводит к минимуму эти недостатки, но не устраняет их полностью [30].

Процесс градирования шаблонов в обувной промышленности весьма специфичен: невозможно применить простую функцию масштабирования. Данная особенность появляется в силу технологии производства, анатомического строения стопы и свойств материалов. Таким образом, в модуле «Градация» необходимо предусмотреть правила для формирования шаблонов на разные размеры и полноты, расчет приращений по длине следа и обхвату в пучках:

$$\begin{aligned}
 L_i &= L_{ucx} \pm n \cdot \gamma \cdot L_{ucx} \\
 W_i &= W_{ucx} \pm n \cdot \beta \cdot W_{ucx} \\
 n &= \frac{N_i - N_{ucx}}{\Delta L}
 \end{aligned}
 \quad [31],$$

где L_i , W_i – расчетные значения приращений; L_{ucx} , W_{ucx} – исходные длина и ширина градируемой детали; γ и β – относительные приращения, n – количество размеров в серии; N_i , N_{ucx} – проектируемый и расчетный размеры; ΔL – абсолютное приращение по длине следа [32]. Отметим, что наилучшим представлением информации при градировании является чертеж, т.к. он позволяет учесть взаимосвязи лекал и определить их деформацию. В случае формирования размеров для одной детали используют точки привязки, но могут возникнуть неточности.

Следующий этап в проектировании обуви – раскрой, который также имеет свои нюансы: в качестве материала используют искусственные и натуральные кожи [31]. Для последних наибольшую трудность представляет форма шкуры животного (имеет изрезанные края, в отличие от искусственных материалов) и наличие пороков, неоднородная плотность. Перечисленные недостатки значительно усложняют процесс создания раскладки. Таким образом, в модуле «Раскрой» необходимо предусмотреть следующие функции: оцифровка натуральных кож, определение пороков, построение раскладки (в том числе и все сопутствующие команды), расчет коэффициента использования материала, создание необходимой сопроводительной документации, вывод на печатающее устройство.

Немаловажным этапом создания обуви является процесс сборки заготовки, последовательность действий которого отражена в модуле «Технология». Для изделия необходимо указать последовательность соединения деталей, метод скрепления, количество затрачиваемого материала и т.п [33].

Обзор этапов проектирования обуви позволил создать их структурно-логическую схему (рис. 1.15) и выделить проблемные блоки, требующие доработки (рис. 1.15, розовые).



Рисунок 1.15 Структурно-логическая схема проектирования обуви

Анализ полученной схемы показал, что проблемными блоками являются «Ввод информации», «Проектирование» и «Раскладка» и «Технология». В рамках диссертации будут рассматриваться возможности автоматизации первых двух блоков путем внедрения средств технического зрения. Для большей гибкости системы, лучше сформировать отдельный модуль «Оцифровка» с необходимыми функциональными возможностями, который можно вызывать на разных этапах производства обуви. Выявлено, что нужно разработать математическое описание шаблонов деталей верха обуви для быстрого формирования раскладки.

На основе информации, размещенной на сайтах производителей, составлена таблица САПР обуви, отсортированных по типу проектирования и вводу информации (табл. 1). Из анализа полученной таблицы следует, что:

- зарубежные САПР поддерживают ввод информации с помощью 3D сканеров;
- отечественные САПР ориентированы на работу в 2D-пространстве;
- ввод информации в отечественных САПР осуществляется преимущественно с помощью дигитайзеров;
- известные САПР обуви не поддерживают автоматический ввод чертежей [33].

Таблица 1. Сравнение САПР обуви по типу проектирования и вводу информации

№	САПР	Страна производитель	Тип проектирования	Устройство ввода	Форма исходной информации
1	АСКО-2Д	РФ	2D	Дигитайзер (P*)	Чертеж
2	ShoesModel	РФ	2D	Дигитайзер (P)	Чертеж
3	Ассоль	РФ	2D	«Дигитайзер (P), сканер (ПА), цифровой фотоаппарат (ПА)	Чертеж (P), лекала (ПА)
4	Naxos	Италия	2D,3D	3D- дигитайзер (P), дигитайзер (P)	Колодка
5	ClassiCAD	Чехия	2D	Дигитайзер (P)	Чертеж
6	Crispin	Великобритания	3D	3D сканер (A)	Колодка
7	Shoemaster	Великобритания	3D	3D сканер (P,A)	Колодка
8	Rhinoceros	США	3D	3D сканер (A)	Колодка

*Режим ввода информации: P – ручной, A – автоматический, ПА – полуавтоматический [33].

На качество и скорость проектирования обуви существенное влияние оказывают средства ввода информации. В следующем разделе диссертации рассмотрим современные устройства ввода информации.

1.2. Анализ устройств ввода графической информации в САПР легкой промышленности

В качестве устройств ввода разные САПР предлагают свои варианты. По степени участия человека в процессе считывания устройства ввода графической информации разделяют на полуавтоматические и автоматические [34]. В полуав-

томатических устройства ввода считывание графической информации осуществляется оператором, посредством щупа или визира. Считанные данные принимаются и кодируются электронным блоком [34]. К этому типу устройств относят световое перо, графические планшеты (дигитайзер) и другие манипуляторы. Это далеко не самый быстрый и удобный способ построения чертежей, особенно в случае сложной геометрии [34].

Автоматические устройства ввода используют следящий или развертывающий (сканирующий) метод преобразования. В первом случае рабочий орган отслеживает границу заданной кривой, перемещаясь с постоянной скоростью по оси абсцисс (преобразуемая кривая представляется в виде числовых значений отклонений рабочего органа по оси координат). Во втором – осуществляется сканирование изображения рабочим органом с некоторым шагом по оси абсцисс. При этом фиксируются координаты точек пересечения сканирующего луча с заданной кривой [34]. Этот класс устройств предполагает ввод исходной информации с помощью сканера, цифрового фотоаппарата и видеокамеры.

Для ввода художественной графической информации предназначены **графические планшеты**, основанные на различных принципах действия, при этом основу всех их составляет фиксация перемещения специального пера относительно планшета [35]. Графический планшет состоит из плоской панели, на которой «рисуют» специальным пером (рис. 1.16). «Перо», как правило, радиоуправляемое, чувствительное к давлению, позволяет художнику рисовать жирные или тонкие линии. К основным характеристикам относятся: размер рабочей области, точность ввода, разрешение, скорость считывания, опции для пера. Все современные дигитайзеры поддерживают драйверы WinTab (или аналогичные), совместимые с Windows, при скорости считывания 150 точек в секунду. Разрешение колеблется от 100 до 500 линий на миллиметр. Точность ввода для дигитайзеров, работающих с чертежами форматов 304x304 мм и 304x457 мм, составляет $\pm 0,254$ мм при этом ценовой диапазон варьируется от 39 119 до 82 280 рублей [33].



Рисунок 1.16 Графический планшет

Имеются графические планшеты с большей точностью ввода $\pm 0,051$ мм, но рабочей областью 508x610 мм и стоимостью 405 439 рублей [36]. Очевидно, что с повышением точности ввода и увеличением объема вводимой информации цена на устройство возрастает. При этом качество работы на таких устройствах зависит от опыта оператора [33].

Цифровая фотокамера – это фотоаппарат, использующий для получения снимка массив полупроводниковых светочувствительных элементов, называемый матрицей, на которую изображение фокусируется с помощью системы линз объектива (рис. 1.17). Полученная картинка в электронном виде сохраняется в виде файлов в памяти фотоаппарата или дополнительном носителе. Достоинствами цифровой фотокамеры являются малые габариты и вес, быстрое получение изображений высокого качества [37].



Рисунок 1.17 Цифровая фотокамера

Веб-камера (например, на рис. 1.18) — цифровая видео или фотокамера, способная в реальном времени фиксировать изображения, предназначенные для дальнейшей передачи по сети интернет (в программах типа Instant Messenger или

в любом другом видео-приложении) [38]. Веб-камера может быть либо встроена в компьютер (например, ноутбук), либо подключена через кабель USB.



Рисунок 1.18 Веб-камера

К основным параметрам цифровой фотокамеры относят: количество мегапикселей матрицы, чувствительность к шуму, оптику (наличие асферических и низкодисперсных линз, стабилизатора изображения), частоту кадров, фокусное расстояние. Ценовой диапазон обычных фотоаппаратов составляет 6 000 до 11 000 рублей, для профессиональных – 51 000 [39].

Для создания цифровых копий изображения объекта служит **сканер**. В зависимости от способа оцифровки объекта сканеры подразделяют на планшетные, ручные, листовые, книжные, барабанные, сканеры штрих-кода, 3D-сканеры.

Планшетные сканеры используют массив светодиодов, состоящий из расположенных в ряд приборов с зарядовой связью (ПЗС). ПЗС сами по себе могут только определить наличие или отсутствие света. Чтобы оцифровать изображение необходимо сделать три прохода для красного, зеленого и синего цвета либо установить 3 линии ПЗС для каждого цвета.

Планшетные сканеры более приемлемы с точки зрения сохранности объекта оцифровки, так как не требуют сгиба оригинала вокруг барабана, а также нанесения масла или спрея на изображение. Для оцифровки достаточно просто положить объект лицевой стороной на стекло. Стоимость варьируется от очень низкого уровня для домашних и офисных сканеров вплоть до нескольких тысяч для профессиональных

Оптическое разрешение планшетных сканеров в значительной степени зависит от их стоимости. Для высококачественных устройств порог составляет 5000 пикселей на дюйм, а для домашних и офисных – около 2400 пикселей на дюйм.

3D- сканер — устройство, анализирующее физический объект и на основе полученных данных создающее его 3D-модель, которая в дальнейшем может быть обработана средствами САПР.

Рассмотрим подробно каждый метод сканирования (рис. 1.19).



Рисунок 1.19 Методы сканирования

Принцип *контактного метода* заключается в обводке сканируемого объекта специальным механическим приспособлением – щупом, которое является сенсором. Перед началом сканирования на объект наносится сетка, размер ячеек которой в областях высокой кривизны поверхности должен быть минимальным, а в местах малой кривизны – наибольшим. Посредством щупа оператор производит замер координат точек, в которых пересекаются линии сетки. Современным развитием описанного метода стало использование программно-управляемого датчика. В этом случае отпадает необходимость в ручной обводке и нанесении сетки. Щуп автоматически движется по поверхности объекта и в компьютер заносятся координаты о его положении [40].

Преимущества контактного 3D-сканирования: простота процесса; независимость от условий освещения; высокоточное сканирование ребристых поверхностей и призматических деталей; компактный объём полученных файлов. *Недостатки:* невозможность захвата текстуры сканируемого объекта, сложность или

невозможность сканирования объектов больших размеров, относительно медленное сканирование по сравнению с другими методами, непосредственный контакт щупа с объектом. Применительно к обувной промышленности последний недостаток очень существенен, т.к. в процессе сканирования происходит деформация мягкой тканей стопы, что приводит к искажению измерений [41].

Бесконтактные методы основываются на регистрации отраженных лучей от объекта сканирования. Источником таких лучей является сам 3D-сканер, который может облучать объект направленными световыми, лазерными, ультразвуковыми, рентгеновскими лучами. Принцип действия метода основан на измерении расстояния от сканера до точек объекта сканирования (например, светоотражающие самоклеющиеся маркеры). Объект освещается световыми импульсами, камера считывает отражения и по искажениям получает облик сканируемого предмета [42].

Преимуществами активного метода 3D-сканирования являются низкая стоимость, возможность применения вне помещения, использование при различной освещенности, не требуется наносить сетку на объект, сканирование производится по бесконтактной технологии, возможность оцифровывать объекты недоступные для других методов сканирования [42]. *Недостатки:* сложность или невозможность сканирования прозрачных и зеркальных поверхностей, оцифровка мелкогабаритных изделий требует использования более точной оптики, а соответственно более дорогих 3D-сканеров [42].

В **пассивном методе** анализируется отражение окружающего света от объекта. Большинство из них направлено на обнаружение видимого света, т.к. при этом не требуется специальное оборудование. Кроме того, можно использовать и другие типы излучений, например, инфракрасное. Различают три метода сканирования: стереоскопический, фотометрический и силуэтный. В первом обычно используют две видеокамеры, расположенные на некотором расстоянии друг от друга. Путем анализа небольших различий изображений, полученных от каждой камеры, определяют расстояние до объекта. В фотометрических системах используют одну камеру, но изображение сравнивают при разном освещении. В силуэнт-

ном методе происходит оцифровка объекта на высококонтрастном фоне, с последующим формированием визуальной оболочки объекта. Заметим, что в этом случае невозможно получить точную модель полых объектов.

Все сканеры имеют такие компоненты как оптическую систему, датчик освещенности, интерфейсную систему и драйверы. Разные типы сканеров отличаются связями между компонентами и их устройством. Качество сканирования в первую очередь зависит от качества оптики и детектора света, в то время как производительность зависит от интерфейса и драйверов. К основным характеристикам сканеров относят оптическое разрешение, глубину цвета, скорость печати.

Для сканеров, в которых в качестве датчика используется светочувствительный элемент на микрочипах, **оптическое разрешение** ограничено плотностью датчиков в детекторной матрице и способами перемещения относительно оригинала. Разрешение показывает количество пикселей у фоточувствительной линейки, из которых формируется изображение, измеряется в dpi [43].

«**Глубина цвета**» или «битовая глубина» сканера – число разрядов, используемых для кодирования цвета каждого оцифрованного пикселя. Наибольшая глубина составляет 36-42 бита. В большинстве случаев рисунок с такой разрядностью цвета обрабатывается только внутри сканера, после чего на компьютер передается изображение в 24-битном цвете. Поддержка высокой разрядности цвета позволяет свести к минимуму аналоговые помехи и потери качества при использовании различных алгоритмов преобразования изображения [44].

Другой характеристикой сканера является его **динамический диапазон** оттенков, которые он может дифференцировать в оригинальном изображении, от наиболее ярких до самых темных участков. Вычисляется как десятичный логарифм отношения потока излучения, падающего на объект (I_{in}), к потоку излучения отразившегося от него (I_{out}):

$$D = \lg \frac{I_{in}}{I_{out}} .$$

Динамический диапазон измеряется по логарифмической шкале оптической плотности (OD) от 0,0 (для «идеально» белого) до 4.0 для более насыщенного черного цвета. Для «совершенного» сканера максимальное значение оптической плотности составляет не менее 4.0, но в действительности ни один из сканеров не может приблизиться к этому диапазону. Дешевые планшетные сканеры имеют динамический диапазон 2.5 – 3.0, а самые лучшие барабанные сканеры – до 3.8.

Сканеры являются одним из наиболее распространенных устройств для захвата объектов на плоскости. Цифровые камеры предлагают гибкую альтернативу сканеру и могут быть использованы для захвата больших 2D объектов, таких как карты или хрупкие предметы, которые можно повредить в обычном сканере.

Обзор устройств ввода графической информации позволил составить таблицу 2, в которой приведены сравнительные характеристики цифровой фотокамеры и планшетного сканера.

Таблица 2. Сравнительные характеристики устройств ввода

Характеристика	Дигитайзер	Цифровая фотокамера и	Веб-камера	Планшетный сканер	3D-сканер
Область сканирования	A5-A0	1600x1200 8688x7952	640x480 1280x1024	A6-A0+	от 90x70 мм до 180x140 мм
Скорость оцифровки	100-205 точек/с	0,33-60 кадров/с	9-90 кадров/с	0.8 -2,5 страниц/с	1 000 000 точек/с
Тип входной информации	2D	2D, 3D	2D, 3D	2D	3D
Точность ввода	0,05- 0,76 мм				100 мкм-80 мкм
Тип ввода	P*	A	A	A	P,A
Цена, тыс. руб.	30 и выше	2 -40	0,5-38	2 -450	260 и выше

*Режим ввода информации: P – ручной, A – автоматический

Анализ таблицы 2 показывает, что для предприятий малой мощности наиболее приемлемым устройством ввода чертежей деталей обуви является планшетный сканер. Он не искажает геометрические размеры изображения и выгоден по цене, поскольку совмещает несколько необходимых устройств: сканер, копир и

принтер. Модель, работающую с форматом А4, [33] можно использовать добавив в модуль оцифровки функцию объединения нескольких изображений.

С учетом вышеизложенного на рисунке 1.20 нами предложена усовершенствованная структурно-логическая схема модуля «Оцифровка», приведенная в работе [33]. Модуль допускает:

- интеграцию с известными САПР легкой промышленности;
- поддержку недорогих и распространенных устройств ввода;
- приведение оцифрованного изображения к линейным размерам;
- преобразование растрового представления контуров шаблонов деталей и чертежей конструкций верха в векторное [33].

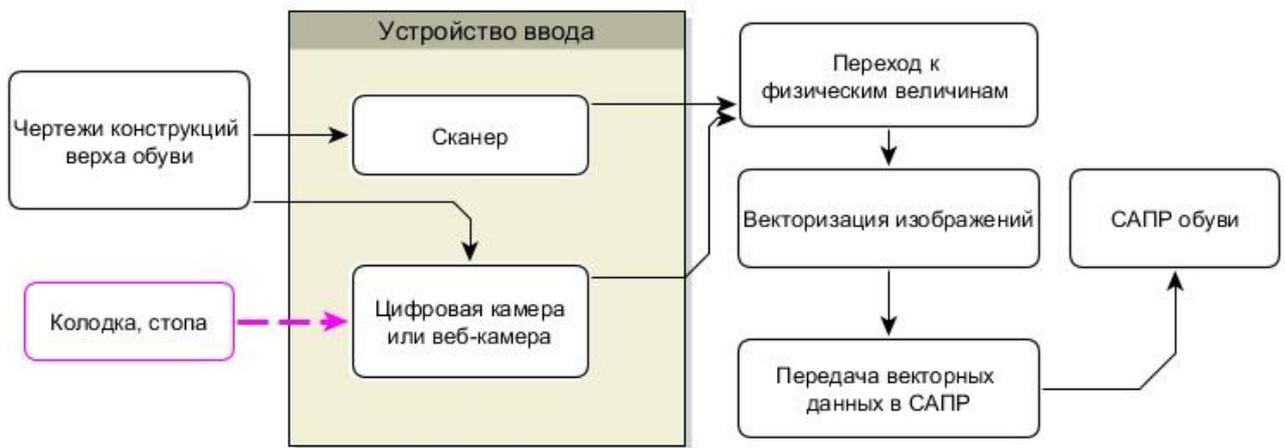


Рисунок 1.20 Структурно-логическая схема модуля «Оцифровка» в САПР обуви [33]

Таким образом, предлагаемая структурно-логическая схема модуля «Оцифровка» реализована в отечественных САПР обуви при использовании планшетного сканера. В качестве дополнительного устройства может служить цифровая фотокамера, калибровка которой осуществляется с помощью библиотеки OpenCV.

Методы преобразования растровой информации о чертежах конструкций верха обуви зависят от устройств регистрации изображений. Ниже нами рассмотрены методы векторизации для выбранных устройств ввода.

Выводы по первой главе

1. Рассмотрены модули конфигураций САПР легкой промышленности. Проведен анализ пакетов программ известных фирм (АСКО-2Д, ShoesModel, Ассоль, Naxos, ClassiCAD, Crispin, Shoemaster, Rhinoceros) и описаны их функциональные возможности. Выявлено, что ввод информации в отечественных САПР обуви осуществляется преимущественно в ручном режиме с помощью дигитайзеров.
2. Анализ рынка САПР показал, что современное программное обеспечение не может полностью решить задачи преобразования растрового представления чертежей конструкций верха обуви в векторное, а автоматизация процесса сдерживается высокой стоимостью оборудования.
3. Выявлена возможность внедрения средств технического зрения в САПР обуви для интеграции с разными модулями. Сформулированы требования для модуля «Оцифровка», который должен обеспечить: интеграцию с известными САПР легкой промышленности; поддержку недорогих и распространенных устройств ввода; приведение оцифрованного изображения к линейным размерам; преобразование растрового представления контуров шаблонов деталей и чертежей конструкций верха в векторную форму.
4. Показано, что сканер является предпочтительным устройством ввода информации о чертежах конструкций верха обуви. Предложено в качестве перспективного устройства получения 3D модели использовать цифровую фотокамеру, смартфон или планшет.
5. Предложена структурно-логическая схема модуля «Оцифровка», которая обеспечивает автоматизированный ввод информации о чертежах конструкций верха обуви в САПР. Выявлено, что нужно разработать метод преобразования растровой информации о чертежах конструкций верха обуви в векторную форму.

2. РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ МОДУЛЯ «ОЦИФРОВКА»

Проектирование обуви требует определенной технологической точности, следовательно, процесс оцифровки колодки, стопы или чертежей конструкций верха обуви необходимо проводить с допустимой погрешностью. Поэтому в разрабатываемом нами блоке «Оцифровка» задачи измерения должны решаться в условиях контроля точности и взаимной геометрии объектов, а также определения всех параметров приемника изображения.

Ни одно из устройств не является идеальным: например, производитель видеокамеры заявляет, что её фокусное расстояние 15 мм, но покупатель не может быть уверен, что оно ровно 15 мм, а не 15,1 или 14,9. Сказанное справедливо и для других геометрических параметров съемки. Аналогично, ни одна сферическая линза не имеет строго сферическую форму. Кроме того, в результате падения фотоаппарата или плохого качества изготовления появляется децентрализация линзы. На практике в процессе оцифровки линейка сканера не совершает идеально плавные, равномерные и параллельные движения, что приводит к появлению дисторсии. Из всего вышеизложенного следует, что в процессе съемки должны быть предусмотрены функции калибровки, устранения искажений и предварительной обработки изображений.

2.1. Особенности векторизации чертежей конструкций верха обуви с использованием средств технического зрения

На качество фотографии влияет количество мегапикселей матрицы цифровой фотокамеры. Определим количество мегапикселей камеры, наиболее пригодное для чертежей деталей обуви (формат А3). Современные фотокамеры допускают разрешение 640x480, однако, оно пригодно для работы с изображениями небольшого формата. Считается, что минимальное количество пикселей на дюйм

для качественной фотографии составляет 240 dpi, лучшее – 300 dpi. Размеры А3 в дюймах 11,7x16,5, тогда умножив их на необходимое разрешение, получим:

$$240 \cdot 11,7 = 2808 \text{ – по } X, \quad 240 \cdot 16,5 = 3960 \text{ – по } Y$$

$$300 \cdot 11,7 = 3510 \text{ – по } X, \quad 300 \cdot 16,5 = 4950 \text{ – по } Y$$

Произведение $X \cdot Y$ показывает требуемое количество мегапикселей для матрицы:

$$2808 \cdot 3960 = 11\,179\,200 \approx 11,2$$

$$3510 \cdot 4950 = 17\,374\,500 \approx 17,4$$

Отметим, что в фотоаппаратах количество эффективных мегапикселей составляет 20.

Важной характеристикой цифрового фотоаппарата является чувствительность к шуму, но её большинство производителей не указывает. Эта характеристика зависит от светочувствительности, измеряемой в ISO, которая показывает способность матрицы к преобразованию светлого сигнала в электрический. С её увеличением возрастает уровень шума, на снимке появляются «зерна». Диапазон чувствительности матрицы обычных фотоаппаратов – 100-1600. Для сравнения: в профессиональных чувствительность достигает 3200.

Во всех электронных устройствах в большей или меньшей степени проявляется такая нежелательная энергия в сигнале, как **шум** [2]. Она может быть вызвана некоторыми издержками в конструкции цифрового фотоаппарата или веб-камеры, в том числе недостаточным экранированием светодиода и использованием более дешевых компонентов. Шум проявляется в цифровом изображении в качестве зернистой шероховатости в области очень низкого сигнала (тени). Визуально это выглядит так же, как зернистость фотопленки. Шум характеризуется несколькими значениями, среди которых среднеквадратическое отклонение и соотношение сигнал-шум (SNR), другие меры, такие как динамический и тональный диапазон, являются производными от них [45].

Уровень «шума» количественно определяют отношением сигнал/шум (S/N), либо вычисляют в децибелах (дБ): $SNR = 20 \log_2 \left(\frac{S}{N} \right)$

Распространенной формой шума при передаче данных является «соль и перец». Поврежденные пиксели либо устанавливаются в максимальное значение (на изображении выглядит, как снег или соль), либо приравниваются к нулю (перец). Шум определяется процентом поврежденных пикселей [46].

Помимо шума на изображениях могут появиться негативные эффекты, связанные с характеристиками регистрирующего устройства. В идеальной оптической системе все лучи света от точки на плоскости объекта будут сходиться в той же точке в плоскости изображения, формируя четкую картинку. Известны несколько факторов, вызывающих различные отклонения лучей: расфокусировка, виньетирование, искажение (дисторсия), астигматизм, кривизна поля, кома, сферическая и хроматические аберрации.

В оптике *расфокусировка* представляет собой аберрацию, при которой изображение находится не в фокусе, поэтому снижается резкость и контрастность. Степень размытия находится в обратной зависимости от значения диафрагмы f : параметры от $f/1.4$ до $f/2.8$ очень чувствительны к расфокусировке и имеют меньшую глубину фокуса, а числа в диапазоне от $f/6$ до $f/11$ дают весьма приемлемые результаты.

Виньетирование – эффект на фотографиях, при котором наблюдается затемнение в углах изображения. Различают 3 типа: природное, оптическое и механическое. Первые два присущи любой конструкции объектива и приводят к постепенному переходу от светлого центра изображения к затемненным углам. Скорректировать природное виньетирование можно с помощью специального градиентного фильтра с затемненным центром. Путем изменения степени открытия диафрагмы удастся избежать оптического виньетирования. Третий тип (механическое) обычно вызывает резкий переход к полностью черным углам. Он появляется из-за неправильной установки фильтров или длинной бленды, которые частично попадают в поле зрения объектива и преграждают путь для наклонно падающего света (рис. 2.1).

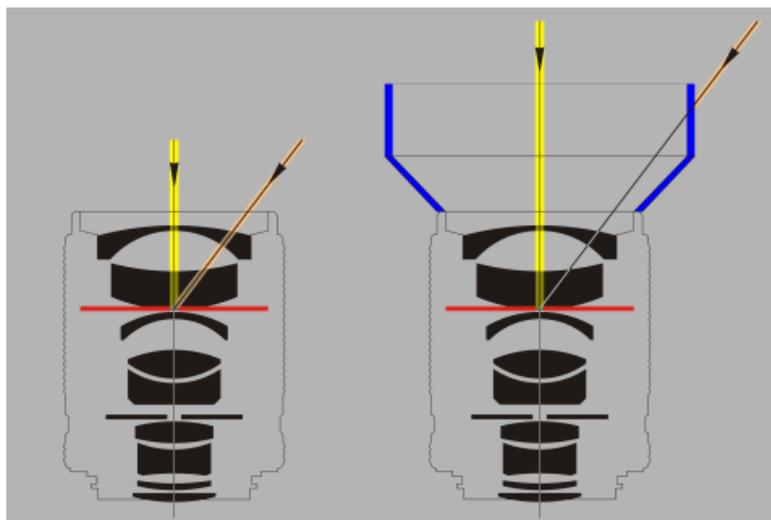


Рисунок 2.1 Пример механического виньетирования: объектив Distagon без и с блендой [47]

Искажение проявляется как ложное положение пикселя по отношению к своим соседям, что вызывает трансформацию прямых линий в кривые. Различают два типа искажений объекта: бочкообразное и подушкообразное [48].

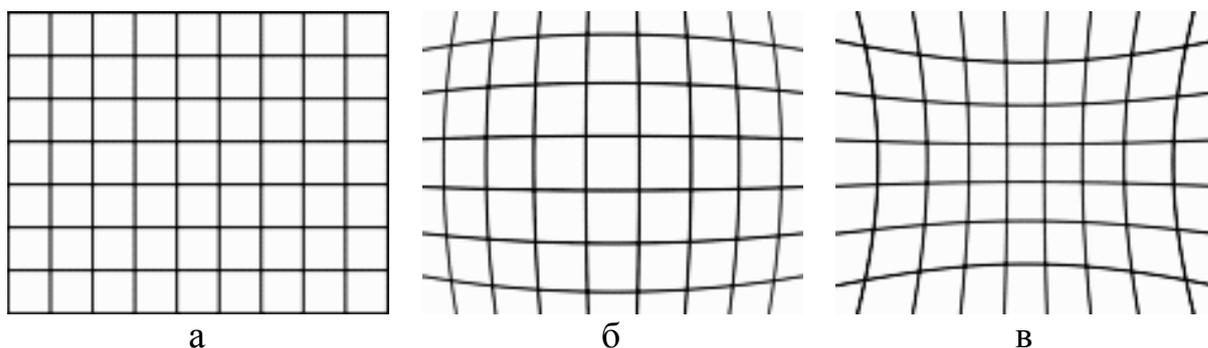


Рисунок 2.2 Примеры искажений: а – без искажений; б – «бочка»; в – «подушка» [48]

Лучше всего искажение заметно на границах изображения, как правило, оно симметрично относительно центра. Однако, линзы могут быть децентрализованы из-за плохого качества изготовления или повреждены.

Астигматизм или **кривизна поля** приводит к пространственному несоответствию реального и цифрового образов: точки в пространстве объекта на фотографии будут дисками вследствие выхода изображения за рамки плоскости. Конструкторы объективов уменьшают астигматизм несколькими способами: изменяют положение диафрагмы, подбирают определенный тип стекла для отдельных

линз. Ещё одно средство – использование плавающих элементов (дифференциальное перемещение одной или нескольких групп линз) в конструкции линз, которые расширяют рабочий диапазон (рис. 2.3).

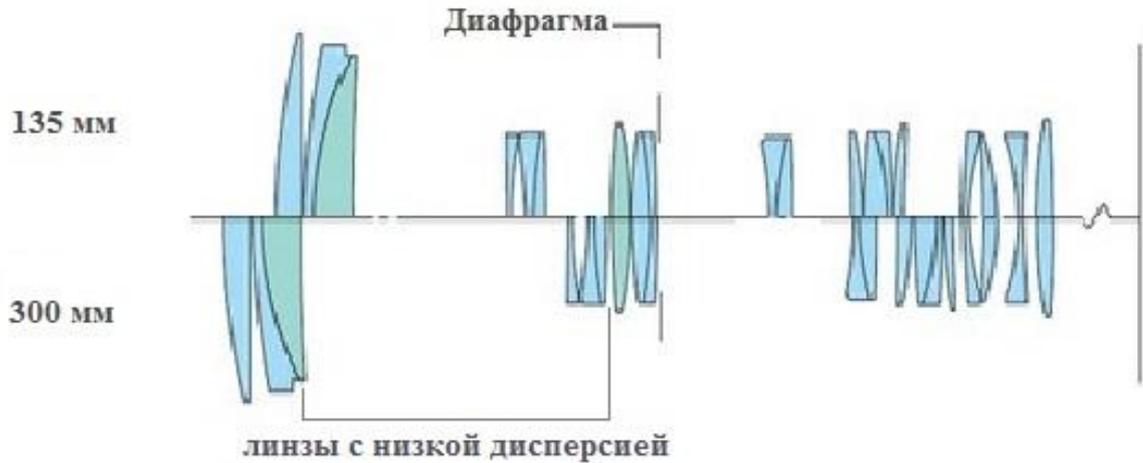


Рисунок 2.3 Примеры системы плавающих элементов

Большинство фотографических объективов состоит из элементов со сферическими поверхностями, которые можно сравнительно легко изготовить, но их форма не подходит для формирования резкого изображения, т.к. подвержена **сферической аберрации**. Положение фокуса зависит от зоны линзы, на которую падает свет: лучи, проходящие вблизи оптической оси, ориентированы в положении С, а, проходящие через края линзы, находятся ближе к объективу А, В (рис. 2.4, а). Поэтому на изображении появляется не точка, а диск с размытыми краями.

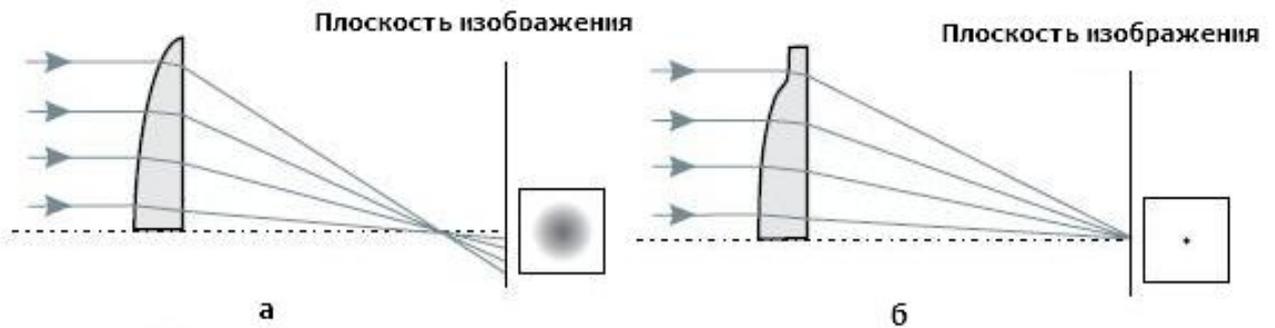


Рисунок 2.4 Сравнение преломления света в линзах: а – сферической б – асферической [49]

Значительное уменьшение сферической aberrации достигается путем комбинирования разных линз, использования асферических (рис. 2.4,б) и плавающих элементов (рис. 2.3). Эффективным способом повышения качества изображения является снижение размера апертуры: диаметр дисков размытия уменьшается пропорционально кубу отверстия диафрагмы.

Коматическая aberrация или *кома* по природе возникновения схожа со сферической, но действует для лучей, проходящих под углом к оптической оси (рис. 2.5). Поэтому на фотографии появляются концентрические окружности похожие на хвост кометы (отсюда и название aberrации). Многие методы, минимизирующие сферические aberrации, также снижают влияние комы. Объектив, свободный от этих дефектов, называется апланат.

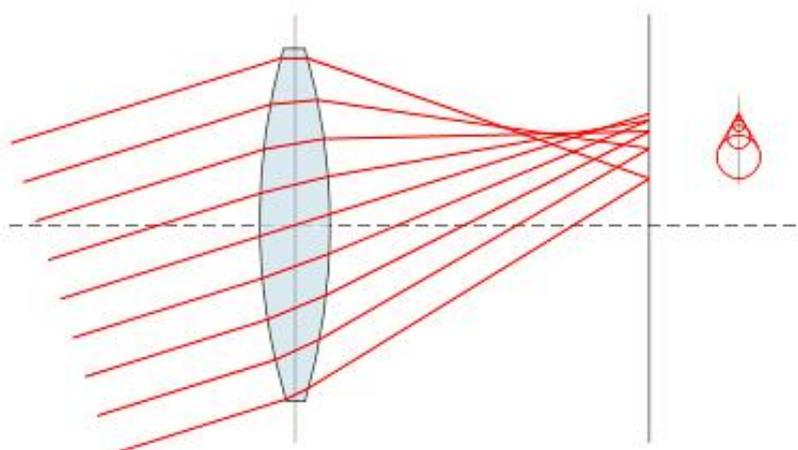


Рисунок 2.5 Кома [50]

Хроматическая aberrация связана с показателем преломления линзы и зависит от длины световой волны. Фокусные расстояния для разных цветов не сходятся в одной точке (рис. 2.6). Поэтому изображения появляются с окантовкой (синяя, красная, желтая, зеленая, фиолетовая, пурпурная) на границах перепада яркостей. Различают продольную (осевую) и поперечную (боковую) хроматические aberrации. Первая характеризуется неспособностью линзы сфокусировать на оптической оси разные цвета в одной плоскости (рис. 2.6,а). При наклонном падении света возникает поперечная хроматическая aberrация: все цвета фокусируют-

ся в одной плоскости, но на разном расстоянии от оси, что приводит к увеличению изображения в зависимости от длины волны (2.6,б).

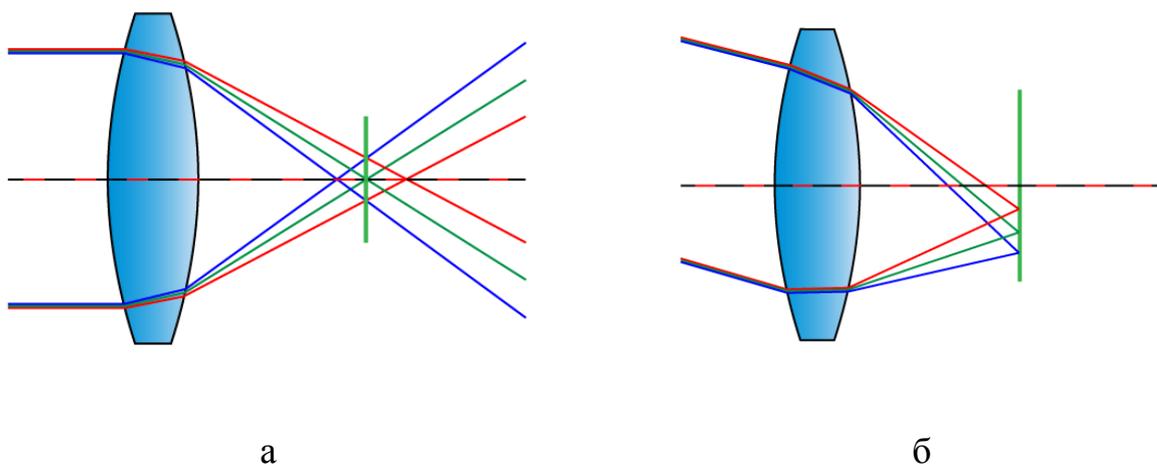


Рисунок 2.6 Пример хроматических aberrаций: а – продольная; б – поперечная [51]

Обе хроматические aberrации могут привести к цветным краям, но проявляются по-разному:

- при осевой – полосы появляются вокруг объектов, в то время как боковая влияет только на касательные линии;
- боковая – отсутствует в центре изображения и видна только на периферии, а осевая может возникнуть в любом месте.

Продольную исправляют, прикрывая диафрагму, а поперечные можно устранить или уменьшить только программными средствами. Асферические линзы встроены практически в каждую модель, низкодисперсные встречаются очень редко и то лишь в профессиональных фотоаппаратах. Отметим, что характеристики цифровой камеры постоянно улучшаются, кроме того её можно использовать для сканирования 3D объектов. Поскольку устройство не взаимодействует с предметом, то в случае оцифровки, например, стопы человека, не произойдет деформаций. К тому же элементы матрицы фотокамеры регистрируют отражение видимого от объекта света, что позволяет оцифровать светоотражающие поверхности (кожа человека). Имеется ряд программ и плагинов, позволяющих произвести определенные настройки для цифровой камеры. Однако, они рассчитаны не на

все фотоаппараты и камеры. Таким образом, возникает задача разработки приложения калибровки устройства ввода. Для этого в качестве инструментов разработки можно использовать OpenCV, PCL (Point cloud library), OpenNI, Microsoft Kinect SDK (табл. 3) [33].

Из таблицы 3 видно, что наилучшим средством обработки чертежей является OpenCV, а Microsoft Kinect SDK следует применять для получения 3D модели.

Таблица 3. Сравнение средств разработки

Признак	Средства разработки			
	OpenCV	PCL	OpenNI	Microsoft Kinect SDK
Лицензия	Открытая	Открытая	Открытая	Закрытая
Платформы	Windows, Mac OS, Linux, Android и IOS	Linux, OS X и Windows, Android	Linux, OS X и Windows	Windows
Языки программирования	C/C++, Java, Python и другие	C++	Python, C, C++, C#, Java, Lisp и другие	C++, C# или Visual Basic
Документация	Форум, примеры с исходным кодом	Форум, примеры с исходным кодом	Сообщество	Форум, примеры с исходным кодом
Калибровка	Имеет специальные функции для калибровки	Нет	Необходимо откалибровать	Параметры устройства записаны изначально

Библиотека OpenCV (Open Source Computer Vision Library) распространяется с лицензией BSD и открытым программным кодом. Она постоянно дорабатывается, поддерживает разные программные языки, включая C/C++, Java, Python. На сайте библиотеки доступны версии для нескольких операционных систем: Windows, Mac OS, Linux, Android и IOS [52]. Имеется подробная документация, примеры, множество форумов и книг по использованию OpenCV. Спектр функциональных возможностей библиотеки обширен: обработка и очистка изображений, распознавание образов, захват видео, калибровка камер, применение морфологических операторов, работа с матрицами и др. Примечательно, что разработчиком библиотеки является Российская компания Itseez [33]. Рассмотрим методы калибровки камеры.

Калибровка камеры в компьютерном зрении позволяет извлечь метрическую информацию из 2D изображений. Согласно размерности объектов калибровки, можно выделить четыре метода: 3D, 2D, 1D и автокалибровка (0D). В первом методе для калибровки используют объект, геометрия которого в 3D-пространстве точно известна. Обычно он состоит из двух или трех ортогональных плоскостей с нанесенными размерами. При этом требуется дорогое аппаратное оборудование и тщательно подготовленный макет. В калибровке на основе 2D исследуют плоскую модель при разных ракурсах. Этот метод проще, поскольку не требует разработки сложного макета. Линейная калибровка предполагает наблюдение за объектом, состоящим из равноудаленных точек. Автокалибровка может рассматриваться как 0D подход, так как работает с точками имеющегося изображения. Поскольку анализируется информация от одной и той же камеры с одинаковыми параметрами, то достаточно трех изображений (с разных точек обзора) одной сцены, что бы восстановить 3D объект. Хотя метод не требует макета, но необходим расчет большого количества параметров, что приводит к сложной математической задаче.

Отметим, что ни один из перечисленных методов не является универсальным, поэтому в каждом конкретном случае руководствуются следующими рекомендациями:

- Если есть возможность сделать предварительную калибровку, то лучше использовать любой подходящий из методов 1-3D. Поскольку точность 0D ниже и требует вычисления большого количества параметров.
- Выбор между 3D, 2D и 1D. Трехмерная калибровка используется, когда необходима высокая точность и имеется возможность создания хорошего 3D макета. Однако, 2D наиболее популярна, т.к. в большинстве случаев показывает достаточно приемлемые результаты. Метод 1D относительно новый и применяется для калибровки нескольких камер (одна находится впереди, а другая сзади объекта) [53]. В этом случае все камеры должны наблюдать одну точку, что едва возможно в 3D и 2D (при условии, что модель непрозрачная).

На рисунке 2.7 представлена схема работы камеры. Проекция 3D точки M формируется на плоскости изображения в m посредством прохождения луча через оптический центр C . Три точки M , m , C лежат на одной прямой. Соотношение между M и m следующее:

$$sm = \underbrace{A[R \ t]}_P M = PM \quad [54], \quad (2.1)$$

где s – произвольный коэффициент пропорциональности; (R, t) – внешние параметры, связывающие мировую систему координат с системой координат камеры;

$A = \begin{bmatrix} \alpha & \theta & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ – матрица внутренних параметров камеры; (u_0, v_0) – координаты

точки m ; α и β – коэффициенты пропорциональности осей изображения; θ – параметр, описывающий искажение [54].

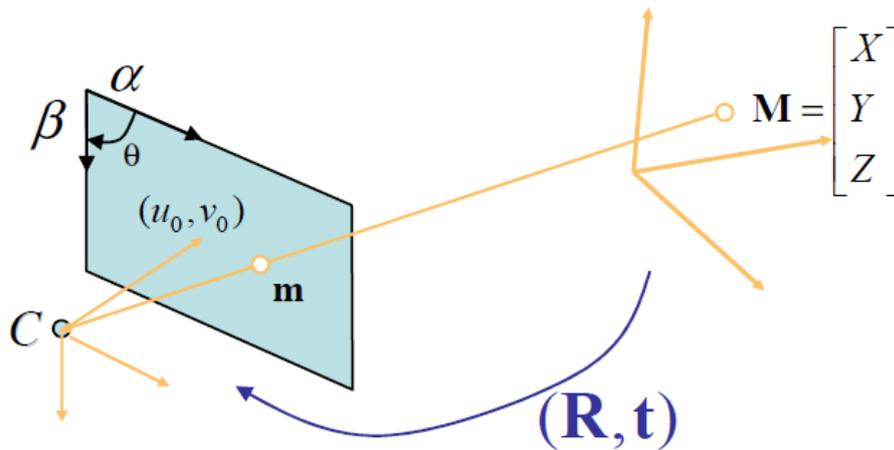


Рисунок 2.7 Схема работы камеры [55]

Задача калибровки камеры состоит в том, чтобы определить параметры преобразования между объектом в 3D пространстве и 2D плоскости изображения:

- внешние параметры: ориентация/вращение и местоположение/смещение камеры, т.е., (R, t) ;
- внутренние $(\alpha, \beta, \theta, u_0, v_0)$.

Матрица вращения, хотя и состоит из 9 элементов, но имеет 3 степени свободы, у вектора смещения t , характеризуется 3 параметрами. Из вышеизложенного следует, что необходимо найти 6 внешних и 5 внутренних параметров.

Для учета радиальной дисторсии используется следующая формула:

$$\begin{aligned}x_{\text{исп.}} &= x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \\y_{\text{исп.}} &= y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \quad [54]\end{aligned}$$

Таким образом, координата исходной точки (x, y) корректируется в позицию ($x_{\text{исп.}}$, $y_{\text{исп.}}$) по скорректированному выходному изображению. Наличие радиальной деформации проявляется в виде «бочки» или эффекта «рыбий глаз».

Тангенциальное искажение может быть исправлено с помощью формул:

$$\begin{aligned}x_{\text{исп.}} &= x + [2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2)] \\y_{\text{исп.}} &= y + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy]\end{aligned}$$

В результате эксперимента нами определены внешние, внутренние параметры и коэффициенты дисторсии (табл. 4) трех устройств смартфона, планшета и web-камеры. В процессе калибровки использовались снимки шахматной доски (рис. 2.8), при этом для планшета потребовалось 16 фотографий, телефона – 20, web-камеры – 13. Подобное объясняется тем, что планшет и web-камера находились на устойчивой поверхности, а возможности жестко закрепить телефон не было.

Таблица 4. Коэффициенты дисторсии для 3 камер

Коэффициент дисторсии	Устройство		
	Web-камера	Телефон	Планшет
k_1	0.027741	-0.07944	-0.09688
k_2	-0.2773	1.247024	1.349526
k_3	-0.01745	-0.00548	0.009495
p_1	-0.00154	0.002687	-0.01241
p_2	0.591751	-5.12977	-3.86345

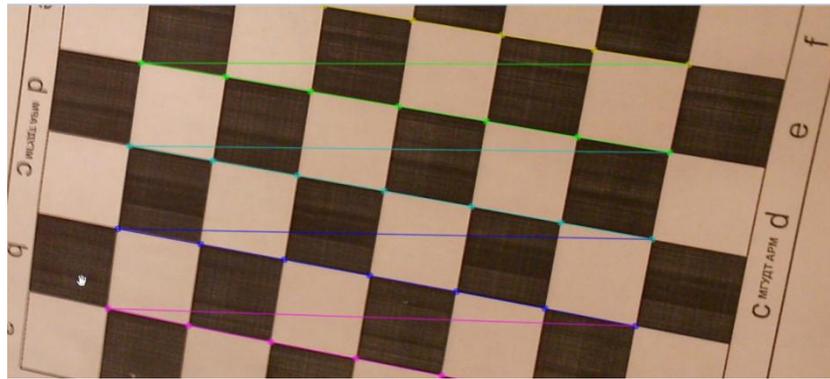


Рисунок 2.8 Калибровка камеры

С помощью функций OpenCV найдены параметры камеры, коэффициенты дисторсии и координаты точек углов шахматной доски. По формуле (2.1) вычислили координаты и построили поверхности (рис. 2.9)

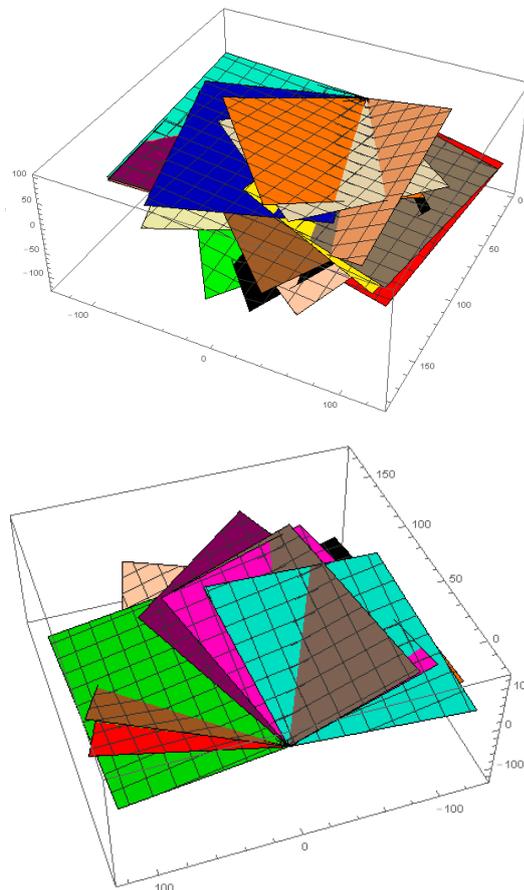


Рисунок 2.9 Экспериментальная визуализация шахматных досок

Рассмотрим в качестве устройства ввода сканер. Нас интересуют такие его характеристики как: разрешение, скорость оцифровки, формат оригинала. Выше было показано, что для получения качественной цифровой формы чертежа, количество точек на дюйм должно быть не меньше 240. Современные сканеры обла-

дают гораздо большим разрешением: 2400 dpi. Скорость сканирования в зависимости от модели устройства и типа изображения варьируется от 0,8 до 2,5 страниц в минуту. Приведем список форматов, типы печати и их стоимость:

- А3, черно-белая лазерная печать от 15 000 руб.;
- А3, цветная струйная печать от 11 599 руб.
- А3, цветная лазерная печать от 77 500 руб.;
- А4, черно-белая лазерная печать от 5 000 руб.;
- А4, цветная струйная печать от 3 500 руб.;
- А4, цветная лазерная печать от 12 000 руб. [39].

Поскольку качество работы сканера обычного и в составе многофункционального устройства (МФУ) не отличается, то предпочтительнее выбрать в разрабатываемом модуле «Оцифровка» сканер в составе МФУ.

Необходимо установить соответствие экранных миллиметров графической оболочки и пикселей изображения по результатам считывания основных параметров полученного изображения после сканера или цифровой камеры, и преобразовать размеры методами растяжения и сжатия.

Произвести переход к физическим величинам для чертежа, полученного с помощью цифровой камеры или фотоаппарата, можно двумя способами:

- зафиксировать устройство регистрации, вычислить его положение в пространстве. Размеры полученного снимка находят по геометрическим формулам;
- положить рядом с чертежом линейку или указать контрольные точки, по которым будет осуществляться переход к физическим величинам.

В обоих случаях получают информацию о количестве пикселей на дюйм. Второй вариант не требует калибровки камеры каждый раз, когда необходимо зарегистрировать изображение, однако, результаты будут менее точными.

При работе со сканером следует руководствоваться информацией, хранящейся в bmp файле. В таблице 5 приведена его краткая структура, а в Приложение А – полная. Посредством функций API (Application Programming Interface) фор-

мируют структуру для считывания полей файла, записывают в них данные о горизонтальном и вертикальном разрешении.

Перевод к нужным единицам измерения (дюймы, сантиметры, миллиметры) осуществляют, используя пропорцию.

Следующий блок модуля «Оцифровка» предполагает преобразование растрового представления чертежа конструкций верха обуви в векторное. Этот процесс предполагает предварительную обработку изображения и его векторизацию.

Таблица 5. Краткая структура bmp файла

Название	Описание
bfType	Подпись, должны быть 4D42 в шестнадцатеричной системе
bfSize	Размер BMP-файла в байтах
biWidth	Ширина изображения в пикселях
biHeight	Высота изображения в пикселях
biBitCount	Количество бит на пиксель (1, 4, 8, 24 или)
biXPelsPerMeter	Горизонтальное разрешение в пикселях на метр
biYPelsPerMeter	Разрешение по вертикали в пикселях на метр

2.2. Экспериментальная векторизация чертежей конструкций верха обуви с использованием цифрового фотоаппарата и сканера

С математической точки зрения, цифровое изображение характеризуется: $\{x, y\}$ – координатами пикселя, I – интенсивностью или яркостью. Множество подходов к улучшению изображения можно разделить на две большие категории: методы обработки в пространственной области (пространственные методы) и методы обработки в частотной области (частотные методы). Термин пространственная область относится к самой плоскости изображения, и данная категория объединяет подходы, основанные на прямом манипулировании пикселями изображения. Методы обработки частотной области основываются на модификации сигнала, формируемого преобразованиями Фурье [56]. Кроме того, применяются технологии, базирующиеся на различных комбинациях методов и их категорий .

В процессе обработки изображение проходит несколько этапов (рис. 2.10). Первый связан с регистрацией, наиболее подробно рассмотрен выше, поскольку затрагивает устройства ввода информации. Далее следует улучшение изображения и шумоподавление. В процессе цветовой обработки производят преобразование в монохромное (серое), бинарное или работают непосредственно с цветом: осветляют, добавляют оттенки или разбивают на каналы: (красный, синий, зеленый) и работают с каждым отдельно [57]. Более сложные этапы – морфологические преобразования, сегментация и выделение контуров и границ – позволяют подчеркнуть необходимые детали на изображении, отделить объект от фона и получить векторное представление объекта. Ниже опишем перечисленные этапы обработки изображений и рассмотрим соответствующие алгоритмы.



Рисунок 2.10 Этапы обработки изображения

Контраст является важной характеристикой, так как показывает разницу в яркости или уровнях серого в изображении, и определяется как соотношение максимальной интенсивности к минимальной. Методы повышения контрастности на-

правлены на расширение диапазона значений яркости таким образом, чтобы легче интерпретировать изображение [58].

Для повышения контраста изображения используются методы линейного растяжения, нормализации и эквализации. Самым простым из них является первый. Идея заключается в следующем: найти минимальное f_{\min} и максимальное f_{\max} значения яркости и на основе этих значений растянуть диаграмму. Вычисление новых значений яркости для пикселей происходит по формуле $g_i = a + b f_i$,

, коэффициенты a и b находят из уравнения
$$\begin{cases} 0 = a + b f_{\min}, \\ 255 = a + b f_{\max} \end{cases}$$
. Метод нормализа-

ции предполагает растяжение не всего диапазона, а наиболее информативного участка, т.е. исключает те значения яркости, для которых количество пикселей меньше определенного значения. Обычно процент таких значений не превышает 5%. Исходя из новых значений (f_{\min} и f_{\max}) вычисляют коэффициенты a и b .

Метод эквализации предполагает, что гистограмма результирующего изображения будет равномерной, т.е. количество пикселей, которое вычисляют по формуле $n = N \cdot M / J$, где N и M – размеры исходного изображения, J – количество цветов в результирующей картинке, для каждого уровня яркости примерно одинаково. Таким образом, зная пороговое значение пикселей на каждом уровне, их количество равномерно распределяют по гистограмме.

Еще один алгоритм равномерного распределения гистограммы яркости разработал в 1979 Нобуки Отцу, позже он был доработан для цветных изображений. Идея алгоритма для черно-белой картинки заключается в следующем: построить гистограмму, вычислить частоты ω_i и средние уровни яркости μ_i для двух классов, затем найти дисперсию: $\sigma_i(t) = \omega_1(t)\omega_2(t)[\mu_1(t) - \mu_2(t)]^2$ [59]. Если полученное значение больше порога, то его сохраняют. В результате находят максимальное пороговое значение, которое позволяет оптимально произвести пороговую обработку [60].

Проведенные эксперименты позволили установить пороговые значения по методу Отцу после процедуры эквализации и для изображения в оттенках серого (рис. 2.11). В первом случае средняя величина порога составляет 127,4, при дисперсии 38,8, а во втором – 194,2, дисперсия – 21,2.

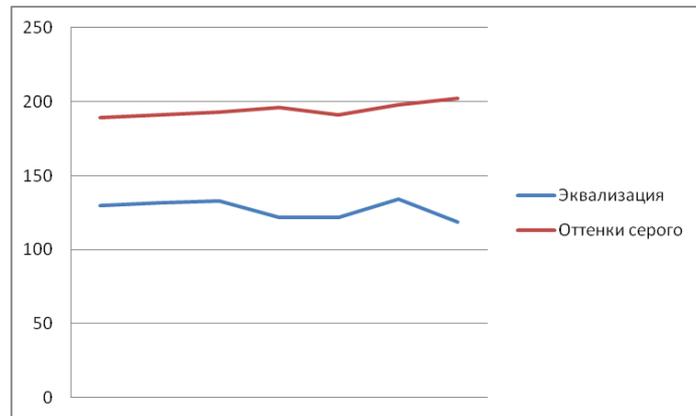


Рисунок 2.11 Пороговые значения изображений по методу Отцу
Выявилось, что приведение к равномерной гистограмме негативно сказывается на качестве чертежа, т.к. появляются помехи и лишние детали (рис. 2.12). На основе Полученные данные показывают, что рекомендуется использовать метод Отцу для изображений в оттенках серого.

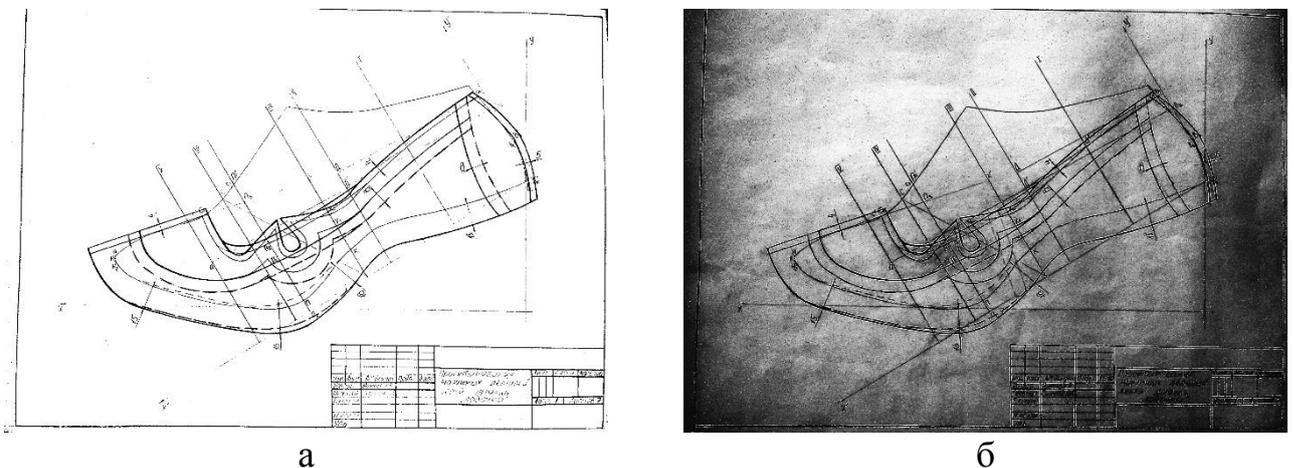


Рисунок 2.12 Преобразования изображения: а – в оттенки серого; б – эквализация

Гамма-коррекция позволяет изменить яркость изображения: $I_{out} = A I_{in}^\gamma$, где I_{in} – исходное, а I_{out} результирующее изображение, γ – коэффициент коррекции (при 1 – оригинал, 0.5 – светлое изображение, 2 – темное).

Более сложными методами улучшения качества изображения считаются по-

вышение резкости, преобразование в монохромное и бинарное, пороговая обработка.

Повышение резкости осуществляется с помощью фильтра в виде матрицы $\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 10 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$. Каждый пиксель исходного изображения умножают на эту матрицу. Можно привести много аналогичных фильтров, различающихся лишь размерностью (3x3, 5x5, 7x7) и коэффициентами. Многие из них используются в современных программах для обработки изображений.

Большинство алгоритмов сегментации и скелетизации работают с монохромными или бинарными изображениями. Алгоритмы их получения основаны на построении гистограммы яркости и пороговой обработке: методы Нобуки Отцу и Бернсена, бинаризация с нижним порогом и др. Наиболее тривиальным является последний: пикселю больше определенного значения присваивают 0, а остальным 255. В методе Бернсена по изображению прогоняют матрицу (3x3, 5x5 обязательно нечетное число), вычисляют среднее максимального и минимального значений яркости пикселей, попавших в матрицу. Полученную величину (A_{gv}) сравнивают с пороговой (E), если $A_{gv} < E$, то текущий пиксель становится черным, в противном случае – белым. Частным случаем монохромного изображения является серое, которое можно вычислить по формулам:

$$Gray_{ij} = 0.3R_{ij} + 0.59G_{ij} + 0.11B_{ij}$$

$$Gray_{ij} = \frac{(R_{ij} + G_{ij} + B_{ij})}{3},$$

где R_{ij}, G_{ij}, B_{ij} – красная, зеленая и синяя составляющие цвета [61].

Следующий уровень обработки изображений связан с обнаружением характерных точек, границ объектов и векторным описанием.

В процессе распознавания необходимо выделить на изображении участки, обладающие наибольшей информативностью, при этом они должны быть инвариантны к геометрическим преобразованиям и изменению яркости, максимально

уникальны, небольшого размера [62]. Аналогичную задачу человек решает, собирая пазл. На рисунке рис. 2.13 показано 3 группы фрагментов: а – не представляют собой особой информации, поскольку однозначно установить их положение трудно, б – особые участки, которые легко найти, в – краевые, позиция определяется перебором из небольшого числа вариантов.



Рисунок 2.13 Примеры фрагментов изображения а – трудно находимые; б – информативные; в – краевые

Одним из первых детектор обнаружения характерных фрагментов предложил в 1981 году Ханс Моравек (Hans Moravec) [63]. Однако алгоритм имел ряд недостатков: не инвариантен к повороту и чувствителен к шуму. В дальнейшем предлагались улучшенные варианты этого детектора, например Крисом Харрисом (Chris Harris) и Майком Стивенсом (Mike Stephens)[64]. В основе идеи – факт, что около углов яркость изображения изменяется во всех направлениях, математически это можно записать следующим образом:

$$E(x, y) = \sum_{u, v} w(u, v) [I(u + x, v + y) - I(u, v)]^2, \text{ где}$$

$I(x, y)$ – интенсивность в точке x, y , u, v – сдвиг, $w(u, v)$ – функция Гаусса.

$I(u + x, v + y)$ можно разложить в ряд Тейлора, которое записывается в матричном виде:

$$E(x, y) \approx (x, y) M \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = (x, y) \sum_{u, v} w(u, v) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix}, \text{ где}$$

$I_x I_y$ – производные изображения в направлениях x и y соответственно. Далее определяют собственные значения матрицы M λ_1 и λ_2 и оценивают их:

- если λ_1 и λ_2 большие и положительные, то область является углом;
- когда $\lambda_1 \gg \lambda_2$ или наоборот, то обнаружен край;
- при малых значениях λ_1 и λ_2 , область однородна.

Харрис и Стивенс предложили функцию оценки фрагмента изображения:

$$R = \lambda_1 \lambda_2 - k(\lambda_1 - \lambda_2)^2,$$

где k – константа, определяемая опытным путем, порядка 0,04-0,06. Для угловых точек R принимает большие значения; на границах $|R| \gg 0$ и $R \ll 0$; при $R \approx 0$ область однородна. Описанный детектор не инвариантен к изменению масштаба. Этого недостатка лишен алгоритм SIFT (многомасштабное представление изображений), предложенный в 1999 канадским ученым Дэвидом Ловом (David G. Lowe) [65], а в 2004 он же опубликовал доработанный вариант [66]. Исходное изображение представляют в виде пирамиды (рис. 2.14) и математически записывается следующим образом:

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y), \text{ где}$$

* – оператор свертки, $G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2}$ – функция Гаусса, σ – радиус размытия.

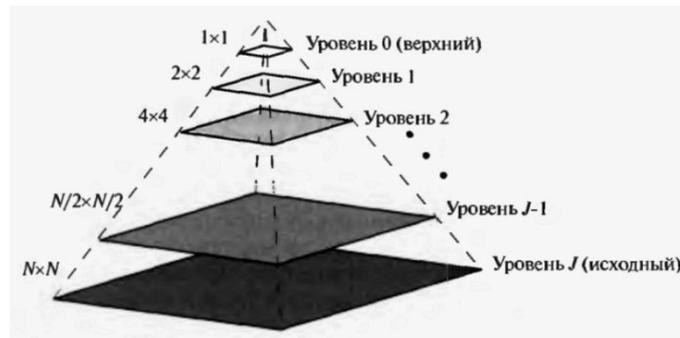


Рисунок 2.14 Пирамида изображений [56]

Далее находят разность двух гауссовских изображений с разными радиусами размытия: $D(x, y, \sigma) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma)$. На следующем этапе вычисляют локальные экстремумы в пространстве и масштабе (рис. 2.15), всего 26 пикселей для квадрата 3x3. Если получают значение, меньше порогового, то его отбрасывают (точка не характерная). Заключительный шаг – построение матрицы Гессе (H)

размерностью 2×2 для найденных экстремумов. Если для точки выполняется условие: $\frac{tr(H)^2}{Det(H)} < \tau$, где τ – некоторый порог, то она является ключевой.

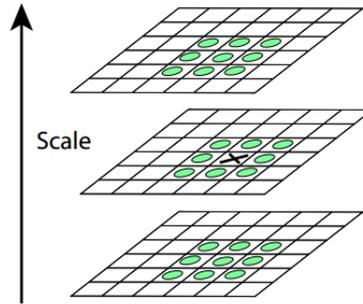


Рисунок 2.15 Сравнение локальных экстремумов в пространстве и масштабе [66]

В 2008 Гербет Бэй (Herbert Bay), Андреас Эсс (Andreas Ess), Тина Тутеларс (Tinne Tuytelaars) и Люк Ван Гоол (Luc Van Gool) предложили ускоренный алгоритм обнаружения устойчивых признаков SURF [67]. В основе та же идея представления пирамиды изображений, но с использованием прямоугольного фильтра, что позволило быстро и легко вычислять свертку изображения, т.к. фильтр содержит целые числа. Кроме того, появилась возможность производить параллельно расчеты для разных масштабов (рис. 2.16). Принадлежность точки к ключевой фиксируется с помощью усовершенствованной матрицы Гессе (Fast-Hessian): $\det(H_{approx}) = I_{xx}I_{yy} - (0.9I_{xy})^2$. Инвариантность к повороту для найденной точки определяется с помощью вейвлета Хаара [68]. Недостатком являются зависимость от фона, плохая работа для простых объектов, производительность по времени.

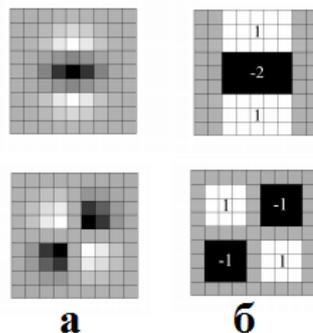


Рисунок 2.16 Сравнение фильтров: а – Гаусса; б – прямоугольного [67]

В процессе ввода информации о чертежах конструкций верха обуви возникает необходимость соединить две (или несколько) части в единый файл. В этом случае характерные точки позволяют «склеивать» несколько изображений (рис. 2.17).

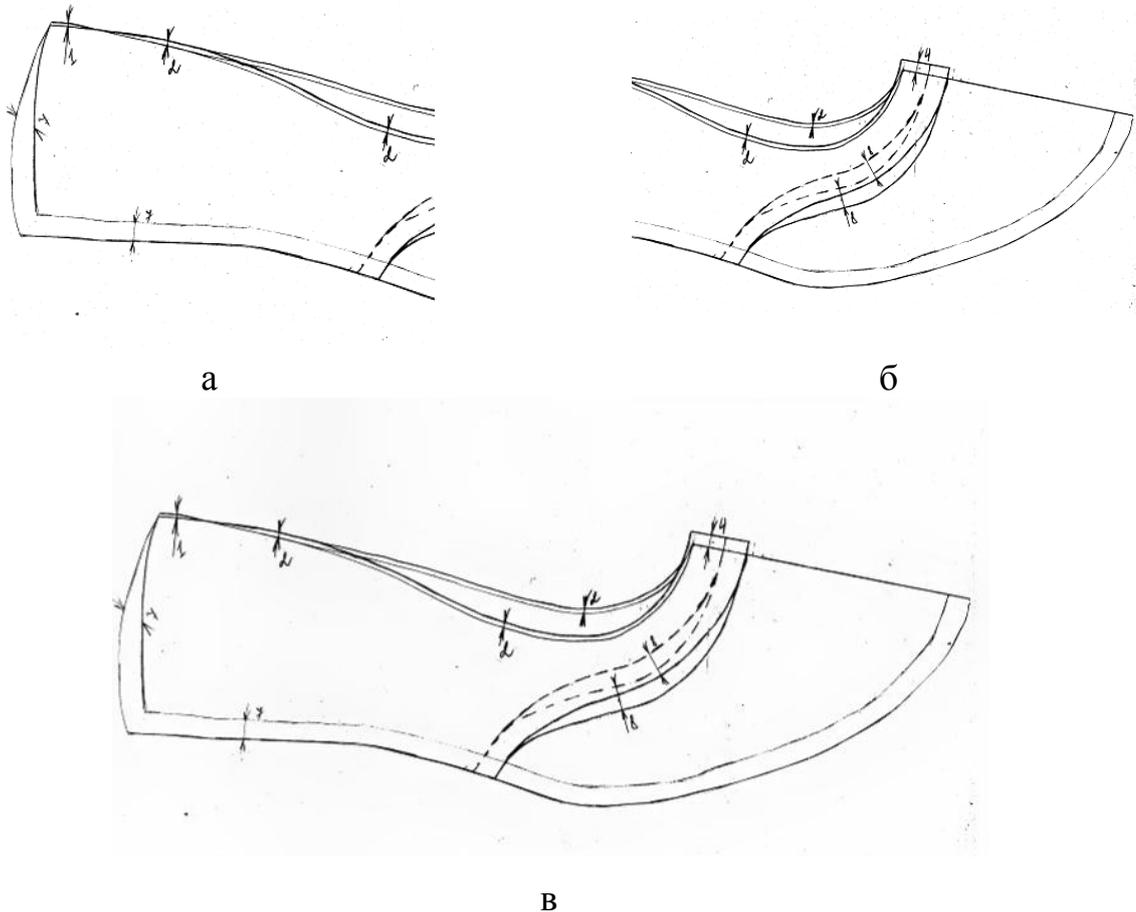


Рисунок 2.17 «Склеивание» изображений по характерным точкам:

а, б – исходные; в – результат объединения

Четкое отделение границ относят к методам сегментации изображения, которые являются сложными и одновременно главными в процессе распознавания образов. Неточности, допущенные на этом этапе, приводят к не правильной классификации объектов, и как следствие, к ошибочным результатам. Разработано несколько алгоритмов сегментации, но ни один из них не является универсальным, поэтому в разных областях применяют их модификации [69].

Гонсалес и Вудс выделяют два метода отделения границ, основанные на:

1. резком изменении яркости на границе объекта и фона;

2. допустимом изменении в пределах определенного значения.

В алгоритмах первой группы используют теорию математической морфологии, сформулированную в 1964 году в работе Жоржа Матерона и Жана Серры. В последующие годы эту теории корректировали и дополняли. В течение 1960-х и большей части 1970-х годов в морфологии рассматривались только чёрно-белые (бинарные) изображения. В этот период создано большое количество бинарных операторов и методов: расширение, эрозия, открытие, закрытие, скелетизация» [69] (рис. 2.18).

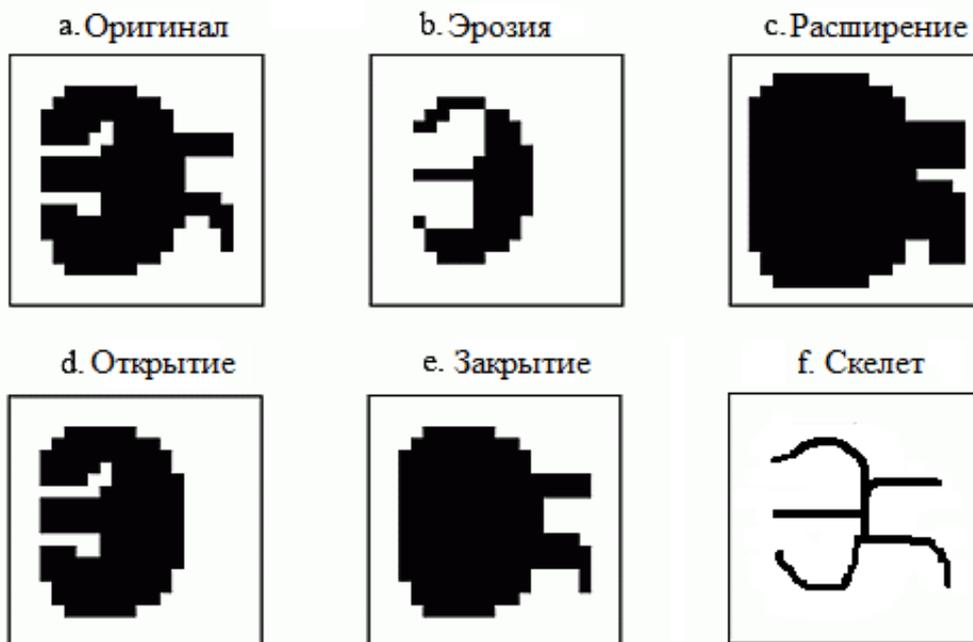


Рисунок 2.18 примеры морфологических операторов [70]

Объект в бинарном изображении состоит из группы связанных пикселей, рассматривают два типа областей: 4-связные и 8-связные. Процесс морфологической обработки сводится к определению принадлежности пикселя к фону или объекту. Достигается это путем применения определенных морфологических операций и структурного элемента, который представляет собой массив пикселей, содержащих значения 1 или 0 (сродни маленькому бинарному изображению).

С середины 1970-х до середины 1980-х годов морфологию обобщили на изображения в оттенках и разработали новые операторы, такие как морфологиче-

ские градиенты и водоразделы [69]. Морфологический градиент вычисляют по следующей формуле: градиент = расширение – эрозия. В результате этого преобразования получают границу объекта, а методом водораздела отделяют объект от фона, построенном на принципе погружения. К недостаткам можно отнести чувствительность к шуму и порождение большого количества сегментов [71].

К моменту появления алгоритма водораздела в области обработки изображений сформировалось достаточно методов, значительно подавляющих уровень шума. В 1942 г. Норберт Винер разработал алгоритм, отделяющий полезный сигнал от помех. Однако, при создании этого метода ученый использовал ряд допущений:

1. линейность системы с константными параметрами;
2. время работы неограниченно;
3. исходящие и входящие сигналы непрерывны.

Перечисленное не позволяет произвести эффективную очистку изображения от шума, поэтому с 55-х годов появляются работы Диннена «Программное распознавание образов» (март 1955), Грахама «Устранение шума при обработке изображений» (февраль 1962), Розенфельда, Парка и Стронга «Очистка от шума цифровых изображений» (октябрь 1969).

К 80-м года математики разработали и усовершенствовали фильтры для обработки графических данных: линейный, медианный, сглаживающий, усредняющий, фильтр Гаусса, основанные на выборе максимального и минимального значения. В это же время разрабатывались операторы Робертса, Собеля, Лапласа, Прюитт, Шарра выделяющие границы [72].

Цифровое изображение обычно рассматривают как дискретное представление непрерывного изображения с равномерно распределенными пикселями. Если обозначить размеры сетки Δx и Δy , то координаты любого пикселя можно записать как $x = i\Delta x$ и $y = j\Delta y$, тогда первая производная будет вычисляться:

$$f_x = \frac{df(x,y)}{dx} \cong f(i+1,j) - f(i,j) \quad (2.2)$$

$$f_y = \frac{df(x,y)}{dy} \cong f(i,j+1) - f(i,j)$$

Уравнения (2.2) могут быть реализованы для всех значений x и y с помощью одномерных масок:

$$\begin{array}{|c|} \hline -1 \\ \hline 1 \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{|c|c|} \hline -1 & 1 \\ \hline \end{array}$$

Однако, вычисление диагоналей требует использования двумерных масок:

$$\begin{array}{|c|c|} \hline -1 & 0 \\ \hline 0 & 1 \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{|c|c|} \hline 0 & -1 \\ \hline 1 & 0 \\ \hline \end{array},$$

которые применил Робертс в 1963. Описанные маски просты в использовании, но не симметричны по отношению к центральной точке, поэтому на практике применяют маски 3×3 , 5×5 , 7×7 . Увеличение размерности приводит к усложнению вычислений и, как следствие, занимает больше времени.

$$G_y = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * A \quad \text{and} \quad G_x = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} * A \quad \text{оператор Пруитт}$$

$$G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} * A \quad \text{and} \quad G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * A \quad \text{оператор Собеля}$$

$$G_y = \begin{bmatrix} 3 & 10 & 3 \\ 0 & 0 & 0 \\ -3 & -10 & -3 \end{bmatrix} * A \quad \text{and} \quad G_x = \begin{bmatrix} 3 & 0 & -3 \\ 10 & 0 & -10 \\ 3 & 0 & -3 \end{bmatrix} * A \quad \text{оператор Шарра}$$

Обозначения для формул следующие: A – исходное изображение, G – результирующее ($G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$), $*$ обозначает двумерную операцию свертки.

Заметим, что вычислительные затраты на применение масок Приют и Собе-ля одинаковы, но последний оператор лучше сглаживает изображение и подчеркивает края.

На следующем этапе обработки графической информации необходимо научить компьютер частично выполнять интеллектуальные задачи: выделить контур объекта от фона, получить скелет фигуры. В настоящее время разработано несколько алгоритмов векторизации изображений: алгоритм черепахи, следящий, скелетизация; алгоритм водораздела; детектор границ Кенни; волновой алгоритм.

С помощью отслеживающих алгоритмов получают векторное представление объекта. Их главное достоинство – простота, а недостатки – последовательное вычисление и сложность обнаружения контуров, содержащих внутренние линии. В качестве примера можно привести алгоритмы черепахи и жука.

Другая группа методов направлена на сканирование всего изображения и определения точек объекта без отслеживания их последовательности. Поскольку структура чертежей достаточно сложна, то для корректного описания необходимо знать последовательность соединения точек. Следовательно, следящие алгоритмы, хоть и просты в реализации, но не подходят для векторизации грунд-моделей обуви.

Скелетизация представляет скелет основной формы бинарного объекта толщиной в один пиксель (рис. 2.19). Рассмотрим произвольный объект A . Точка p принадлежит скелету тогда и только тогда, когда выполняются условия[73]:

- можно построить окружность D с центром в p , которая полностью находится в A и касается границы в двух и более местах;
- не существует другой окружности большего радиуса, лежащей в A и содержащей D .

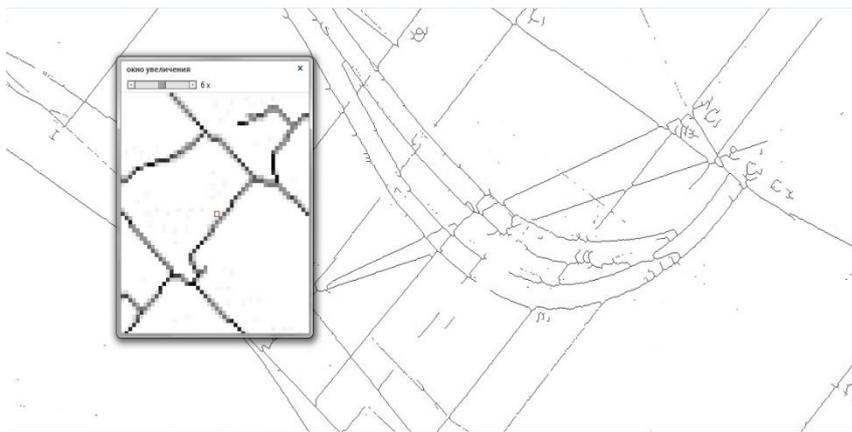


Рисунок 2.19 Пример скелетизации чертежа

К недостаткам алгоритма относят чувствительность к небольшим изменениям в морфологии. Незначительные неровности границы могут привести к ложным ветвлениям, которые помешают процессу распознавания, основанному на топологических свойствах скелета. Так называемое сокращение может быть осуществлено путем удаления веток меньшей длины, но такой подход не всегда эффективен для малых возмущений на границе объекта. Кроме того, алгоритм основан на итерационном подходе, т.е. многократном обходе изображения, что увеличивает время работы. Алгоритм не определяет развилки, следовательно затруднительно получить правильное представление чертежа.

Алгоритм водораздела построен на принципе погружения, при котором моделируется затопление водой последовательности пикселей [74]. К недостаткам можно отнести чувствительность к шуму и порождение большого количества сегментов [75].

Волновой алгоритм заключается в анализе пути прохождения сферической волны по изображению. На каждом шаге анализируется смещение центра масс точек, образующих новый шаг (генерацию) волны, относительно его предыдущих положений [69]. Для построения пути требуется большой объем памяти, кроме того, алгоритм медленно работает на больших изображениях.

В 1986 году был разработан детектор границ Кенни, который объединяет все ранее разработанные алгоритмы (рис. 2.20). На первом этапе удаляют помехи с помощью фильтра Гаусса. Далее вычисляют градиент любым из перечисленных

методов: определяют значения первой производной по x и y , а потом рассчитывают угол наклона $Q = \arctan(G_x/G_y)$. После этого проходят по всему изображению, удаляют пиксели, яркость которых больше определенного порога, и получают скелет объекта толщиной в один пиксель [76].

Экспериментально выявлено, что наиболее подходящим для нас является детектор границ Кенни. Однако этот метод не учитывает толщину линии (рис. 2.20, красные и зеленые линии), поэтому необходима его доработка для корректного распознавания чертежей конструкций верха обуви. Возможна модернизация волнового алгоритма с использованием поиска «дыр» [76].

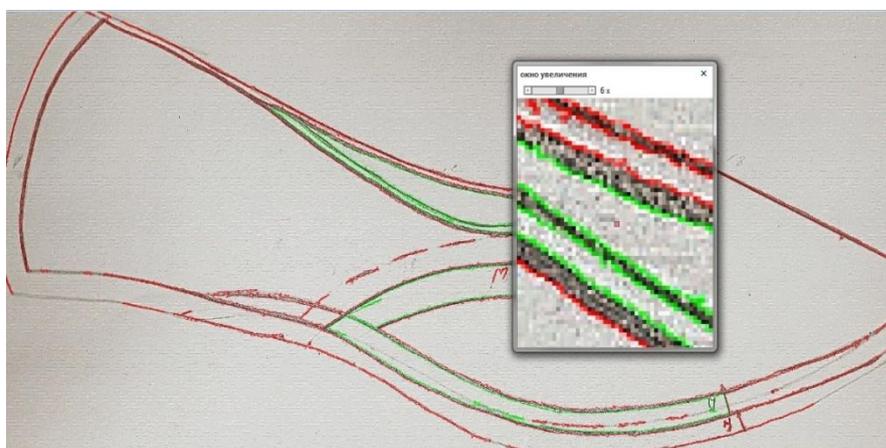


Рисунок 2.20 Реализация алгоритма Кенни

Важной топологической характеристикой поверхности является характеристика Эйлера, которая инвариантна для ориентированной поверхности и формулируется следующим образом: $\chi(X) = 2 - 2g$, где g количество ручек или «дыр». Таким образом, «дыры» являются важным геометрическим объектом, который можно использовать для организации построения векторного представления чертежа. С помощью апертуры 8×8 (размеры варьируются в зависимости от разрешения изображения и найденных шаблонов) определяют направление движения. Вычисление количества «дыр» сводится к поиску следующих масок внешних и внутренних углов (рис. 2.21) [77]. Считают, что 0 – пиксель, принадлежащий объекту, а 1 – фону. В процессе исследования для упрощения вычислений нами переведен исходный 24-разрядный рисунок в монохромный [76].



(а) Шаблоны окрестностей 2×2 пикселей, представляющие «внешние углы»



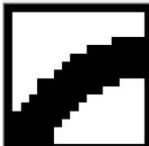
(б) Шаблоны окрестностей 2×2 пикселей, представляющие «внутренние углы»

Рисунок 2.21. Шаблоны для поиска углов [77]

Суть метода заключается в следующем: по изображению проходят квадратом произвольного размера. В захваченной области определяют количество «дырок» (зона, ограниченная линией). Затем находят координаты границ – место пересечения линии и квадрата [76].

Экспериментальный анализ различных чертежей конструкций верха обуви позволил установить набор апертур с разным количеством «дыр». Самые распространенные из них приведены в таблице 6 [76].

Таблица 6 Распространенный набор апертур с разным количеством «дыр» [76]

 1 «дыра», 1 точка	 2 «дыры», 2 точки	 2 «дыры», 3 точки
 3 «дыры», 3 точки	 3 «дыры», 4 точки	 4 «дыры», 4 точки

Наиболее часто встречающаяся апертура 2 «дыры» 2 точки составляет примерно 80% всего чертежа. В этом случае построение отрезка происходит путем соединения 2 точек и не требует дополнительного анализа, что значительно ускорять процесс векторизации. Линии припусков описаны апертурами б, в, г и составляют 10%; случай е является наименее распространенным и, как правило, относится к размерным линиям.

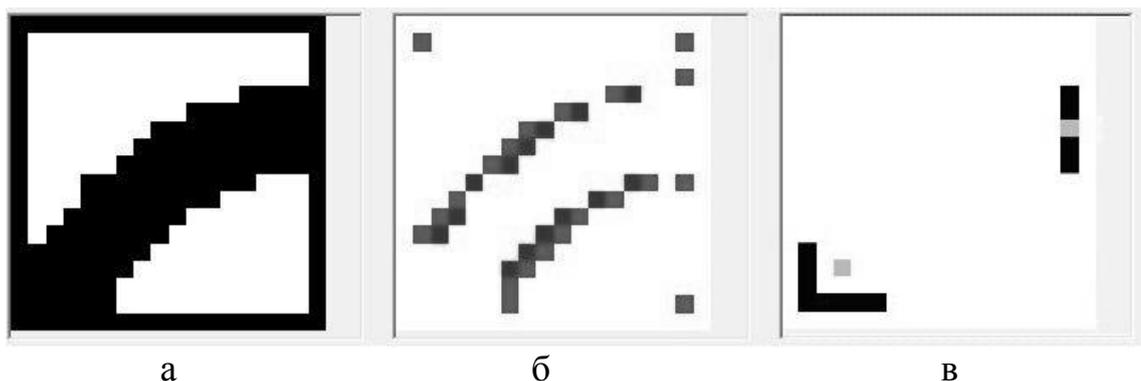


Рисунок 2.22 Пример реализации рекурсивного этапа: а часть изображения
б – внешние и внутренних углов, в – средние координаты граничных точек [76]



Рисунок 2.23. Результат работы топологического алгоритма [76]



Рисунок 2.24. Результат работы алгоритма для развилки [76]

На рисунке 2.25 приведена структурно-логическая схема разработанного топологического алгоритма.

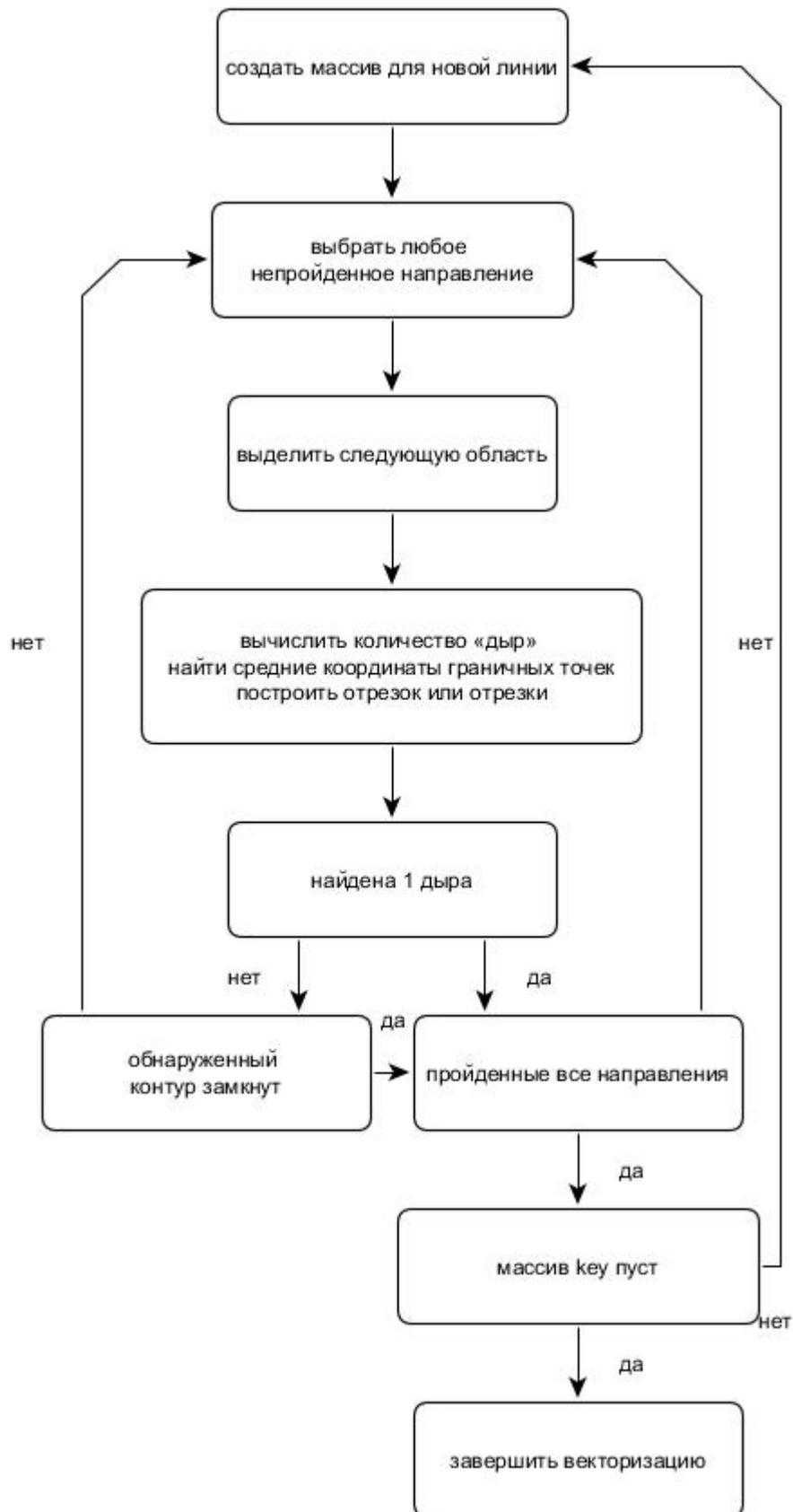


Рисунок 2.25. Структурно-логическая схема топологического алгоритма

С помощью описанного алгоритма извлекают топологическое описание контура, получают линии необходимой ширины и классифицируют развилки [76].

Заключительным этапом процесса векторизации является сохранение полученной информации в файл, поддерживаемый САПР.

2.3. Способ сохранения информации о векторном представлении чертежей конструкций верха обуви

Задача выбора подходящего формата предполагает провести анализ распространенные файлов САПР.

Открытый формат **DXF** (Drawing eXchange Format) предназначен для обмена графической информацией между приложениями САПР, разработан в 1982 году компанией Autodesk для системы AutoCAD. Поддерживается практически всеми CAD-системами на платформе PC. По мере того, как AutoCAD становился всё сложнее и поддерживал всё более сложные типы объектов, DXF становился всё менее полезен. Новые объекты в спецификации формата описывались не полностью либо не описывались вовсе. Большинство разработчиков коммерческих приложений, включая конкурентов Autodesk, в качестве основного формата обмена с AutoCAD используют формат DWG, через библиотеки, предоставляемые некоммерческой организацией Open Design Alliance, которой была выполнена обратная разработка формата DWG. В соответствии с требованием ЕСКД, чертёж любого изделия является двумерным контурным изображением (ГОСТ 2.301-68, Форматы), поэтому DXF не только не исчез, но стал де-факто одним из двух стандартов для векторных изображений в открытых операционных системах и приложениях (второй стандарт - SVG). Например, его поддерживает векторный графический редактор Inkscape, а для САПР QCad формат DXF является основным [8].

Общая структура файла DXF выглядит следующим образом:

- Заголовок (Header), хранит общую информацию о чертеже: номера версии AutoCAD и ряд системных параметров, каждый из которых содержит имя переменной и связанное с ним значение.

- Раздел классы (Classes) содержит информацию о применяемых классах, экземпляры которых представлены в секциях «Блоки», «Сущность» и «Объекты».
- Раздел таблицы (Tables) содержит таблицы:
 - идентификации приложения (APPID),
 - ссылок (BLOCK_RECORD),
 - размерностей (DIMSTYLE),
 - слоев (LAYER),
 - типов линий (LTYPE),
 - стиля текста (STYLE),
 - пользовательской системы координат (UCS),
 - представления (VIEW),
 - конфигурации окна просмотра (VPort),
- Секция блоки (Blocks) содержит определение блока Сущности, описывающего объекты, расположенные на чертеже.
- Сущность (Entities) раздел включает графические объекты на чертеже, в том числе и блок ссылок.
- В секции Объекты (Objects) находятся неграфические объекты чертежа, т.е все, что не относится к Сущности и Таблицам. Например, словари, которые содержат стили и группы.

Бинарный формат файла **DWG** применяется для хранения двухмерных (2D) и трёхмерных (3D) проектных данных и метаданных. Является основным форматом для некоторых САПР-программ (прямая поддержка — например, IntelliCAD, nanoCAD, AutoCAD, Caddie). Формат DWG поддерживается многими САПР-приложениями косвенно: то есть данные из одного формата данных перемещаются в другой через функции импорт-экспорт. Так же к DWG относят форматы стандартов чертежей (*.dws) и шаблонов (*.dwt). Современные программы сохраняют резервные копии в файлы с расширением .bak или .sv\$. Фирма Autodesk использует DWG в качестве основного формата для обмена между

своими продуктами, однако спецификация файла доступна только для зарегистрированных и утверждённых компанией Autodesk групп разработчиков. Обойти ограничения пробуют несколько сообществ, лучших результатов достиг консорциум Open Design Alliance.

Совокупность стандартов ISO 10303 **STEP** (STandard for Exchange of Product model data) применяемая для обмена информацией в САПР. Позволяет описать весь жизненный цикл изделия, включая технологию изготовления и контроль качества продукции. Является основным конкурентом стандарта IGES. В последнее время вытесняет его благодаря более широким возможностям хранения информации.

Открытый формат Design Web Format (**DWF**), предложенный Autodesk, предназначен для представления проектных данных, в не зависимости от операционной системы, исходного прикладного, программного и аппаратного обеспечений. Файл предполагает хранение проектной информации, содержащей любую комбинацию текста и графики типа, поддерживает обмен проектными данными, их просмотр, печать и рецензирование. Формат DWF не обеспечивает возможности редактирования и перезаписи информации, поэтому не может заменить DWG.

Открытый формат **PDF** (Portable Document Format), разработанный компанией Adobe Systems, признан международно и применяется для обеспечения электронного обмена любых печатных документов, независимо от исходного приложения программного обеспечения, аппаратного обеспечения и операционной системы. Пакетов для редактирования этого формата очень мало, к тому же они очень дорогие.

Стандарт **IGES** разработан для обмена техническими требованиями между разными САПР. В ранних версиях главным образом поддерживалась только передача чертежей, постепенно набор функциональных возможностей расширялся и была введена поддержка стандартных библиотек деталей, пользовательских команд и др. Структура файла приведена на рисунке 2.26.

STL (STereoLithography) [78] распространенный формат многих программ используется для быстрого прототипирования, 3D печати и автоматизированного

производства. Файл описывает поверхностную геометрию трехмерного объекта с помощью списка треугольных граней, при этом отсутствует информация о цвете и текстуре. Доступны два типа записи для STL: текстовое (ASCII) или двоичное, которое используется чаще благодаря своей компактности.

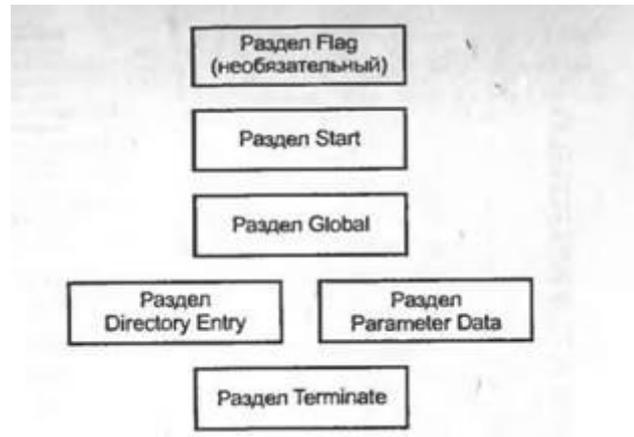


Рисунок 2.26. Структура IGES файла [79]

Открытый формат **IFC** (Industry Foundation Classes) предложен buildingSMART [80] в 1994 году для строительной индустрии, чтобы обеспечить совместимость в архитектуре. Сейчас IFC не контролирует ни одна компания или группа разработчиков, при этом его спецификация открыта и доступна для всех.

Формат **OBJ** хранит 3D геометрию объекта: положение каждой вершины, нормалей к ним, позицию текстуры относительно вершин, параметры полигонов. Спецификация для файла находится в открытом доступе и поддерживается разными программами 3D моделирования: Blender, Maya, MeshLab, Rhinoceros и др. Информация о текстуре объекта хранится в отдельных файлах MTL, который подключают с помощью команды `mtllib` [81].

Формат **DGN** (design), поддерживаемый MicroStation Bentley Systems [82], имеет две версии: V7 DGN (Intergraph DGN) от 1980 и V8 DGN, обновленную в 2000. Файл используется при проектировании таких крупных объектов, как здания, мосты, магистрали, суда и др. Bentley разместила спецификацию для DGN, а в 2008 году договорилась с Autodesk об обмене библиотеками, чтобы улучшить возможность чтения и записи файлов в смешанных средах.

Открытый формат **SVG** (Scalable Vector Graphics) основан на XML разметке и используется для хранения двумерной графики с поддержкой интерактивности и анимации (2.27). К достоинствам относят:

- возможность редактирования текстового формата,
- маленький размер файла по сравнению с изображением,
- масштабируемость,
- поддержка разных форматов графических файлов,
- возможность добавления анимации,
- легкая интеграция с HTML,
- доступность для мобильных устройств,
- хранение метаданных.

Недостатки формата:

- большой размер файла, но его можно избежать, сжав в SVGZ,
- трудное чтение картографических документов,
- белый шум сильно увеличивает размер файла.

```

Файл  Правка  Формат
1  <?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="no"?>
2  <svg
3      xmlns:dc="http://purl.org/dc/elements/1.1/"
4      xmlns:cc="http://creativecommons.org/ns#"
5      xmlns:rdf="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#"
6      xmlns:svg="http://www.w3.org/2000/svg"
7      xmlns="http://www.w3.org/2000/svg"
8      xmlns:sodipodi="http://sodipodi.sourceforge.net/DTD/sodipodi-0.dtd"
9      xmlns:inkscape="http://www.inkscape.org/namespaces/inkscape"
10     width="2504"
11     height="1756"
12     id="svg4152"
13     version="1.1"
14     inkscape:version="0.91 r13725"
15     sodipodi:docname="Q1_topol_alg.svg">
16   <metadata
17     id="metadata4172">
18     <rdf:RDF>
19       <cc:Work
20         rdf:about="">
21         <dc:format>image/svg+xml</dc:format>
22         <dc:type
23           rdf:resource="http://purl.org/dc/dcmitype/StillImage" />
24       </cc:Work>
25     </rdf:RDF>
26   </metadata>
27   <defs
28     id="defs4170">
29     <inkscape:path-effect
30       effect="spiro"
31       id="path-effect4748"
32       is_visible="true" />
33   </defs>
34   <sodipodi:namedview
35     pagecolor="#ffffff"
36     bordercolor="#666666"
37     borderopacity="1"
38     objecttolerance="10"
  
```

Рисунок 2.27. Пример SVG файла

Обзор файлов САПР позволил составить сравнительную таблицу 7, в которой известные форматы отсортированы в порядке возможности редактирования и наличия спецификации.

Таблица 7 Сравнение форматов файлов

Формат	Возможность редактирования	Область применения, формат данных	Наличие спецификации	Поддержка в мобильных устройствах
DWG	Нет	2D,3D	Нет	Нет
PNG	Нет	2D	Да	Да
JPEG	Нет	2D	Да	Да
BMP	Нет	2D	Да	Да
GIF	Нет	2D	Да	Да
PDF	Нет	2D	Да	Да
TIFF	Нет	2D	Да	Да
IGES	Да	Текстовая информация	Да	Нет
STL	Да	3D	Да	Нет
IFC	Да	3D	Да	Нет
OBJ	Да	3D	Да	Нет
DGN	Да	3D	Да	Нет
DXF	Да	2D	Да	Нет
SVG	Да	2D	Да	Да

Анализ полученной таблицы показал, что наиболее распространенными являются DWG (drawing) и DXF (Drawing eXchange Format). Однако, для первого спецификация доступна узкому кругу разработчиков, а второй из-за нарастающей сложности чертежей не отвечает предъявляемым требованиям. Вместе с тем формат SVG (Scalable Vector Graphics), хотя менее популярен, но в исследуемой работе представляет интерес в силу следующих достоинств: является одним из обязательных форматов для векторной графики; поддерживает разные форматы графических файлов; легко интегрируется с HTML; доступен для мобильных устройств; позволяет хранить метаданные.

Известны бесплатные приложения, позволяющие конвертировать SVG файлы в DWG и DXF, кроме того, открытая САПР FreeCad поддерживает чтение SVG. Для хранения и интеграции в САПР информации о чертежах конструктивной основы верха выбран формат SVG как наиболее перспективный. Структурно-логическая схема блока векторизации приведена на рисунке 2.28.

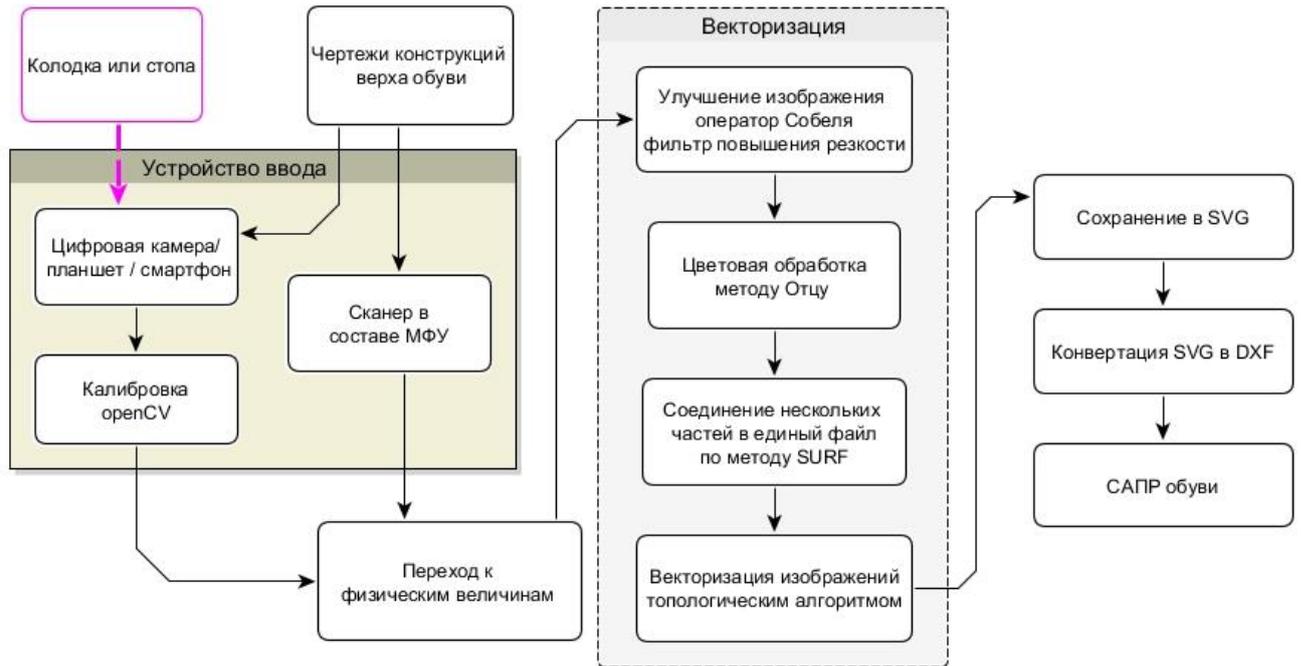


Рисунок 2.28. Структурно-логическая схема блока векторизации

Решение задачи автоматизации работы конструктора на этапе проектирования, с тем чтобы он мог редактировать чертеж и передавать его в смежные модули системы, будет представлено в следующей главе диссертации.

Выводы по второй главе

1. Вычислены параметры камер цифрового фотоаппарата, планшета, веб-камеры, среди них: количество мегапикселей матрицы цифрового фотоаппарата, требуемое для оцифровки чертежей конструкций верха обуви, коэффициенты дисторсии, которые исправляют геометрические искажения на изображении. Предложена методика перехода от растровых значений к физическим величинам.

2. Выявлено, что преобразование растрового представления чертежа в векторное требует перехода к бинарному изображению. Вычислена величина порогового значения бинаризации чертежей конструкций верха обуви.

3. Установлено, что векторизация с использованием сканера требует объединения нескольких частей изображения в один файл. Показано, что метод SURF (Speeded-Up Robust Features) наиболее пригоден для «склеивания» частей чертежейgrund-моделей обуви по характерным точкам.

4. Экспериментальная векторизация чертежей конструкций верха обуви с использованием наиболее распространенных инструментов – скелетизация и детектор границ Кенни – показала, что они не осуществляют корректное преобразование изображений.

5. Разработана структурно-логическая схема топологического алгоритма, позволяющего векторизовать чертежи конструкций верха обуви в соответствии с установленным набором апертур.

6. Показано, что формат SVG (Scalable Vector Graphics) наиболее пригоден и перспективен для хранения и интеграции в САПР информации о чертежах конструктивной основы верха.

7. Выявлена необходимость разработки математического описания для шаблонов деталей верха обуви, сохраняющего вторые производные и оперативно строящего контуры.

3. РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ МОДУЛЯ «ПРОЕКТИРОВАНИЕ»

3.1. Технологические преобразования конструктивной основы параметрическими кривыми

В процессе построения контура обуви, исходя из условия точности вводимой в компьютер модели верха обуви и аппроксимирующего алгоритма построения составной кривой, необходимо разработать различные методы её модификации [83].

При разработке конструкции обуви, можно сказать, что все модификации сегмента контура обуви получаются не только путем изменения основных опорных точек, но и самих сегментов контура, представленных кривыми Безье. Включив режим редактирования, оператор отмечает любую точку, подлежащую изменению. Далее, после подтверждения редактирования, программа позволяет перемещать любую точку и в динамике отображает на экране изменение формы контура [18], не нарушая его гладкость.

Модификацию любой точки контура можно разделить на несколько различных типов:

- 1) Модификация опорных точек для сегмента Безье, с соблюдением условия непрерывности и гладкости всей кривой в модифицируемой точке;
- 2) Модификация локального сегмента составной кривой, с условием прохождения через заданную точку, непрерывности и гладкости всей кривой и сохранением угла наклона векторов Безье;
- 3) Модификация локальных сегментов составной кривой, с условием прохождения через заданную точку, непрерывности и гладкости всей кривой без сохранения угла наклона векторов модифицируемого сегмента Безье.

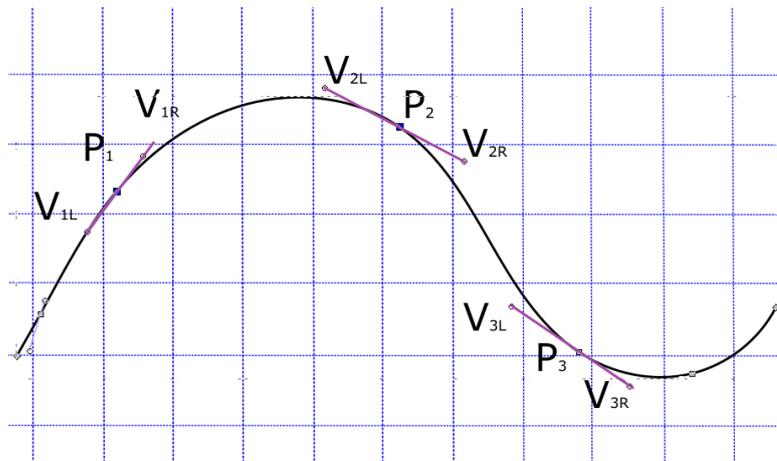
Первое условие модификации является наиболее простым. Пусть необходимо перенести точку P_1 в точку P'_2 (рис. 3.1). Зная координаты обеих точек можно вычислить величину приращения для перемещения точки P_2 в заданную P'_2 .

$$D = P'_2 - P_2 \quad (3.1)$$

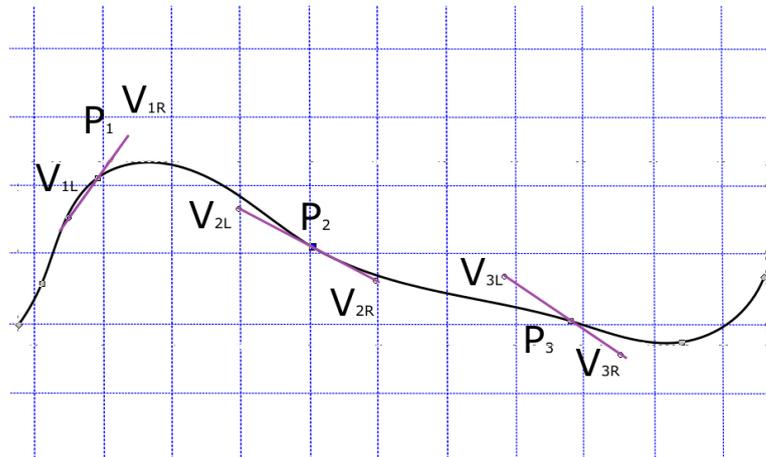
Учитывая условия коллинеарности векторов новые точки V'_{2L} и V'_{2R} строим с тем же приращением D :

$$V'_{2L} = V_{2L} + D \quad (3.2)$$

$$V'_{2R} = V_{2R} + D$$



а



б

Рисунок 3.1 Схема модификации точек контура: а – исходное положение точек, б – результат перемещения точки P_2 в P'_2

Для первого варианта модификации условие непрерывности и гладкости соблюдено, учитывая, что D постоянная величина.

Теперь остановимся на втором способе модификации составной кривой. Если обратить внимание на рисунок 3.1, можно заметить, что векторы $\overrightarrow{P_1V_{1R}}$, $\overrightarrow{P_1V_{1L}}$, $\overrightarrow{P_3V_{3R}}$, $\overrightarrow{P_3V_{3L}}$ полностью сохранили свои значения и взаимную коллинеарность. Таким образом, для условия прохождения через заданную точку локального сегмента кривой с сохранением угла наклона векторов достаточным условием является разделение сегмента на два в точке локальной кривой, которую необходимо переместить. Используем для последующей ее модификации по первому методу.

Третий вариант модификации предполагает изменение угла наклона векторов. Соблюдение условия коллинеарности соседних сегментов ведет к изменению угла наклона и их векторов соответственно.

Пусть необходимо переместить произвольную точку P , лежащую на любом выбранном сегменте составной кривой в указанную точку P' , сохраняя гладкость всей составной кривой.

Рассмотрим сегмент (2) между точками P_1 и P_2 (рис. 3.2). Необходимо найти такое положение векторов, что бы точка P переместить в положение P' . Кроме того, как описывалось выше, для соблюдения гладкости всей кривой, необходимо переместить соседние сегменты (1) и (3), изменяя угол наклона векторов $\overrightarrow{P_1V_{1R}}$ и $\overrightarrow{P_2V_{2L}}$ в соответствии с $\overrightarrow{P_1V_{1R}}$ и $\overrightarrow{P_2V_{2L}}$.

Обратимся к свойству делимости кривой Безье: любой её отрезок является частным случаем кривой Безье. Таким образом, при $t=1/3$ линия проходит через P_{13} , а при $t=2/3$ – P_{23} . Подставляя эти значения t в параметрическое уравнение кривой Безье:

$$P(t) = (1 - t)^3 P_1 + 3t(1 - t)^2 V_{1R} + 3t^2(1 - t) V_{2L} + t^3 P_2 \quad (3.3)$$

получаем систему, связывающую P_{13} и P_{23} с V_{1R} и V_{2L} , решая которую находим:

$$\begin{aligned} V_{1R} &= (-5P_1 + 18P_{13} - 9P_{23} + 2P_2)/6 \\ V_{2L} &= (2P_1 - 9P_{13} + 18P_{23} - 5P_2)/6 \end{aligned} \quad (3.4)$$

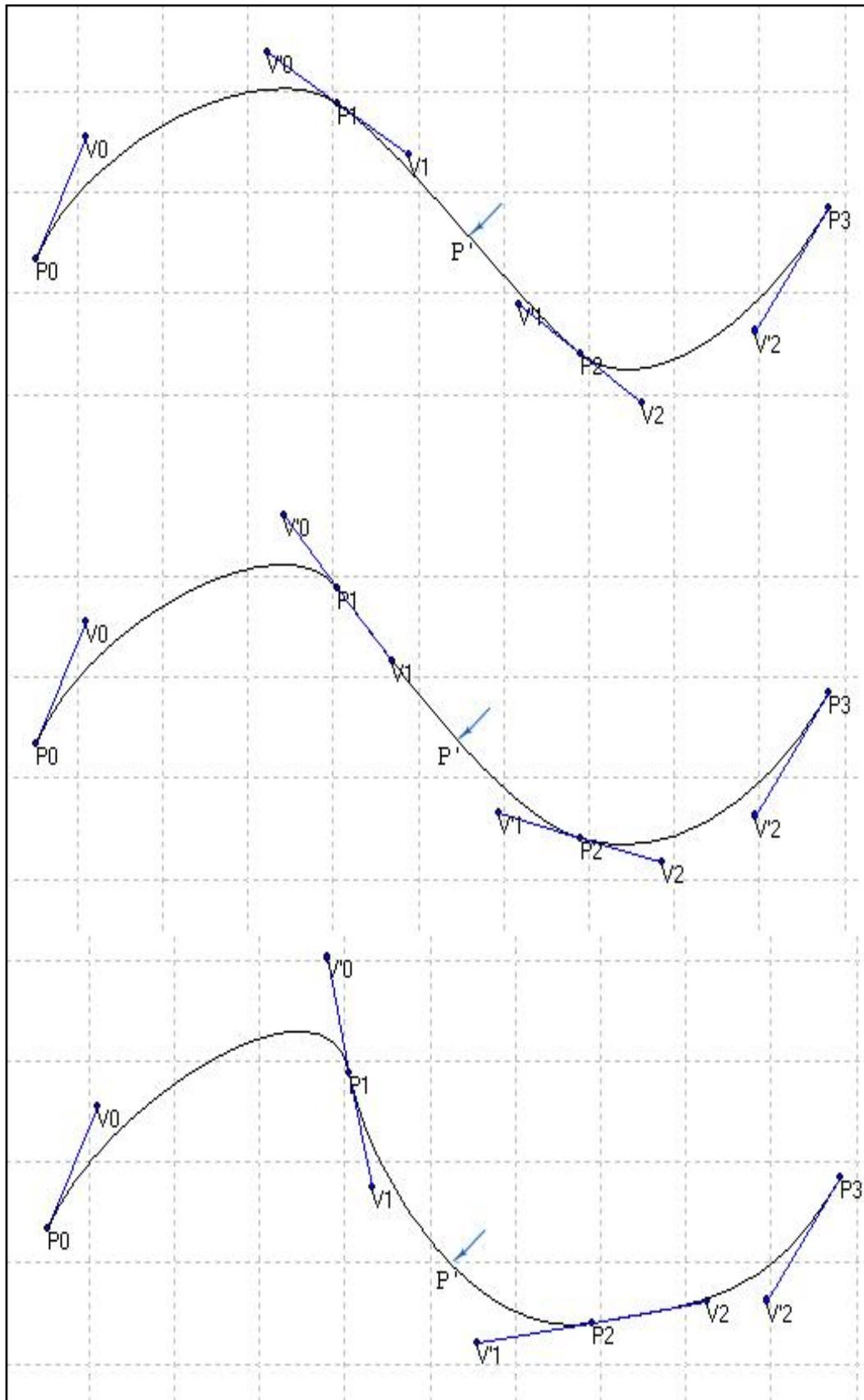


Рисунок 3.2 Схема модификации точек контура с изменением угла наклона

Запишем коэффициенты отношения кривой Безье для точек V_{1R} и V_{2L} соответственно:

$$\begin{aligned} k_{V_{1R}} &= 1/(3t - 6t^2 + 6t^3) \\ k_{V_{2L}} &= 1/(3 - 9t + 12t^2 - 6t^3) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Таким образом, перемещая точку при заданном значении t на определенное расстояние, можно вычислить его приращения в точках V_{1R} и V_{2L} . Обозначим величину перемещения точки P в P' значением ΔP .

$$\Delta P = P - P' \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} V'_{1R} &= V_{1R} + k_{V_{1R}} \Delta P \\ V'_{2L} &= V_{2L} + k_{V_{2L}} \Delta P \end{aligned} \quad (3.7)$$

Пользуясь выражением (3.7), вычислим приращение точек V_{1R} и V_{2L} , при изменении положения P в P' в условиях коллинеарности векторов. Рассчитав так же и приращения в точках V_{1L} и V_{2R} , изменив кривизну соседних кривых Безье.

Кривизна предыдущего (первого) сегмента составной кривой Безье будет изменяться в соответствии с изменением V_{1R} и симметричным изменением положением точки V_{1L} относительно точки P_1 .

$$V'_{1L} = P_1 + (P_1 - V_{1R}) \quad (3.8)$$

Кривизна последующего сегмента составной кривой также будет изменяться аналогичным образом по уравнению (3.8).

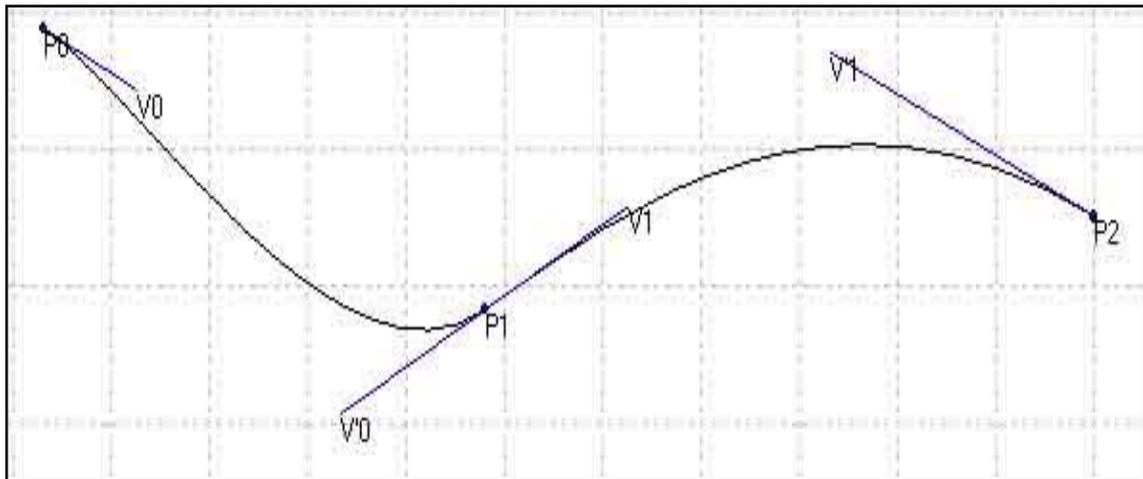
$$V_{2R} = P_2 + (P_2 - V_{2L}) \quad (3.9)$$

Таким образом, перемещая любую точку сегмента составной кривой, можно растягивать сжимать и изменять его кривизну, не нарушая гладкости и непрерывности всей кривой.

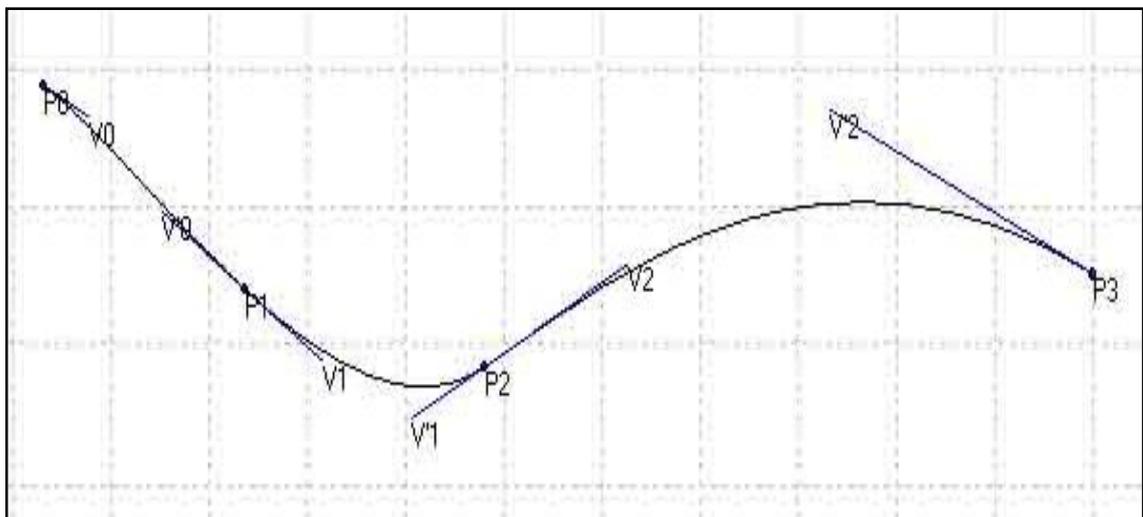
Помимо разработки средств модификации контуров, следует предусмотреть способы добавления-удаления узлов. Эти механизмы необходимы конструктору обуви для увеличения и уменьшения плавности и гибкости контуров, а также до-

ведения вновь созданной линии к необходимой форме. Кроме того, функция добавления точек необходима на этапе детализовки для связи пересекающихся контуров.

Рассмотрим задачу добавления точки в любую окрестность, лежащую на составной кривой, образующей контур. Основой принцип добавления точки является сохранение формы контура (рис. 3.3).



а



б

Рисунок 3.3 Схема модификации контура путем добавления новой точки: а – исходная кривая, б – с новой точкой

Обозначим точку вставки P_0^2 , а точки векторов Безье для вновь вставленной обозначим P_0^1 и P_1^1 . Наглядный метод разбиения этих кривых был предложен de Casteljau. Построим кривую по 3 опорным точкам (рис. 3.4). Метод de Casteljau

основан на разбиении отрезков, соединяющих исходные точки в отношении t (значение параметра), а затем в рекурсивном повторении этого процесса для полученных отрезков [84].

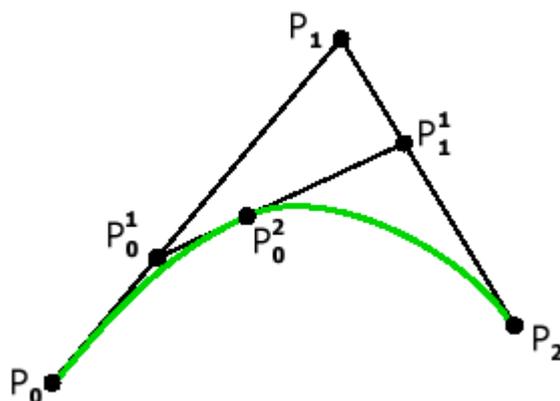


Рисунок 3.4 Метод de Casteljau для 3 точек [84]

Математический аппарат графического редактора конструкции верха обуви должен позволять создавать производные линии и кривые, полученные зеркальным отображением элементов контура относительно линии перегиба [18]. Кроме того, осуществлять операции переноса или поворота контуров.

Получение симметричных отображений контуров часто находит применение в конструировании обуви. Например, при проектировании мужских полуботинок и туфель лодочка по копировально-графической системе эта операция используется для построения полного контура союзки путем отображения половины детали относительно её линии перегиба [18] (рис.3.5).

Производные контуры получают путем преобразования основного контура с помощью некоторой функции:

$$l'_m = F_m(l_m) \quad (3.10)$$

Представление в параметрическом виде интерполирующего полинома не требует модификации функции F_m , поэтому геометрические преобразования (поворот, масштабирование и т.п.) осуществляются посредством переноса или вращения векторов.

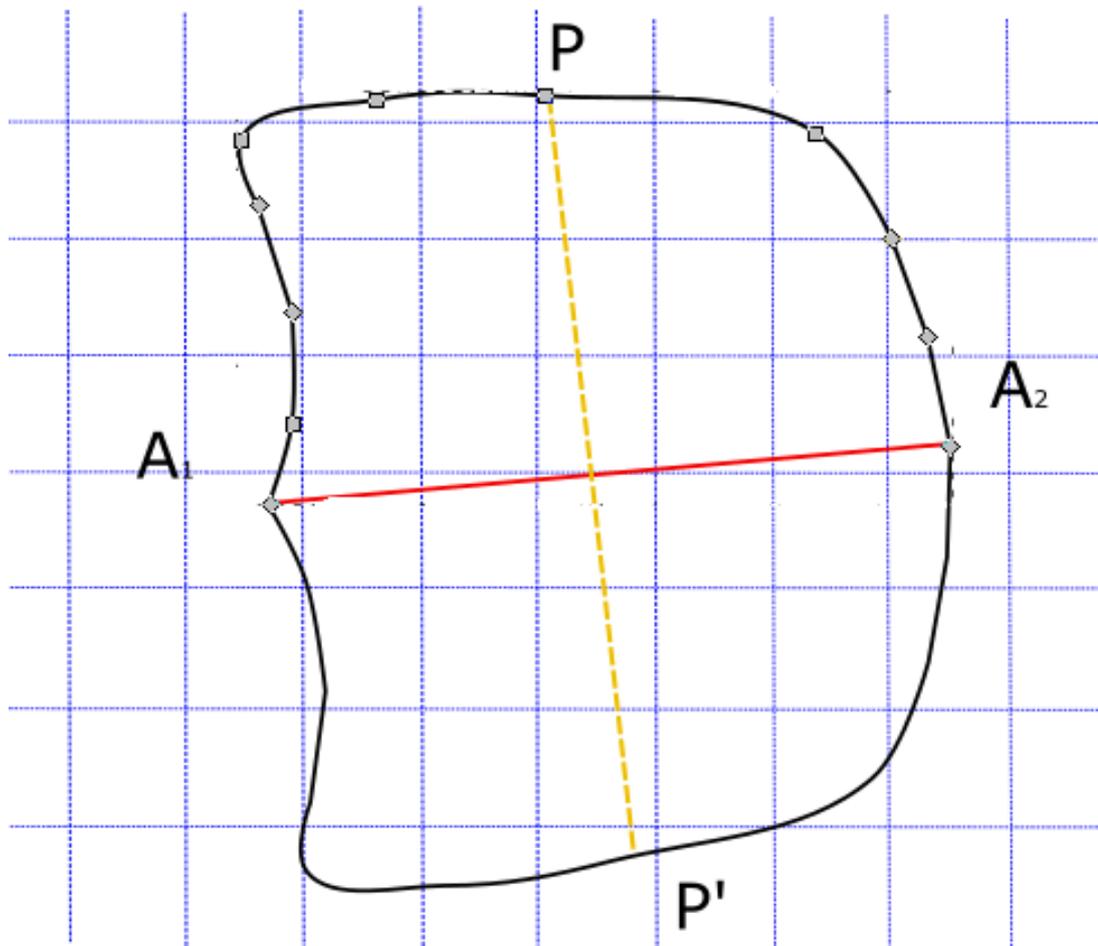


Рисунок 3.5 Пример симметричного преобразования для детали обуви

Таким образом, в случае симметричного преобразования сегмента l_m , заданного функцией (3.10) достаточно провести симметричное преобразование точек P_{1B} , P_{2B} , P_{3B} и P_{4B} для заданного сегмента.

Рассмотрим на примере простой фигуры симметричное преобразование относительно линии (рис. 3.6):

1. перенос системы координат xOy в точку с координатами $-A_{1x}, -A_{1y}$ (совмещение точки A_1 с центром координат);
2. поворот точки P на угол α ;
3. симметричное преобразование точки P относительно оси Ox ;
4. поворот точки P в обратную сторону на угол α ;
5. перенос системы координат xOy в точку с координатами A_{1x}, A_{1y} .

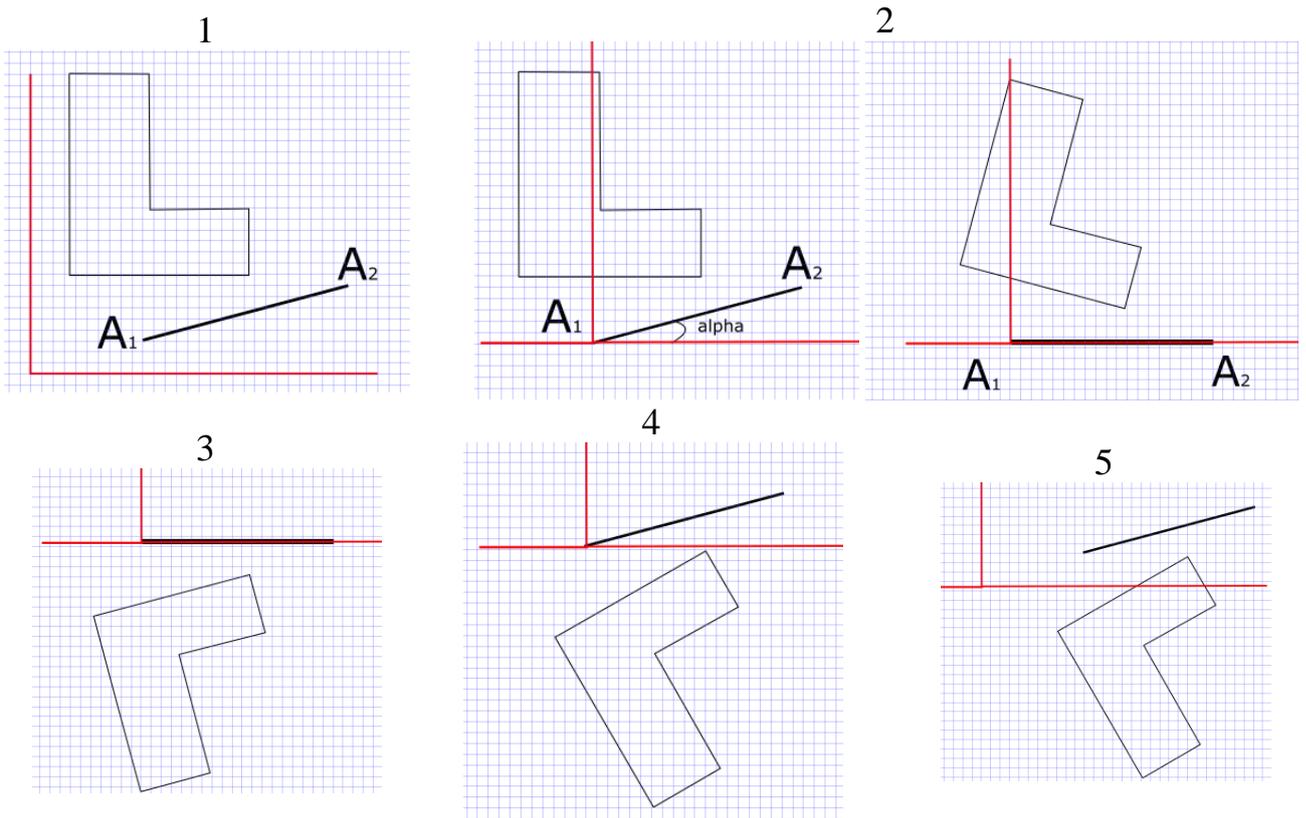


Рисунок 3.6 Схема преобразования фигуры относительно произвольной

Если представить точку в однородных координатах, то преобразование сдвига, поворота и симметрии можно представить как умножение вектора-столбца координат точки на матрицу преобразования [85]. В общем случае для однородного пространства координаты точки $P(x, y)$ можно записать в виде $P(wx, wy, w)$, где w – любой ненулевой множитель. В дальнейшем примем $w=1$. Тогда сдвиг точки $P(wx, wy, w)$ на Δx и Δy будет описан [86]:

$$(x' y' 1) = (x y 1) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \Delta x & \Delta y & 1 \end{pmatrix}.$$

Преобразование поворота точки на угол α :

$$(x' y' 1) = (x y 1) \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Преобразование симметрии относительно оси Ox :

$$(x'y'1) = (x y 1) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Общий вид симметричного преобразования для всех точек контура записывается как:

$$(x'y'1) = (x y 1) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -x_1 & -y_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ x_1 & y_1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Другим примером производных контуров могут служить различные припуски к основным контурам деталей. Припуск представляет собой линию, отстоящую от основного контура на расстоянии L_n [18].

Величина L_n может быть константой (рис. 3.7), в случае припуска на загибку или сострачивание, либо представляет собой некоторую функцию $L_n=f_n(t)$ в случае припуска на затяжку [18] (рис. 3.8).

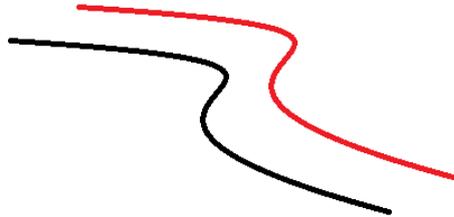


Рисунок 3.7 Пример постоянного припуска

Пусть мы имеем некоторую кривую k , заданную в параметрическом виде уравнениями $x = \psi(t), y = \varphi(t)$. Проведем в каждой её точке P нормаль и отложим на ней по обе стороны от P отрезок с постоянной длиной l . Полученные таким образом внутренние точки опишут внутреннюю, а внешние – внешнюю «параллельную» кривую. Их параметрические уравнения описываются [87]:

$$\xi = \varphi \pm \frac{l\psi'}{\sqrt{(\varphi')^2 + (\psi')^2}}$$

$$\zeta = \psi \pm \frac{l\varphi'}{\sqrt{(\psi')^2 + (\varphi')^2}}$$

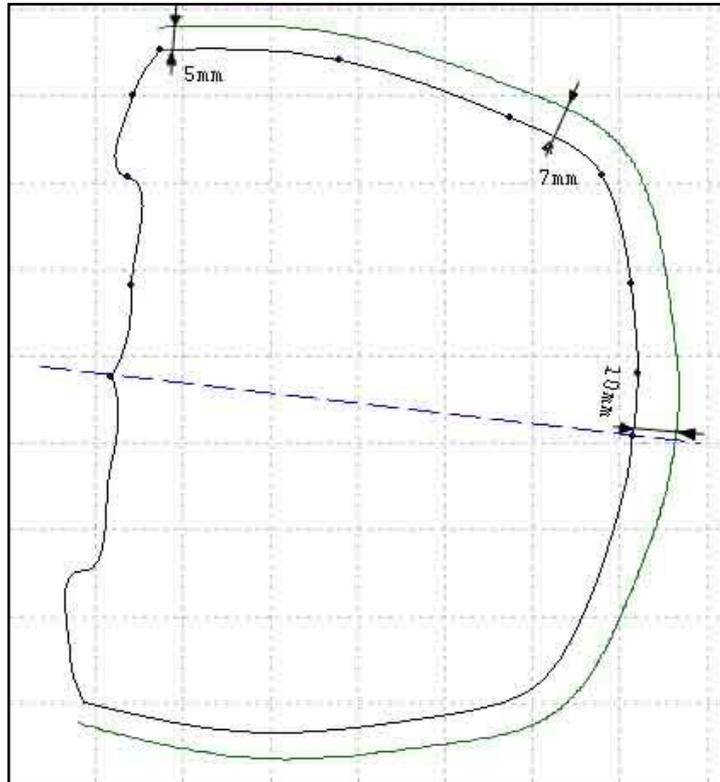


Рисунок 3.8 Пример построения припуска

Для построения припуска к контуру, необходимо в каждой его точке вычислить нормаль и отступить на расстояние L_n в направлении нормали.

Нормаль к параметрической кривой в общем случае вычисляется как:

$$F_n(u) = \begin{cases} x(u) + ty'(u) \\ y(u) + tx'(u) \end{cases} \quad (3.11)$$

где t – параметр на нормали.

$$F_n(u) = \begin{cases} x_m + u(x'_m - x_m) + L_n(y'_m - y_m)/mv(u) \\ y_m + u(y'_m - y_m) + L_n(x'_m - x_m)/mv(u) \end{cases}$$

Отсюда следует, что припуск может быть представлен как:

$$F_n(u) = \begin{cases} x(u) + L_n y'(u)/mv(u) \\ y(u) + L_n x'(u)/mv(u) \end{cases} \quad (3.12)$$

где $mv(\mathbf{u})$ – модуль вектора нормали.

Введем сокращения для функции (3.3):

$$\begin{aligned} A_x &= 3p_{2x} - 3p_{1x} \\ B_x &= 3p_{1x} - 6p_{2x} + 3p_{3x} \\ C_x &= -p_{1x} + 3p_{2x} - 3p_{3x} + p_{4x} \\ A_y &= 3p_{2y} - 3p_{1y} \\ B_y &= 3p_{1y} - 6p_{2y} + 3p_{3y} \\ C_y &= -p_{1y} + 3p_{2y} - 3p_{3y} + p_{4y} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Производная для функции (3.3) с учетом (3.13) имеет вид:

$$\begin{aligned} x'(u) &= A_x + 2B_x * u + 3C_x * u^2; \\ y'(u) &= A_y + 2B_y * u + 3C_y * u^2; \end{aligned} \quad (3.14)$$

Далее запишем выражение (3.12) с учетом (3.14) в параметрическом виде:

$$F_n(u) = \begin{cases} x(u) + L_n y'(u) / \sqrt{x'(u)^2 + y'(u)^2} \\ y(u) + L_n x'(u) / \sqrt{x'(u)^2 + y'(u)^2} \end{cases} \quad (3.15)$$

Зная константную величину припуска L_n , мы можем через (3.3) и (3.15) рассчитать все точки припуска. Если же необходимо вычислить неравномерный припуск, то есть $L_n = f_n(t)$, то введем величины:

L_b – постоянный припуск начального сегмента кривой при параметре $u = 0$;

L_e – постоянный припуск конечного сегмента кривой при параметре $u = 1$;

N – количество сегментов в составной кривой, к которой строим припуск;

ds – шаг изменения параметра u в каждом сегменте, удовлетворяющем гладкости припуска.

Количество точек между начальным и конечным сегментом кривой будет:

$$C_p = \frac{N}{ds}. \quad (3.16)$$

Из уравнения (3.16) находим уровень снижения (увеличения) величины припуска с каждой точкой шага ds :

$$\Delta E = \frac{L_b - L_e}{C_p}. \quad (3.17)$$

То есть, используя (3.16) и (3.17) можно вычислить изменяемую с каждым шагом итерации величину u :

$$L_n = L_n - \Delta E \quad (3.18)$$

Кроме того, следует учитывать, что кривизна контура при последовательном изображении расчетных точек припуска может образовывать визуальные петли (рис 3.9).

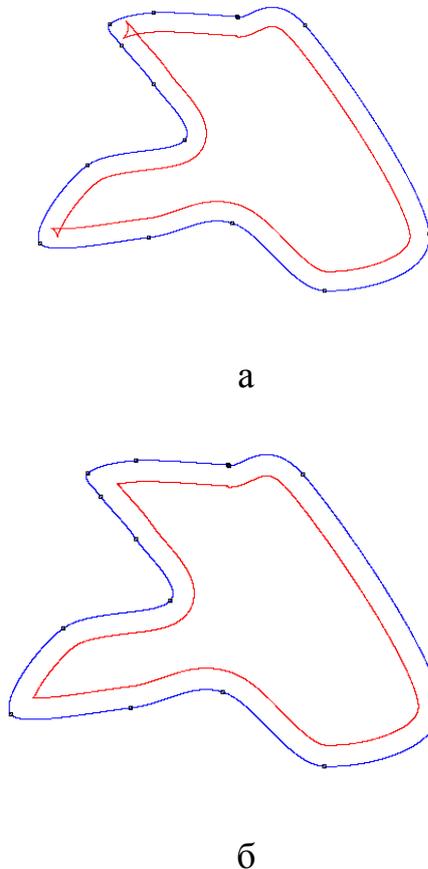


Рисунок 3.9 Пример образования петель (а) и их устранение (б)

Для устранения петель между припусками и коррекции их контуров необходимо найти точку их пересечения и убрать лишние отрезки. Пользуясь формулой (3.15) находим множество точек припуска. Так как форму эквидистанты образует последовательное соединение этих точек отрезками, то необходимо найти шаг отрезков и последовательным перебором вычислить точки пересечения.

Экспериментальным путем мы нашли, что 3 ds (3.16) оценка работает достаточно хорошо на типичном экранном разрешении. Таким образом, находя пере-

сечение каждого третьего отрезка, и, удаляя точки между найденными отрезками, можно избежать петель и неровностей.

Следует учитывать, что современное проектирование конструкции верха обуви подразумевает многоуровневость каждого этапа. Таким образом, при совершенствовании методов проектирования. В частности, построения эквидистант к контурам, с нашей точки зрения, следует использовать как на этапе ввода конструкции, так и на последующем этапе – детализовки.

Этот подход использует различные математические аппараты и наиболее полно охватывает вариации построения деталей обуви.

Технология работы в графическом 2D редакторе при редактировании конструкции верха обуви делиться на несколько основных этапов:

После этапа ввода конструкции обуви стоят задачи построения припусков к основным контурам, указания конструктивных и декоративных элементов (гофры, наколы, перфорация и т.д.) построения симметричных контуров и редактирования всей графической модели. Здесь определяются основные зависимости контуров друг от друга, что может накладывает определенные требования к редактированию модели. Так же решается вопрос о привязке декоративных элементов к точкам контуров модели. С позиции полноты функционала, наиболее полные варианты работы представляют зарубежные системы. Однако, большинство библиотек общего назначения только перегружают системы;

Процесс детализовки – процесс выделения основного контура детали и ее различных декоративных элементов из построенных контуров [88]. Определение геометрии детали также может иметь несколько подходов.

Определим основные свойства и задачи при детализовке обуви.

К свойствам можно отнести замкнутость основного контура, наличие дополнительных декоративных элементов. Процесс детализовки контуров для определения границ детали может происходить как в ручном, так и полуавтоматическом режиме. В нашем случае предложен простой для графического представления метод выделения деталей, при минимуме действий конструктора. Основным критерием для интерактивного режима детализовки деталей послужило удобство

выделения и формообразование детали из отдельных контуров и вспомогательных элементов. Задача конструктора только указать на те части контуров, которые образуют деталь. Даже, если контуры не связаны друг с другом общими точками, такие точки добавятся автоматом в процессе определения детали.

Кроме того, необходимо определить признак образования детали, то есть признак замкнутости выделенных частей контуров. Например, конструктор выделяет точки на контурах (обозначены крестиком, рис. 3.10). Не важно имеет ли выделенный контур общие точки с предыдущими выделенными контурами, эти точки автоматически добавляются при нахождении пересечений между выделенными контурами. Признак замкнутости детали проявляется, когда каждый выделенный подконтур с обеих сторон от выделяющей его точки имеет единственное пересечение с другим выделенным подконтуром. Иными словами, из каждой общей точки должны исходить только два выделенных подконтуров. На рисунке 3.10 показан процесс выделения контуров: зеленым обозначены точки, которые указывает конструктор в предложенном методе (7), а оранжевым – при обычной работе (24). Очевидно уменьшение в разы количества операций, выполняемых оператором, что сокращает время на разработку модели обуви.

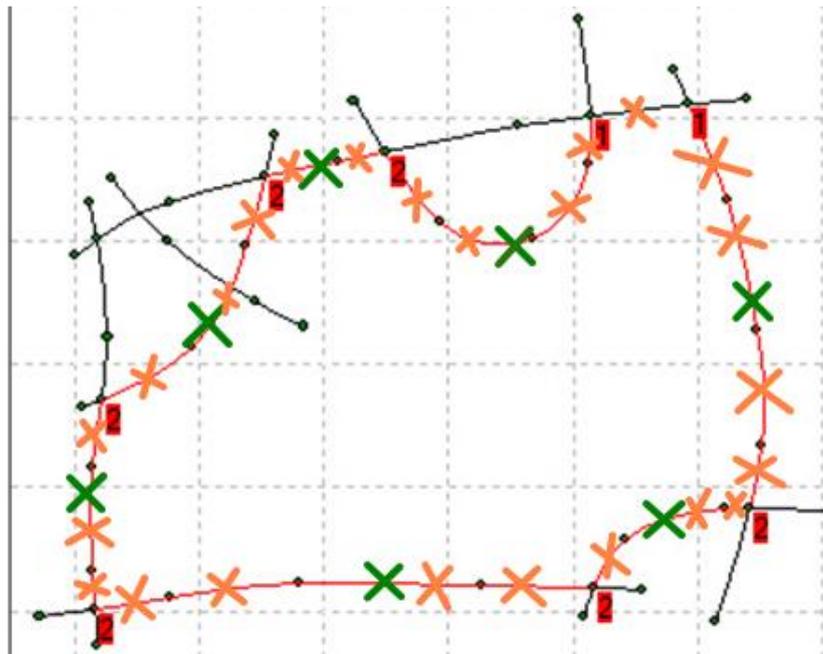


Рисунок 3.10 Процесс выделения замкнутых контуров на чертеже

Предлагается следующая последовательность выделения детали из множества контуров и производных элементов. Рассмотрим на примере распространенного случая для детали верха обуви, включающей симметрично отображенную часть и припуск на загибку.

1. Конструктор указывает точки на контурах, которые участвуют в формировании детали. Выделенные точки обозначим крестовым пересечением (рис. 3.11).
2. Определяется принадлежность указанной точки к собственно контуру, его симметричной производной или припуску. Если точка принадлежит какому-то из перечисленных элементов, фиксируем её координаты. Фиксация именно координат, а не определенной кривой Безье, входящей в сплайн, требуется для дальнейшего пересчета и разбиения кривых Безье;

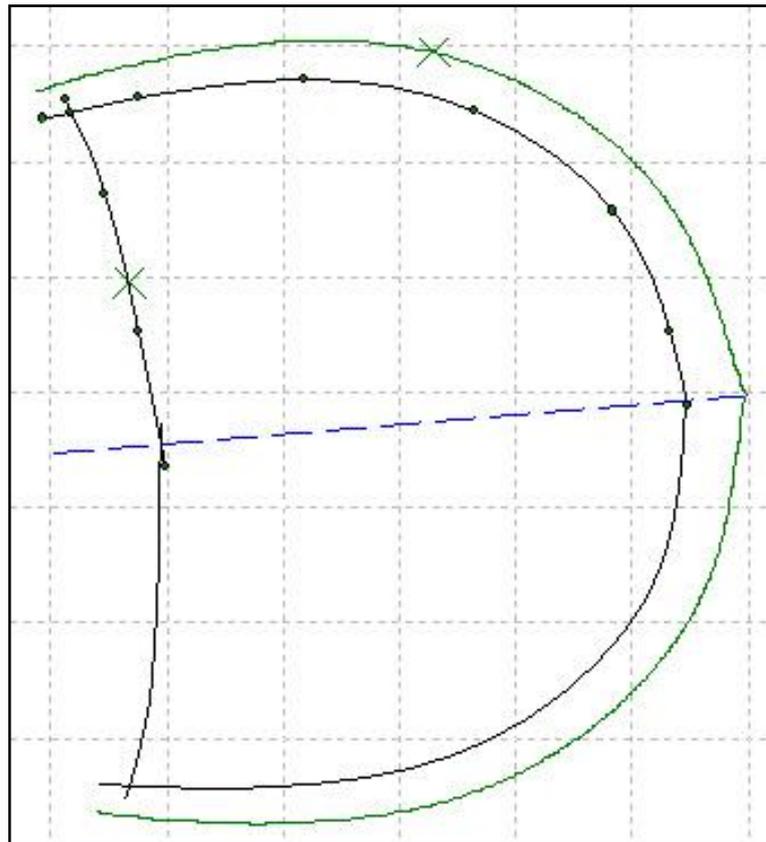


Рисунок 3.11 Схема выделения детали верха

3. Если конструктором выделен производный контур (припуск, симметрия), то необходимо определить его образующий (основной) контур. Это связа-

но с дальнейшим процессом градирования, где необходимо пересчитывать только основные контуры. Запоминаем координаты пересчитанной и выделенной точек основного контура и производного контура. На рисунке 3.12, P_0 – точка основного контура, P_p – точка припуска, P'_0 – точка основного симметричного припуска, P'_p – точка симметричного припуска. Стрелками показано направление переноса выделенных точек производных контуров на основные контуры.

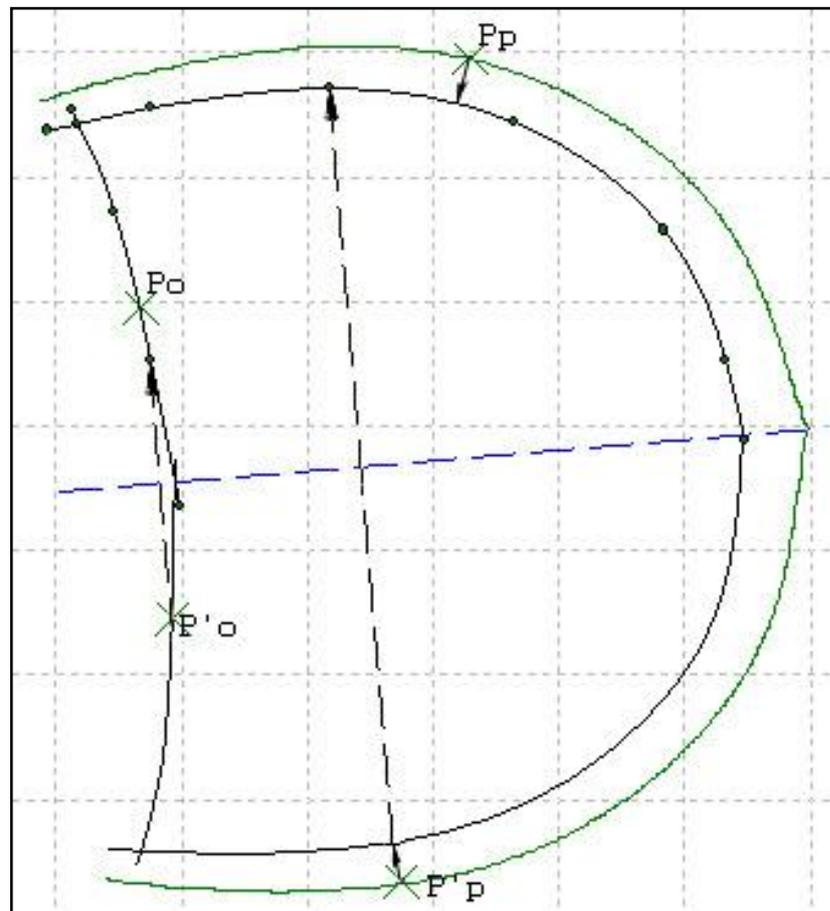


Рисунок 3.12 Перенос выделенных точек производных контуров на основные

4. Алгоритм, предложенный для детализовки, основан на пересечении основных выделенных контуров друг с другом. Два и более основных контура рассматриваются на предмет пересечения друг с другом. Если точка пересечения существует в качестве опорной на конурах, то объединяем их в одну, если нет, то добавляем новую. При вставке новой точки, состав-

ляющие кривые Безье разбиваются на несколько частей, а в качестве образующего контура детали принимается та часть, на которой находятся координаты выделенной точки.

5. При указании симметричных контуров можно выделить два типа пересечений, которые необходимо рассматривать отдельно, для симметрии необходимо сохранение целостности детали, при возможных дальнейших изменениях формы основных контуров:
6. При пересечении симметричного контура с основным, добавляем точку пересечения в основной контур и связываем ее с линией симметрии. При любых изменениях формы контура связь точек фиксируется связывающей прямой, через линию симметрии;
7. При пересечении симметричного контура с симметричным, находим пересечения только основных образующих контуров, добавляя найденную точку и присваивая ей дополнительный индекс, указывающий на пересечение симметричных элементов;
8. Поочередное выделение элементов детали из наборов контуров, дает однозначную выделенную деталь. При выделении двух и более контуров каждого нового элемента срабатывает процедура пересечения вновь выделенного элемента с ранее выделенными. Так как контур детали должен быть замкнутым, то в точках пересечения основных контуров устанавливается индекс количества Безье, для которых эта точка является опорной. Далее возникают два важных условия:
9. Добавленные, согласно пункту 4, общие точки пересечения контуров и выделенная сторона контура дает количество исходящих из каждой такой точки контуров детали. Если в каждой точке пересечения контуров количество точек равно двум (точка пересечения является опорной для двух, но не более и не менее контуров детали), то через эти точки можно провести единственный замкнутый контур. Согласно пункту 5 количество исходящих контуров детали ставим с пометкой пересечение симметричных контуров.

10. Однозначность контура дополнительно определяется отмеченными точками на контурах, нужной стороной относительно точки пересечения.
11. Если выделялся припуск к основному контуру, то ограничиваем их по точкам пересечения.
12. После выделения каждого нового контура, происходит проверка на формирование детали. Если условие выполнено, то формируем деталь, в заданном слое с заданными характеристиками. Точки пересечения выделенных основных контуров помечаются признаком, не дающим удалять их из опорных точек контура.

Выделив деталь описанным выше способом, мы сохраняем в памяти компьютера лишь указатели на основные контуры, точки начала и конца подконтура, а также параметры производных контуров. Таким образом, записывая в памяти только ссылки на контуры, которые образуют деталь и, задавая условие неразрывности детали, запрещая удалять стыкующие точки, конструктор может менять контуры и редактировать их по своему усмотрению уже после детализации. Если контур симметричный, то положение линии симметрии также фиксируется для исключения разрыва детали по линии перегиба. При этом сохраняются составляющие части детали, а также размеры припусков и симметрия деталей.

Рассмотрим на примере работу алгоритма детализации (рис. 3.13). имеем последовательность точек для формирования детали P_p , P_0 , P'_0 и P'_p .

1) Выделяем точку P_p , принадлежащую контурному припуску и переносим её на основной контур. Фиксируем координаты точки P_p , и соответственно координаты исходной точки основного контура P_{p_1} .

2) Выделяем точку P_0 , принадлежащую основному контуру и фиксируем её координаты.

3) Выделение двух и более контуров является условием пересечения их друг с другом, согласно пункту 4. Вправо и влево от указанных точек (как показано стрелками) находим составляющие кривой Безье и возможность их пересечения.

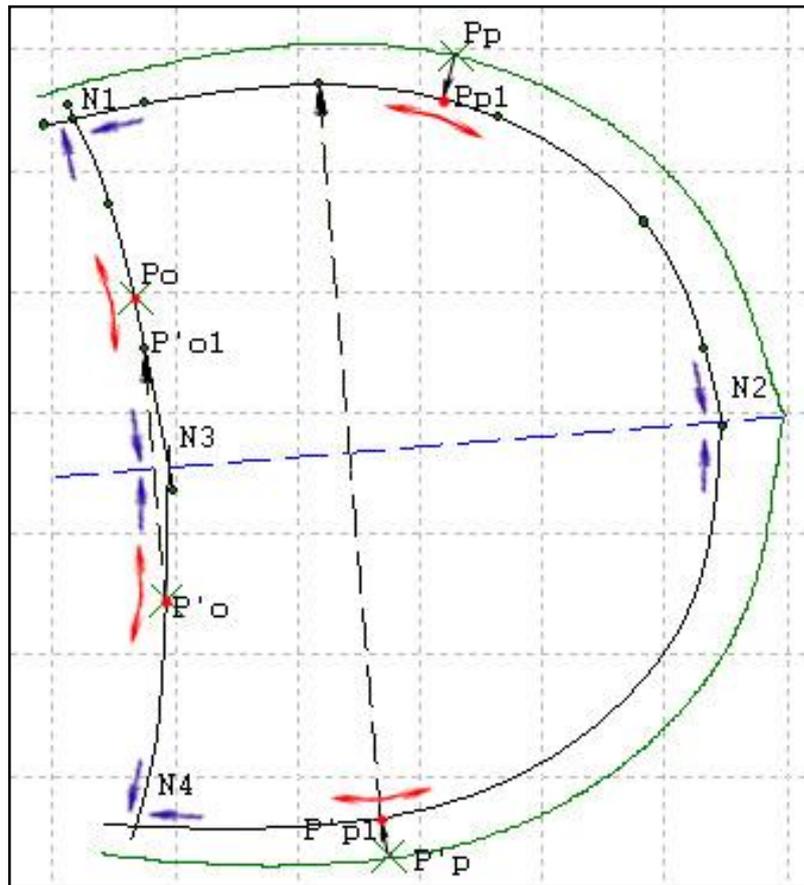


Рисунок 3.13 Схема выделения контура детали

4) Отмечаем пересечение в точке N_1 . Добавляем общую точку в сплайны, разбивая крайние составляющие В-сплайна Безье на две части. Точка N_1 является вновь вставленной опорной для двух кривых Безье, соответственно.

5) Согласно пункту 6 рассматриваем количество исходящих контуров для точки N_1 . Их четыре, однако, выделенные точки P_p и P_0 , указывают нужные стороны детали (на рис. 3.13 и у точки N_1). Этим сторонам две, соответственно в точке ставим индекс для сторон детали $N_1 = 2$.

6) Выделяем P'_p , принадлежащую контурному припуску, и переносим её на основной контур P'_{p1} .

7) Добавляем симметричный контур в список контуров детали и находим пересечение с остальными выделенными контурами в точке N_2 .

8) В основной контур добавляем N_2 , получаем пересечение основного контура с симметричным. Согласно пункту 5 добавляем к основному контуру новую точку N_2 и связывающий объект, через линию симметрии (на рисунке обо-

значена пунктиром) и записываем индекс количества исходящих контуров (равен двум; основной и образованный симметричный).

9) Контур между точками N_1 и N_2 теперь сформирован, так как индексы в этих точках равны двум. Изначально был указан не основной контур, а припуск, в соответствии с пунктом 8 ограничиваем припуск точками N_1 и N_2 , как принадлежащий детали.

10) Выделяем точку P'_0 , принадлежащую основному симметричному контуру. Находим его пересечение с остальными выделенными основными и симметричными контурами.

11) Пересечение будет в точках N_3 и N_4 , которые необходимо добавить в основной контур по линии симметрии. В N_4 пересекаются два симметричных контура. Выделенные точки P'_p и P'_0 указывают стороны детали с двух сторон, следовательно, ставим индекс для $N_4 = 2$. Так как оба контура симметричные устанавливаем индекс с учетом пункта 5. Для точки N_3 аналогично шагу 8, добавляем точку и строим связывающий элемент для симметричного и основного контуров, ставим индекс для $N_3=2$.

12) Условие образования детали выполнены, поскольку каждый выделенный контур имеет с каждой стороны от выделенной точки, два пересечения связанные только с единственным выделенным подконтуром.

После завершения этапа формирования контура детали, при условии пересечения основных контуров, припуски и дополнительные элементы, могут не иметь прямого пересечения, однако деталь должна иметь замкнутую форму (рис. 3.14). Для окончательного формирования контура детали конструктор в интерактивном режиме имеет возможность выбрать соединительные элементы для выделенной детали.

Автоматически выделяются узловые точки пересечения выделенных производных контуров (рис. 3.14).

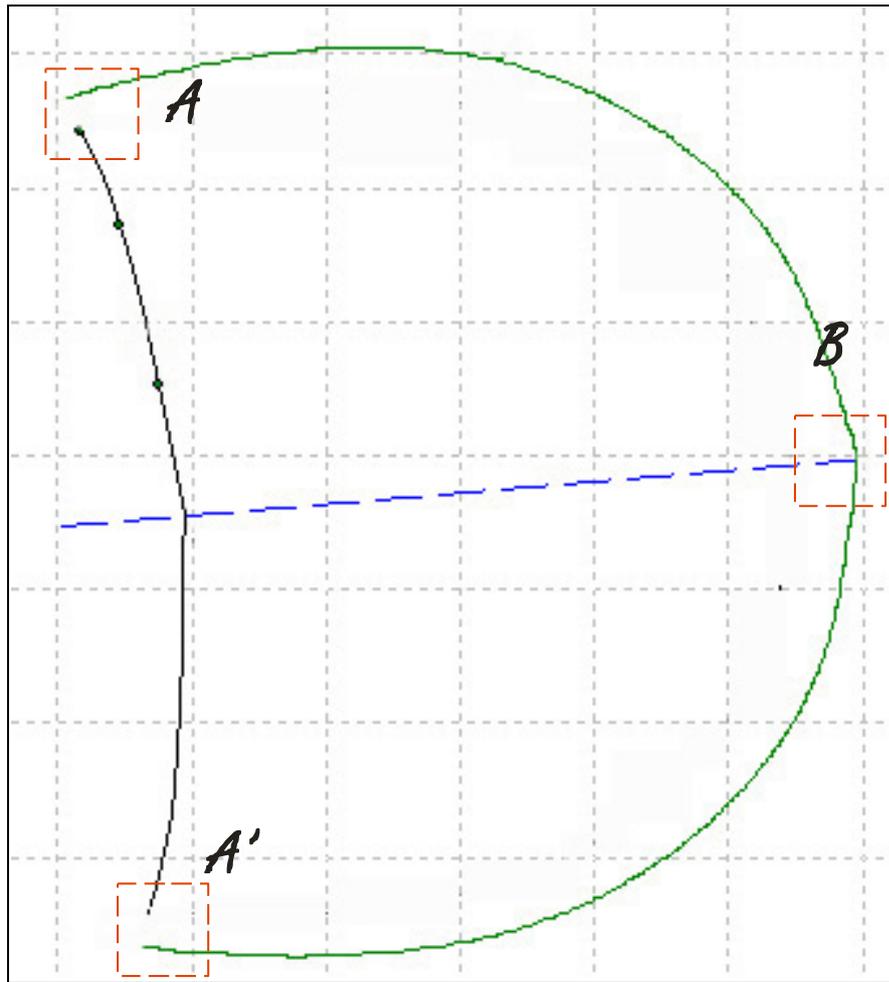


Рисунок 3.14 Пример сформированного контура, у которого отсутствуют соединения для дополнительных элементов

Можно выделить производные контуры, имеющие пересечения с другими подконтурами (выделение *B*) детали или производные подконтуры имеющие “разрыв” (выделение *A* и *A'*). В процессе градирования каждая вновь образованная деталь будет проверяться на пересечения производных подконтуров вновь и, если пересечение будет отсутствовать, крайние точки соединяются прямой. Это допустимо вследствие не существенного по размерам возможного отстранения точек при градировании. В случае, если пересечения между производными подконтурами отсутствуют, после завершения основной детализовки конструктору предлагается в интерактивном режиме соединить контуры с нужными параметрами.

Рассмотрим ниже вариант совмещения двух припусков. На изображениях ниже точка O – зафиксированная при детализовке, точка пересечения основных контуров. В описании детали участвуют производные от этих контуров припуски. Точки C , B принадлежат припускам и являются эквидистантными для точки O .

Самым простым способом формирования соединительных элементов является соединение отрезком крайних точек “разорванных” элементов (рис. 3.15). Алгоритм позволяет автоматизировать процесс формирования припуска и не требует вмешательства конструктора:

- На величину припуска l перпендикулярно вектору касательной к кривой отмечаем точку B ;
- На величину припуска m перпендикулярно вектору касательной к кривой отмечаем точку C на припуске;
- Соединяем точки C и B отрезком прямой.

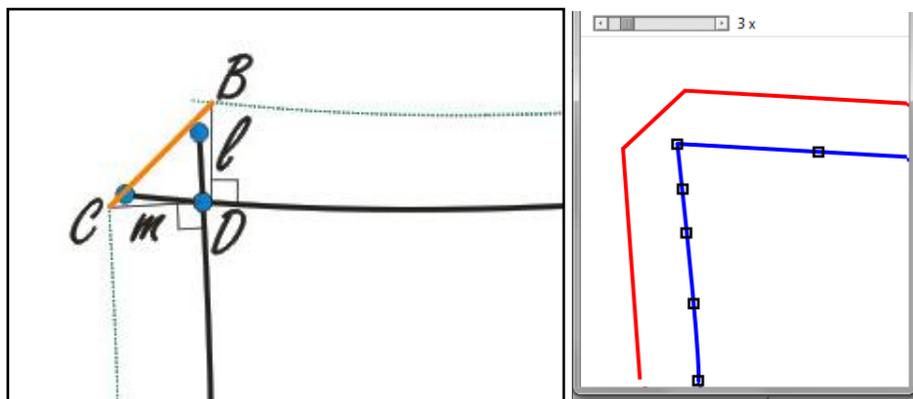


Рисунок 3.15 Реализация соединения припусков отрезком
а – теоретические сведения; б – реализация

Вторым вариантом формирования соединительных элементов является формирование угла, при необходимости посторенние, вписанной в угол кривой Безье через крайние точки “разорванных” элементов (рис. 3.16). Алгоритм также можно автоматизировать без определения параметров соединительного элемента:

- На величину припуска l перпендикулярно вектору касательной к кривой откладываем точку B ;

- На величину припуска m перпендикулярно вектору касательной к кривой откладываем точку C на припуске;
- Параллельно вектору Безье основного подконтра детали k , исходящего из O , от точки B проводим прямую. Также аналогично параллельно вектору Безье n проводим прямую из точки C ;
- Прямые пересекаются в точке A . Отрезки AB и AC дают угловое соединение;

Если необходимо плавное округление такого углового пересечения, то кривую Безье можно вписать в угол при этом векторами будут отрезки AB и AC , а направленность обоих векторов будет обратна направлению векторов k и n .

Необходимость формирования угла или формирования вписанной в угол кривой Безье определяется конструктором, при выборе типа соединения.

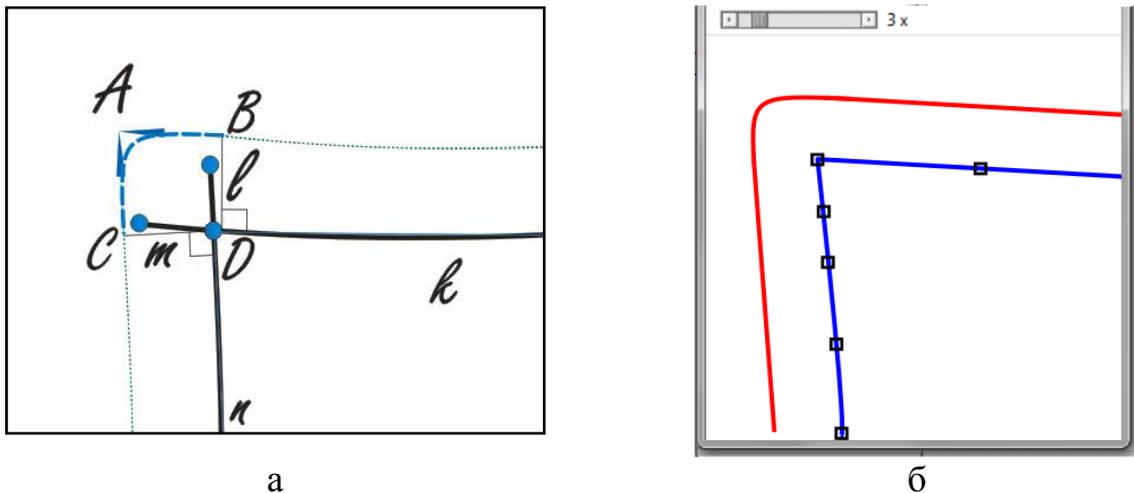


Рисунок 3.16 Соединение припусков углом или закруглением:
а – теоретические сведения; б – реализация

Еще одним вариантом формирования соединительных элементов является связка с помощью кривой дуги, проходящей через три точки (рис.3.17, 3.18). Этот способ соединения наиболее распространен. Дугу можно корректировать, по усмотрению конструктора и технологической необходимости, перемещая свободную точку, через которую проходит дуга:

- На величину припуска l перпендикулярно вектору касательной к кривой откладываем точку B ;

- На величину припуска m перпендикулярно вектору касательной к кривой откладываем точку C на припуске;
 - Соединяем точки C и B отрезком прямой.
 - Из точки O перпендикулярно CB откладываем отрезок. Длина отрезка $AC = \frac{3}{4}CB$.
 - По умолчанию проводим дугу через точки CAB ;
- По необходимости точку A можно редактировать, запоминая ее размер и угол наклона относительно CB и точки O .

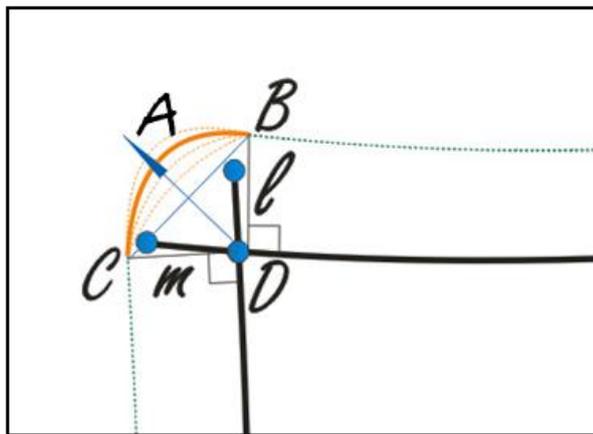


Рисунок 3.17 Соединение припусков углом или закруглением
теоретические сведения

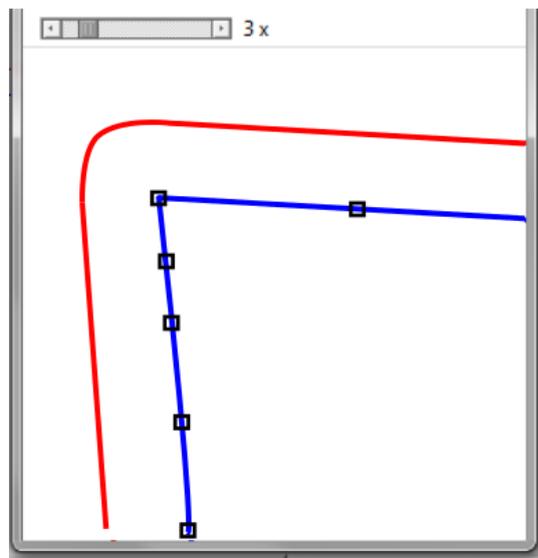


Рисунок 3.18 Практическая реализация соединения припусков
углом или закруглением

На рисунке 3.19 показаны функциональные возможности работы с контурами, которые были описаны выше.



Рисунок 3.19 Функциональные возможности работы с контурами

Используя рассмотренные основные типы соединительных элементов, мы окончательно замыкаем контуры детали и сохраняем в памяти такую параметрическую форму, чтобы при градировании все основные принципы построения детали не нарушались. Поскольку готовые шаблоны деталей обуви представляют собой замкнутые контуры, то возникает задача их описания с помощью гладких кривых.

3.2. Описание шаблонов деталей верха обуви параметрическими кривыми

Геометрическое описание кривых, определяющих объект, может быть реализовано: с помощью массива координат или аналитическим уравнением. Первый вариант непрактичен по ряду причин: хранение чрезмерно больших объемов необходимой информации и громоздкое преобразование данных из одной формы в другую [89]. Кроме того, истинная форма кривой не известна, поэтому сложны такие расчеты, как пересечение кривых. С точки зрения конструктора, достаточно трудно работать с объектом, представленным в виде массива точек.

Кривые математически можно описать с помощью непараметрических и параметрических уравнений. Использование первого способа связано с рядом ограничений:

- невозможно использовать для замкнутых или многозначных кривых;
- сложность вычислений зависит от выбранной системы координат;
- если наклон кривой в точке вертикальный или почти вертикальный, то его значение становится очень большим (или бесконечностью).

Параметрическое представление кривых исключает все вышеуказанные трудности. В общем виде уравнение двумерной кривой:

$$P(u) = [x(u), y(u)]^T, u_{min} \leq u \leq u_{max} \quad [90]$$

Поскольку кривая ограничена двумя параметрами, то можно нормализовать диапазон: $0 \leq u \leq 1$, таким образом нет привязки к одной системе координат. Кроме того, такие кривые по своей природе ограничены и, следовательно, не требуют дополнительных данных для определения конечных точек. Параметрическая геометрия позволяет использовать простые методы вычислений даже для сложных аналитических задач.

Существует две категории кривых, которые могут быть представлены параметрически аналитические и синтетические. Первые записываются с помощью аналитических уравнений, таких как линия, круг. Синтетические кривые описываются набором контрольных точек, например кривые Безье или сплайны [91]. Хотя аналитические кривые и обеспечивают очень компактную форму представления, упрощают вычисления, но при этом не поддаются редактированию. Поскольку в процессе проектирования конструктор изменяет форму объекта, то необходимо такое описание кривой, при котором можно легко и быстро придать ей требуемую форму [92]. Кроме того, разные требования непрерывности в точках и условия гладкости результирующей кривой. Таким описанием является кубический полином, гарантирующий выполнение перечисленных условий. Многочлены высшего порядка обычно не используются в силу сложности вычислений и неэкономичного хранения информации. Основные САПР обеспечивают четыре типа

синтетических кривых: Эрмит, Безье кубический и В-сплайн [93]. Поскольку не все из них сохраняют непрерывность второй производной, то возникает задача разработки подходящего описания кривой.

3.2.1. Аппроксимация кубическим сплайном по точкам половинного деления

В 1974 году Джордж Чайкин прочитал лекцию в университете штата Юта, в которой он изложил новый порядок формирования кривых для ограниченного числа точек [94]. Этот алгоритм интересен тем, что построение кривой происходит путем срезания уголков, тем самым осуществляя постепенное сглаживание. Ниже на рисунке 3.20 приведен пример работы алгоритма Чайкина.

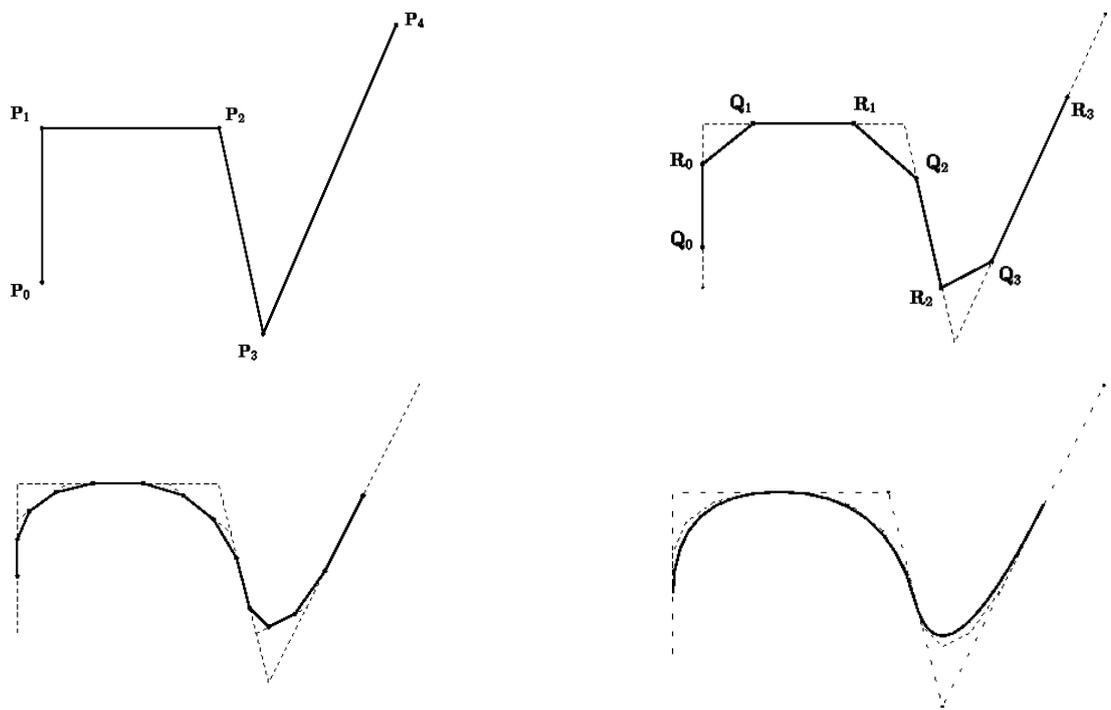


Рисунок 3.20 Пример формирования кривой по алгоритму Чайкина

В работе [95] было показано, что кривая Чайкина эквивалентна квадратичному В-сплайну. Однако, метод Чайкина избегает аналитического определения В-сплайнов и обеспечивает простой, изящный механизм рисования кривой.

Основная идея рекурсивного последовательного деления заключается в построении функции путем неоднократного уточнения исходной кусочно-линейной функции $f^0(x)$ с для получения последовательности всё более детализированных

функций $f^1(x), f^2(x), \dots$, сходящихся к предельной функции $f(x) = \lim_{j \rightarrow \infty} f^j(x)$ [96].

В 1987 Дин, Левин и Грегори ввели гладкую интерполирующую схему [97]. Они предположили, что с помощью разработанного алгоритма можно получить кривую не выше 3 порядка. Эту схему называют 4х-точечным интерполирующим методом. Например, даны базовые точки $p_i \in R^2$, тогда промежуточные точки добавляются по следующей схеме:

$$p_{2i}^{k+1} = p_i^k, \quad -1 \leq i \leq 2^k n + 1$$

$$p_{2i+1}^{k+1} = \left(\frac{1}{2} + w\right)(p_i^k + p_{i+1}^k) - w(p_{i-1}^k + p_{i+2}^k), \quad -1 \leq i \leq 2^k n,$$

где $p_i^0 = p_i$, $-2 \leq i \leq n+2$; k — номер итерации; n — число точек; w — варьируемый параметр [98].

Эксперименты показывают, что рекурсивная формула воспроизводит кривую с непрерывным вектором касательной для $0 < w < \frac{1}{4}$, что согласуется с теорией. Кроме того, показано, что для любого параметра $w > 0$ компоненты кривой, определяемой общим набором точек, не имеющих условий на вторую производную в параметризации $p(t)$, где $t \in [0, n]$, сопоставляется с p_i^k с параметрическим значением $2^{-k}i$, с $k \geq 0$ и $0 \leq i \leq 2^k n$. Предполагается, что при $w = \frac{1}{16}$ рекурсивная формула производит последовательность точек, принадлежащих кривой, степень которой не превышает трех. В дальнейшем примем $w = \text{const} = \frac{1}{16}$ [98].

На практике приходится вычислять касательные и нормали, поэтому необходима такая параметризация, с помощью которой легко производить операцию дифференцирования. Для этого очень удобен кубический полином, в частности в форме Фергюсона – Эрмита [98]:

$$r(t) = r_0(1 - 3t^2 + 2t^3) + r_1(3t^2 - 2t^3) + \dot{r}_0(t - 2t^2 + t^3) + \dot{r}_1(-t^2 + t^3) \quad (3.19)$$

где r_0, r_1 — координаты начальной и конечной точек; \dot{r}_0, \dot{r}_1 — векторы касательных в точках; t — независимый параметр, изменяющийся в интервале $[0, 1]$.

При последовательном формировании точек интерполяции необходимо, чтобы в них не было изломов. Это означает, что при циклическом обходе точек вдоль замкнутой кривой производная в граничных точках полинома вычисляется по одной схеме. Дополнительно необходимо, чтобы полином проходил точно через точки с параметром $i + \frac{1}{2}$. В этом случае получаем зависимость для производных [98]:

$$\dot{r}_1 - \dot{r}_2 = \frac{1}{2}(p_1 + p_2 - p_0 - p_3) \quad (3.20)$$

для точек заданной последовательности на кривой (рис.3.21).

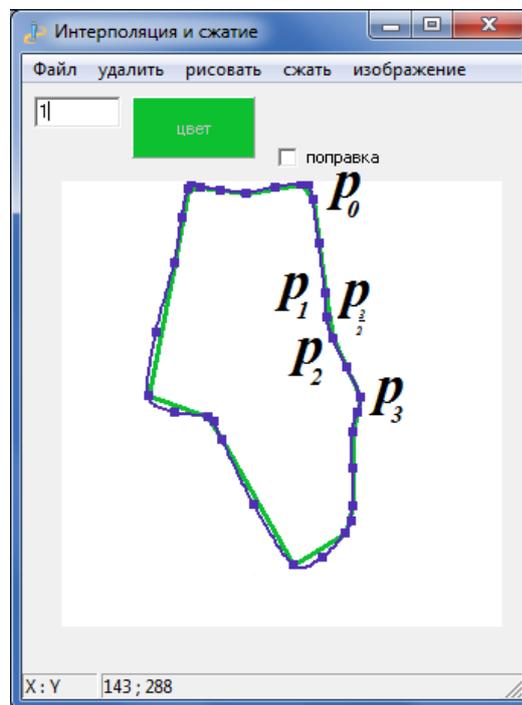


Рисунок 3.21. Пример последовательности точек на кривой [98]

Найдем оценки производных в точках, соблюдая условие (3.20):

$$\dot{r}_0 = \frac{p_2 - p_0}{2}; \dot{r}_1 = \frac{p_3 - p_1}{2}. \quad (3.21)$$

Внеся значения (3.21) в описание параметрического полинома (3.19), получаем схему Catmull-Rom сплайна [98]:

$$p \Leftarrow [t, t^2, t^3] M \begin{bmatrix} p_{i-1} \\ p_i \\ p_{i+1} \\ p_{i+2} \end{bmatrix},$$

$$M = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 0 & 2 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & -5 & 4 & -1 \\ -1 & 3 & -3 & 1 \end{vmatrix} \text{ или}$$

где

$$p(t) = \frac{1}{2} [p_0(-t + 2t^2 - t^3) + p_1(2 - 5t^2 + 3t^3) + p_2(t + 4t^2 - 3t^3) + p_3(-t^2 + t^3)]$$

Эта аппроксимация сохраняет непрерывность производных вдоль кривой, которая проходит точно через точки половинного деления [98].

В соответствии с теорией Дин матрица рекурсивных преобразований для $w = 1/16$ имеет вид

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{16} & \frac{9}{10} & \frac{9}{10} & -\frac{1}{16} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{16} & \frac{9}{16} & \frac{9}{16} & -\frac{1}{16} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} [98].$$

Для матрицы A собственные значения λ_i и собственные векторы v_i имеют значения

$$\lambda_1 = \frac{1}{8}, \quad v_1 = \left\{ -1, -\frac{1}{8}, 0, \frac{1}{8}, 1 \right\}; \quad \lambda_2 = \frac{1}{4}, \quad v_2 = \left\{ 1, \frac{1}{4}, 0, \frac{1}{4}, 1 \right\};$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{2}, \quad v_3 = \left\{ -1, -\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}, 1 \right\}; \quad \lambda_4 = 1, \quad v_4 = \{0, 1, 0, 0\} [98].$$

Тогда для сопряженной матрицы соответствующие значения имеют вид

$$\lambda_1 = \frac{1}{8}, \quad v_1 = \{1, 2, 0, -2, 1\}; \quad \lambda_2 = \frac{1}{4}, \quad v_2 = \{1, -4, 6, -4, 1\};$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{2}, \quad v_3 = \{1, 8, 0, -8, 1\}; \quad \lambda_4 = 1, \quad v_4 = \{1, 0, 1, 1\} [98].$$

В этом случае матрица произведений собственных векторов может быть рассчитана:

$$uv = \begin{pmatrix} 3 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

тогда появляется возможность скорректировать вектор производной по Дин в точке с параметром $t = 1/2$: $\dot{p}\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{p_0 + 8p_2 - 8p_1 - p_3}{6}$ [98].

При аппроксимации кубической кривой производная в точке с параметром $t = 1/2$ имеет вид: $\dot{r}\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{p_0 + 11p_2 - 11p_1 - p_3}{8}$. Отсюда получаем выражение $\dot{p}\left(\frac{1}{2}\right) - \dot{r}\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{1}{24}(p_0 + p_2 - p_1 - p_3)$, свидетельствующее о том, что по точкам половинного деления не лежат точно на кубической кривой при условии непрерывности производных для замкнутой кривой. В данном случае для аппроксимации точек половинного деления подходящим является Catmull-Rom сплайн (рис. 3.22). Тогда можно оценить погрешность аппроксимации [98]:

$$\left| \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{24} (p_0 + p_2 - p_1 - p_3) \right| \leq \frac{1}{48} \max |p_i - p_{i+1}|.$$

При достаточной близости выбранных базовых точек погрешность на практике становится несущественной [98]. При таком подходе не сохраняется направление производных в точках половинного деления и Catmull-Rom сплайна. Экспериментальные наблюдения показали невозможность точного соблюдения равенств производных в точках. Можно попытаться вывести математическое описание сплайна, сохраняющего направление производных и соблюдающего условие (3.20) [98].

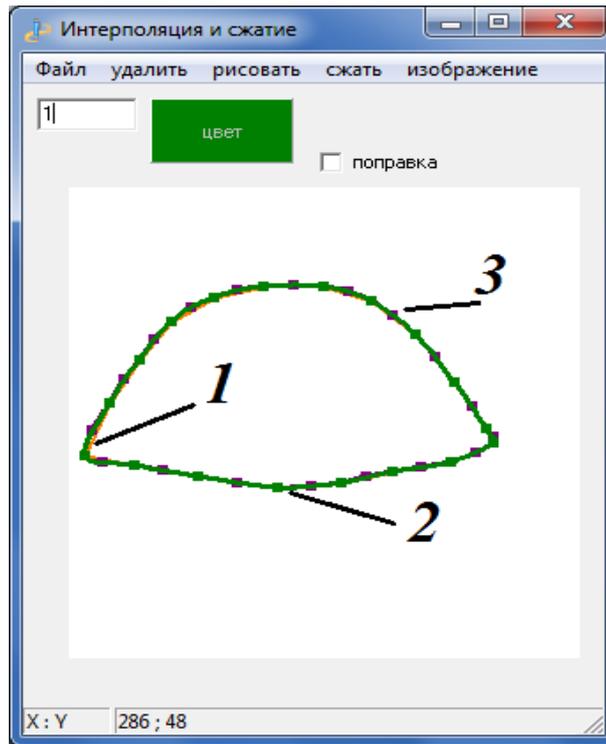


Рисунок 3.22 Пример реализации Catmull-Rom сплайна проходящего через точки половинного деления: 1 – линейная интерполяция; 2 – интерполяция базовых точек; 3 – интерполяция, проходящая через точки половинного деления [98]

Внесем в сплайн поправку e :

$$\begin{aligned}
 p(t) = & p_1(1 - 3t^2 + 2t^3) + p_2(3t^2 - 2t^3) \\
 & + \left(\frac{p_2 - p_0}{2} + e\right)(t - 2t^2 + t^3) + \\
 & + \left(\frac{p_3 - p_1}{2} + e\right)(-t^2 + t^3)
 \end{aligned} \quad (3.22)$$

Для производных вводят поправки, которые не изменяют условие прохождения кривой через точку половинного деления (3.20). С другой стороны, производную в точке при $t = \frac{1}{2}$ будем оценивать с точностью до постоянного коэффициента α :

$$\dot{p}\left(\frac{1}{2}\right) = \alpha(p_0 + 8p_2 - 8p_1 - p_3) \quad (3.23)$$

Продифференцировав (3.22), приняв значение $t = \frac{1}{2}$, приравняем полученный результат к (3.23) и выражаем поправку [98]:

$$e = p_0 \left(\frac{1}{4} - 2\alpha \right) - p_1 \left(\frac{11}{4} + 16\alpha \right) + p_2 \left(\frac{11}{4} - 16\alpha \right) - p_3 \left(\frac{1}{4} - 2\alpha \right).$$

Выбираем $\alpha = 1/8$, тогда

$$e = -\frac{3p_1}{4} + \frac{3p_2}{4};$$

$$\dot{p}_1 = \frac{p_2 - p_0}{2} - \frac{3}{4}p_1 + \frac{3}{4}p_2 = \frac{5p_2 - 3p_1 - 2p_0}{4};$$

$$\dot{p}_2 = \frac{p_3 - p_1}{2} - \frac{3}{4}p_1 + \frac{3}{4}p_2 = \frac{2p_3 + 3p_2 - 5p_1}{4}.$$

Аппроксимируя, можно описать математическую кривую между двумя соседними точками p_i и p_{i+1} :

$$p(t) = \frac{1}{2} \left[p_{i-1}(-t + 2t^2 - t^3) + p_i \left(2 - \frac{3t}{2} - \frac{t^2}{2} \right) + p_{i+1} \left(\frac{5t}{2} - \frac{t^2}{2} \right) \right] + \frac{1}{2} p_{i+2}(-t^2 + t^3). \quad (3.24)$$

Теперь при последовательном обходе точек p_0, p_1, \dots, p_n дадим их описание в виде интерполирующих полиномов третьей степени. При этом оценки производной в точке p_1 , полученные в начале и конце обхода, не совпадают. Приравняем их и получим условие: $p_1 = (p_0 - p_2)/2$, т.е. точка p_1 лежит на середине отрезка, соединяющего p_0 и p_2 [98].

Отсюда следует, что при построении кривой необходимо добавлять в исходную последовательность фиктивную точку $p_1^|$ в середину отрезка $\overline{p_0 p_2}$. Первые точки p_0 и p_2 необходимо выбирать близко друг к другу (рис. 3.26) [98].

Оценим погрешности аппроксимации:

$$\left| \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{24} (p_0 + 8p_2 - 8p_1 - p_3) \right| \leq \frac{3}{32} \max |p_i - p_{i+1}| \quad [98].$$

На этапе экспериментальной работы рассмотрим произвольные кривые и сравним Catmull-Rom и сплайн с корректирующей поправкой. В качестве исходных данных взята кривая, описываемая уравнениями:

$$x = 100 + 10 * \cos \frac{2\pi}{n} + \varepsilon_x$$

$$y = 100 + 20 * \sin \frac{2\pi}{n} + \varepsilon_y,$$

где $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ – нормально распределенные величины с нулевым средним и дисперсией σ^2 (рис. 3.23) [98].

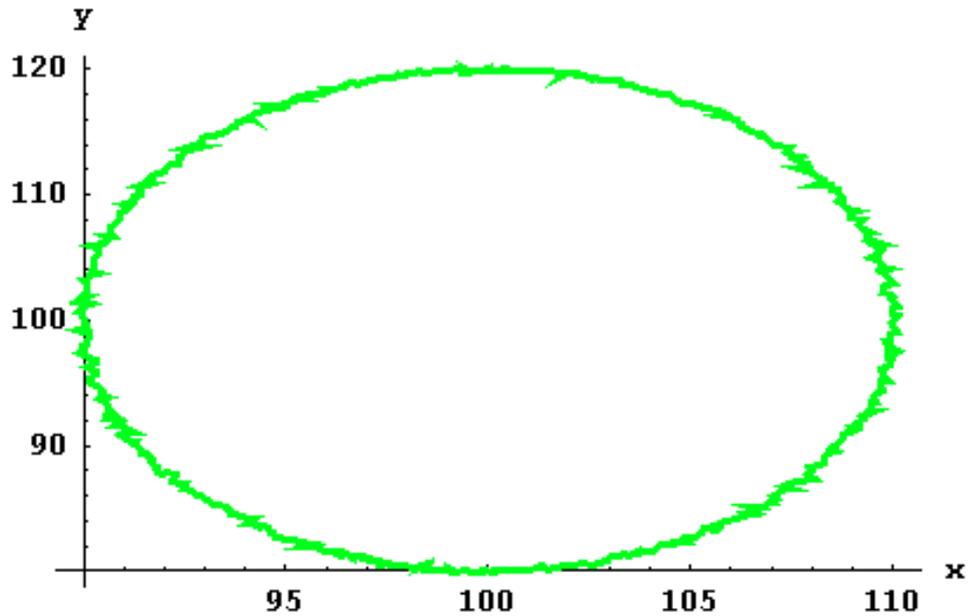


Рисунок 3.23 Эллипс с дисперсией [98]

Вторые производные справа и слева от i -ой точки вычислены по формулам:

$$D'_{i+} = \ddot{r}_{i\epsilon \rightarrow 0} = -6p_i + 6p_{i+1} - 4D_i - 2D_{i+1}$$

$$D'_{i-} = \ddot{r}_{i\epsilon \rightarrow -1} = 6p_{i-1} - 6p_i + 2D_{i-1} + 4D_i$$

Значения вторых производных для нескольких последовательных точек (всего точек 500, при уровне шума $\sigma=0.1$) приведены в таблице 8 [98].

Таблица 8 Значения приближений вторых производных для двух видов сплайнов

Catmull-Rom сплайн		сплайн с корректирующей поправкой	
D'_{i+}	D'_{i-}	D'_{i+}	D'_{i-}
{0.2, -0.1}	{0.3, -0.1}	{-0.5, 0}	{-0.1, 0}
{-0.2, 0}	{-0.2, 0.1}	{0, -0.1}	{0.4, 0}
{0.3, 0}	{0.2, 0}	{-0.4, 0}	{0, 0.1}
{-0.4, 0}	{-0.4, 0}	{0.4, -0.1}	{0.8, 0}
{0.5, 0}	{0.4, 0}	{-1, 0}	{-0.8, 0}
{-0.8, 0}	{-0.6, 0}	{0.9, -0.1}	{1, 0}
{0.6, 0}	{0.7, 0}	{-0.6, 0}	{-0.2, 0.1}

По результатам эксперимента можно вычислить среднюю квадратичную ошибку $S = \sqrt{\frac{\sum_i p^2(D'_{i+}, D'_{i-})}{n-1}}$, где D'_{i+} — значение второй производной в точке i справа, D'_{i-} — значение второй производной в точке i слева, n — число точек, а $\rho(x, y)$ — евклидово расстояние между точками x и y .

Построены графики зависимости средней квадратичной ошибки вторых производных S от уровня шума (рис. 3.24), и зависимости S от числа точек на контуре (n) (рис. 3.25) для двух видов сплайнов» [98].

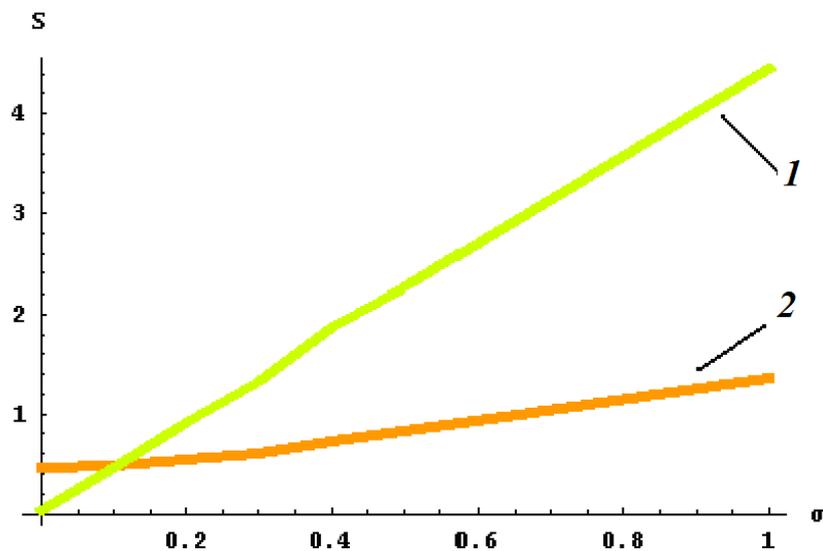


Рисунок 3.24 График зависимости квадратичной ошибки S от величины шума (число точек 500), 1 – Catmull-Rom сплайн, 2 – сплайн с корректирующей поправкой

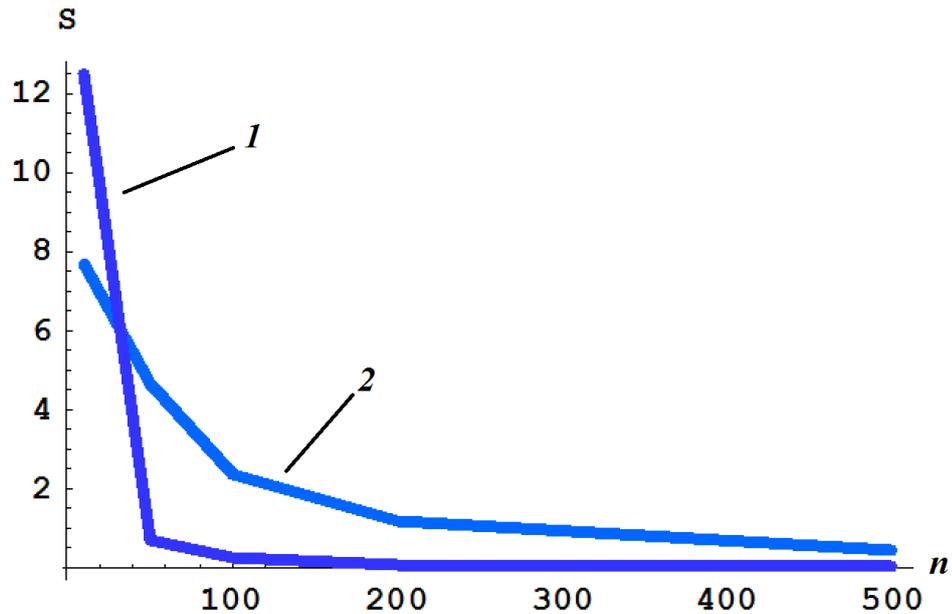


Рисунок 3.25 График зависимости квадратичной ошибки S от количества точек n ($\sigma=0$): 1 – Catmull-Rom сплайн, 2 – сплайн с корректирующей поправкой

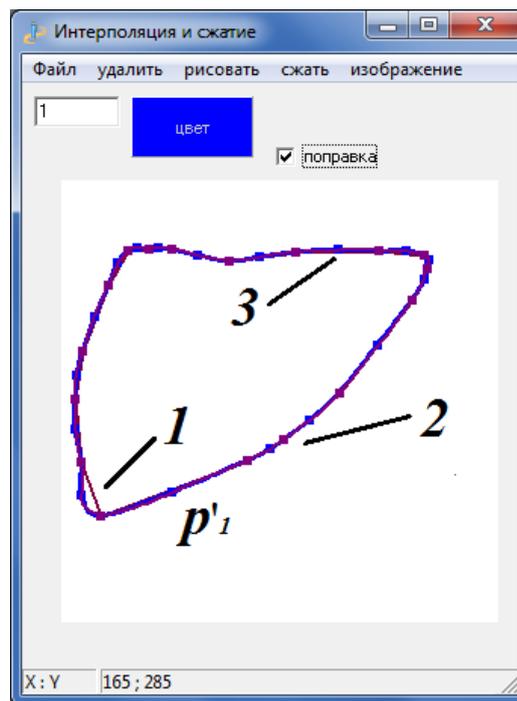


Рисунок 3.26 Сплайн (3.24) с поправкой, проходящий через точки половинного деления: 1 – линейная интерполяция; 2 – интерполяция базовых точек; 3 – интерполяция, проходящая через точки половинного деления; p'_1 – фиктивная точка [98]

Полученная кривая не инвариантна к направлению обхода контура, имеет большую погрешность аппроксимации, поэтому мы выбираем Catmull-Rom

сплайн, который позволяет быстро и просто строить кубическую кривую по заданным базовым точкам [98]. Сделаем оценку производных на основе, используя классический параметрический сплайн.

3.2.2. Приближение к классическому сплайну в 2D

Классический параметрический сплайн для производных D_0, \dots, D_n в точках p_0, \dots, p_n замкнутого контура плоской фигуры предполагает выполнение равенства

$$D_{i-1} + 4D_i + D_{i+1} = 3(p_{i+1} - p_{i-1}) \quad (3.25)$$

Из единственности кубического сплайна при выполнении (3.25) для производных в точках осуществляется условие непрерывности вторых производных [99].

Необходимо отметить, что при аппроксимации по точкам половинного деления получается гладкий сплайн без удовлетворения условия непрерывности второй производной [98]. Возникает желание найти математическое описание кривой с условием приближенной непрерывности вторых производных в заданных на плоскости точках.

Для данной замкнутой совокупности точек на плоскости (3.25) можно записать в виде

$$A_{n+1}D = 3B, \quad (3.26)$$

где матрица-циркулянт

$$A_{n+1} = \begin{pmatrix} 4 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 4 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 4 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 4 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 4 \end{pmatrix},$$

$D = (D_0 \dots D_n)^T$ – вектор производных в точках, а

$$B = \begin{pmatrix} p_1 - p_n \\ p_2 - p_0 \\ \dots \\ p_0 - p_{n-1} \end{pmatrix}$$

Решение (3.26) можно представить в виде, $D = 3A_{n+1}^{-1}B$, но матрица A_{n+1}^{-1} содержит элементы $a_{ij}^{-1} (i = 0, n, j = 0, n)$ все не равные нулю. Это значит, что значение $D_i (i = 0, n)$ зависит от координат всех точек на плоскости. Например,

$$A_5^{-1} = \begin{pmatrix} 0.28789 & -0.07575 & 0.01515 & 0.01515 & -0.07575 \\ -0.07575 & 0.28789 & -0.07575 & 0.01515 & 0.01515 \\ 0.01515 & -0.07575 & 0.28789 & -0.07575 & 0.01515 \\ 0.01515 & 0.01515 & -0.07575 & 0.28789 & -0.07575 \\ -0.07575 & 0.01515 & 0.01515 & -0.07575 & 0.28789 \end{pmatrix}$$

Необходимо отметить, что некоторые элементы обратной матрицы близки к нулю, это дает надежду на то, что можно сделать приближение для $D_i (i = 0, n)$, которое дает аппроксимацию контура с почти выполняемым условием для непрерывности второй производной» [99].

$$A_5^{-1} \cong \begin{pmatrix} 0.28789 & -0.07575 & 0 & 0 & -0.07575 \\ -0.07575 & 0.28789 & -0.07575 & 0 & 0 \\ 0 & -0.07575 & 0.28789 & -0.07575 & 0 \\ 0 & 0 & -0.07575 & 0.28789 & -0.07575 \\ -0.07575 & 0 & 0 & -0.07575 & 0.28789 \end{pmatrix} [99].$$

Матрица A_{n+1}^{-1} тоже является циркулянтном, и ее значимые элементы находятся выше и ниже диагонали с учетом циркуляции. Нашей задачей является нахождение оценок $D_i (i = 0, n)$, которые дают приближение к условию непрерывности вторых производных. Таким образом, в матрице A_{n+1}^{-1} необходимо определить элементы $a_{00}^{-1}, a_{01}^{-1}, a_{0n}^{-1}$, для которых нам понадобятся значения некоторых определителей, в частности матрицы-циркулянта Якоби, в нашем случае имеющая вид [99]

$$J_n = \begin{pmatrix} 4 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 4 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 4 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 4 \end{pmatrix} \quad (3.27)$$

Обозначим определитель (3.27) через $P(n)$, где n — размерность матрицы.

Тогда $P(n)$ удовлетворяет следующему уравнению

$$P(n+2) = 4P(n+1) - P(n) \quad (3.28)$$

с условиями $P(0) = 1, P(1) = 4$.

Решение (3.28) имеет вид:

$$P(n) = \frac{(2+\sqrt{3})^2}{(2+\sqrt{3})^2-1} (2+\sqrt{3})^n - \frac{1}{(2+\sqrt{3})^2-1} (2-\sqrt{3})^n \quad [99].$$

Так как $(2-\sqrt{3}) < 1$, то справедливо приближение

$$P(n) \cong \frac{(2+\sqrt{3})^2}{(2+\sqrt{3})^2-1} (2+\sqrt{3})^n \quad [99].$$

Ниже приведены значения $P(n)$, округленные до целых [99]:

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P(n)$	15	56	209	780	2 911	10 864	40 545	151 316	564 719
$P1(n)$	15	56	209	780	2 911	10 864	40 545	151 316	564 719

Рассмотрим вычисления определителя матрицы-циркулянта A_n . Из [100] следует, что определитель матрицы $Det A_n = f(\varepsilon_1)f(\varepsilon_2)\dots f(\varepsilon_n)$, где ε_i — попарно различные корни n -ой степени из единицы, а $f(x) = 4 + x + x^{n-1} = x^{-1} (4x + x^2)$ при учете того, что $x^n = 1$ [99].

С другой стороны $f(x) = x^{-1}(1 + (2 + \sqrt{3})x)(1 + (2 - \sqrt{3})x)$. Если $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ – корни уравнения $x^n = 1$, тогда $(x - \varepsilon_1)(x - \varepsilon_2) \dots (x - \varepsilon_n) = x^n - 1$. Отсюда сумма попарных произведений ε_i и т.п. равны нулю, и $\prod_{i=1}^n \varepsilon_i = -1$, а

$$Det A = \prod_{i=1}^n (1 + (1 + \sqrt{3})\varepsilon_i) \prod_{i=1}^n (1 + (1 - \sqrt{3})\varepsilon_i) \prod_{i=1}^n \varepsilon_i = (1 - 1 + 3n - 1 - 3n - 1 = 2 + 3n - 1 - 2 - 3n) \quad [99].$$

Тогда, аналогично $Det A_n \cong R_n \cong (2 + \sqrt{3})^n$. Это приближение достаточно точное, как видно из таблицы 9.

Таблица 9 Сравнительная таблица значений $Det A_n$ и R_n [99].

n	3	4	5	6	7	8	9
$Det A_n$	54	192	726	2 700	10 086	37 632	140 454
R_n	52	194	724	2 702	10 084	37 634	140 452

Отсюда можно определить правый угловой элемент матрицы A_n^{-1}

$$\gamma_1 = a_{00}^{-1} = \frac{(2 + \sqrt{3})}{(2 + \sqrt{3})^2 - 1} \approx 0,288675$$

Для определения значения $a_{01}^{-1} = a_{0n}^{-1}$ рассмотрим алгебраическое дополнение этого элемента в матрице A_{n+1} , которое равно

$$|Det J_{n-1}| \approx \frac{(2 + \sqrt{3})^2}{(2 + \sqrt{3})^2 - 1} (2 + \sqrt{3})^{n-1}$$

$$\text{Отсюда} \quad \gamma_2 = a_{01}^{-1} = \frac{-1}{(2 + \sqrt{3})^2 - 1} \approx -0,0773503$$

Тогда оценка производной D_i в точке p_i может быть взята в виде:

$$D_i = 3(\gamma_1(p_{i+1} - p_{i-1}) + \gamma_2(p_i - p_{i-2}) + (p_{i+2} - p_i)) \cong 3(0,289(p_{i+1} - p_{i-1}) - 0,78(p_{i+2} - p_{i-2})).$$

Сделаем попытку упрощения оценки производной в виде

$$D_i = 3a(p_{i+1} - p_{i-1}) \quad (3.29)$$

и будем подбирать параметр a таким образом, чтобы минимизировать квадрат модуля вторых производных в i -ой точке

$$|D'_{i+1} - D'_{i-1}|^2 \rightarrow \min \quad [99].$$

Отсюда имеем функционал

$$|6p_{i+1} - 6p_{i-1} - 4D_i - 2D_{i+1} - 2D_{i-1} - 4D_i|^2 \rightarrow \min \quad [99].$$

Подставляя для каждого i значения производных в виде (3.29) и, минимизируя относительно параметра a (при учете, что $p_i = x_i, y_i$), получаем

$$a = \frac{x_{i-2} + 4x_{i-1} - 4x_{i+1} - x_{i+2} (x_{i-1} - x_{i+2})}{x_{i-2} + 4x_{i-1} - 4x_{i+1} - x_{i+2} + x_{i-2} + 4x_{i-1} - 4x_{i+1} - x_{i+2}} + \frac{y_{i-2} - 4y_{i-1} + 4y_{i+1} - y_{i+2} (y_{i-1} - y_{i+2})}{x_{i-2} + 4x_{i-1} - 4x_{i+1} - x_{i+2} + x_{i-2} + 4x_{i-1} - 4x_{i+1} - x_{i+2}} \quad [99].$$

Если предположить, что точки на контуре лежат достаточно плотно, тогда для $p_{i-2}, p_{i-1}, p_i, p_{i+1}, p_{i+2}$ справедлива простая зависимость $y = kx + b$, тогда

$$a = \frac{x_{i-2} + 4x_{i-1} - 4x_{i+1} - x_{i+2} (x_{i-1} - x_{i+2}) (+k^2)}{x_{i-2} + 4x_{i-1} - 4x_{i+1} - x_{i+2} (+k^2)} = \frac{x_{i-1} - x_{i+2}}{x_{i-2} + 4x_{i-1} - 4x_{i+1} - x_{i+2}}.$$

Введем $\Delta_k = x_{k+1} - x_k$, тогда, если выдвинуть предположение, что для лю-

бого i $\Delta_i \approx \Delta$, то имеем $a = \frac{2\Delta}{12\Delta} = \frac{1}{6}$. Следовательно оценка производной в точке

определяется выражением $D_i = \frac{p_{i+1} - p_{i-1}}{2}$.

Оценка производной показала, что сплайн не сохраняет непрерывность вторых производных с нужной для проектирования обуви точности. Рассмотрим осредняющий оператор для описания контура шаблонов обуви.

3.2.3. Осредняющий оператор

Задача обработки экспериментальных данных состоит в выделении информативной части при уменьшении помех, порожденных различными факторами. В рассматриваемом подходе предположим кусочно-полиномиальную информативную часть: степень полинома не более 3; помеха — высокочастотная составляющая по отношению к информативной части [101].

В общем случае обработка данных сводится к построению осредняющего оператора типа «сверка»:

$$\tilde{f}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} K(y-x)f(y)dy = K \hat{*} f,$$

где $\tilde{f}(x)$ — результат осреднения; $f(x)$ — исходная функциональная зависимость между данными; $K(t) \in L_2(R^1)$ — ядро оператора; $\hat{*}$ — операция свертки. Будем говорить, что осреднение сохраняет исходную функциональную зависимость, если

$$K \hat{*} f = f \quad (3.30)$$

Можно показать, что линейное пространство функций, сохраняемых при осреднении (3.30), инвариантно по отношению к дифференцированию [101].

В данном примере, (рис. 3.27), взяты экспериментальные данные с кубической зависимостью и аддитивным гауссовским шумом уровня 1. Согласно [102], в пространстве функций полиномиального роста общее решение уравнения

$$\int_{-\infty}^{\infty} K(y-x)f(y)dy = f(x) \text{ имеет вид } f(t) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=0}^{m_i-1} A_{ik}t^k, \text{ где } n, m_1, m_2, \dots, m_n$$

— некоторые натуральные числа; A_{ik} — неопределенные коэффициенты.

Для этого необходимо и достаточно, чтобы преобразование Фурье $\hat{K}(\zeta)$ функции $K(t)$, удовлетворяло условиям [101]:

$$\hat{K}(-iz) = 1;$$

$$\frac{d^q}{d\zeta^q} \hat{K}(-iz) = 0, q = 1, 2, \dots, s.$$

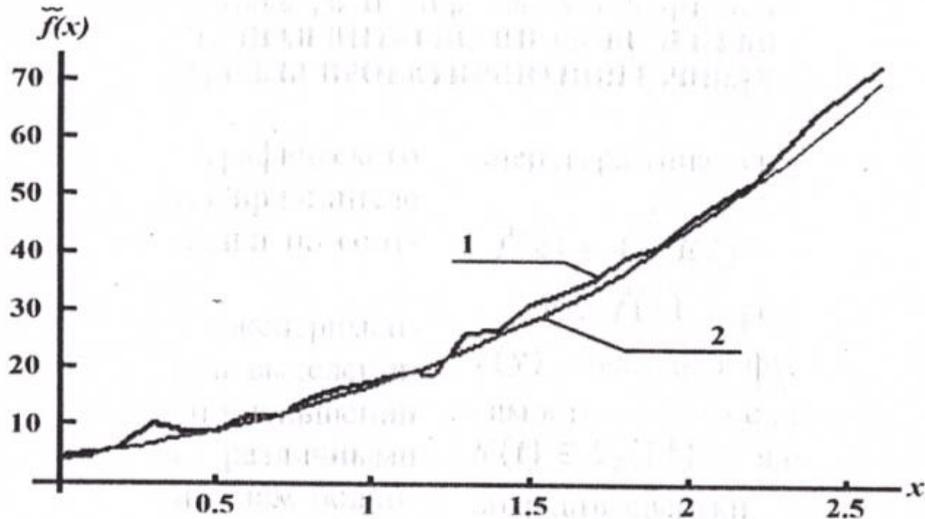


Рисунок 3.27 Процесс осреднения экспериментальных данных при числе точек $n=6$: 1 — экспериментальные точки; 2 — результат осреднения [101]

Для кубических сплайнов желательно, чтобы ядро оператора было в виде кусочно-постоянной функции [101]:

$$K_{n+1}(t) = \begin{cases} a_k, & t \in (k-3, k-2), k = \overline{1,4}; \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

Выполнение этого условия возможно в том случае, когда преобразование Фурье $\widehat{K}_{n+1}(z)$ такое, что $\widehat{K}_{n+1}(z) - 1$ в точке $z = 0$ имеет корень кратности 4. Сказанное приводит к системе [101]

$$\begin{cases} \sum_{l=1}^4 \alpha_l \int_{-2}^{-1} 1 dt = 1; \\ \sum_{l=1}^4 \alpha_l \int_{-2}^{-1} t^k dt = 0, k = 1, 2, 3. \end{cases}$$

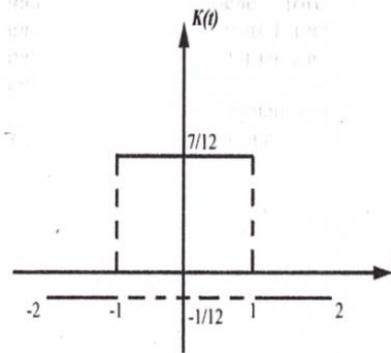
После интегрирования получим:

$$\sum_{l=1}^4 \alpha_{kl} a_l = \begin{cases} 1, & k = 1; \\ 0, & k \neq 1, \end{cases}$$

где $\alpha_{kl} = [(l-2)^k - (l-3)^k]$, $k, l = 1, 2, 3, 4$. При замене переменных $\beta_l = \alpha_{2+l}$, $l = 1, 2$, задача трансформируется в систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} 2\beta_1 + 2\beta_2 = 1; \\ 2\beta_1 + 14\beta_2 = 0 \end{cases}$$

Откуда $\beta_1 = \frac{7}{12}$, $\beta_2 = -\frac{1}{12}$, и ядро осредняющего оператора имеет вид:



Алгоритм работы этого осредняющего оператора достаточно прост: суммируем данные в интервале $(k-3, k-2)$, $k = \overline{1,4}$; с коэффициентом $K_{n+1}(t)$ на этом интервале. Общая сумма дает усредненное значение в начале координат. После этого делаем сдвиг данных на заданный шаг, повторяем процедуру и получаем следующую осредненную точку. Нас интересует случай, когда в интервале находится 1 точка [101].

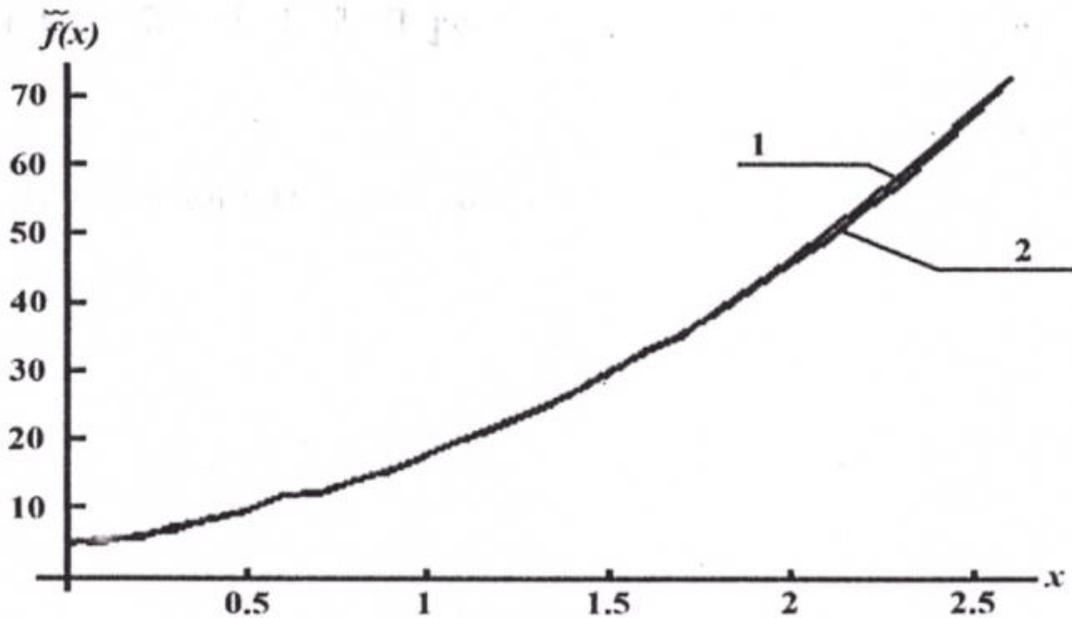


Рисунок 3.28. Результат осреднения экспериментальной кривой при $n=1$:

1 — экспериментальные точки; 2 — результат осреднения [101]

Выбор положения точек в интервале при данном подходе не имеет принципиального значения, поэтому мы отнесем точки к концам интервалов, т.е. при $t = -2, -1, 1, 2$. В результате мы получим четырехточечную схему:

$$p_{2i}^{k+1} = p_i^k, -1 \leq i \leq 2^k n + 1$$

$$p_{2i+1}^{k+1} = \frac{7}{12}(p_i^k + p_{i+1}^k) - \frac{1}{12}(p_{i-1}^k + p_{i+2}^k), -1 \leq i \leq 2^k n,$$

где $p_0 \in R^2, p_i^0 = p_i, -2 \leq i \leq n + 2$, k — номер итерации, n — количество точек [101].

Этот метод совпадает с предложенной интерполяционной схемой Дина, Левина и Грегори, но при $\omega = \frac{1}{12}$ она сохраняет кубический сплайн [98],[99],[97].

Так как на практике приходится вычислять касательные и нормали, необходима такая параметризация, с помощью которой легко производить операцию дифференцирования. Для этого очень удобен кубический полином, в частности в форме Фергюсона – Эрмита [101]:

$$r(t) = r_1(1 - 3t^2 + 2t^3) + r_2(3t^2 - 2t^3) + \dot{r}_1(t - 2t^2 + t^3) + \dot{r}_2(-t^2 + t^3)$$

где $r_1 = p_1, r_2 = p_2$ — координаты начальной и конечной точек; \dot{r}_1, \dot{r}_2 — векторы касательных в точках; t — независимый параметр, изменяющийся в интервале $[0,1]$.

Приравняв значение $r = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}$ и значение усредненного полинома, получим $\frac{7}{12}p_1 + \frac{7}{12}p_2 - \frac{1}{12}p_0 - \frac{1}{12}p_3 = \frac{1}{2}p_1 + \frac{1}{2}p_2 + \frac{1}{8}\dot{r}_1 - \frac{1}{8}\dot{r}_2$ или $\dot{r}_2 - \dot{r}_1 = \frac{2}{3}(p_0 - p_1 - p_2 + p_3)$. «Теперь можно ввести оценки векторов касательных в точках p_1, p_2 : $\dot{r}_1 = \frac{2}{3}(p_2 - p_0), \dot{r}_2 = \frac{2}{3}(p_3 - p_1)$ [101].

В нашем случае матрица рекурсивных преобразований имеет вид

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{12} & \frac{7}{12} & \frac{7}{12} & -\frac{7}{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{12} & \frac{7}{12} & \frac{7}{12} & -\frac{1}{12} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Для этой матрицы собственные значения следующие

$$\lambda_1 = \frac{1}{6}, \lambda_2 = \frac{1}{2}, \lambda_3 = 1,$$

$$\lambda_4 = \frac{1}{12}(3 - i\sqrt{3}), \lambda_5 = \frac{1}{12}(3 + i\sqrt{3}).$$

Отсюда можно сделать вывод об осциллирующем характере сходимости четырехточечной схемы:

$$\lambda_4 = \frac{1}{12}(3 - i\sqrt{3}) = \frac{1}{\sqrt{12}}\left(\frac{\sqrt{3}}{2} - i\frac{1}{2}\right) = \frac{1}{\sqrt{12}}(\cos \alpha - i \sin \alpha), \text{ где } \alpha = \frac{\pi}{6}.$$

Значит, период колебаний T точек относительно кубической кривой равен 12 или $T=12$ [101].

В качестве эксперимента этой четырехточечной схемы взяли 7 исходных точек на плоскости. Построили растровую аппроксимацию и сравнили ее с кубическим сплайном при $\omega = \frac{1}{12}$ [101] (рис. 3.29).

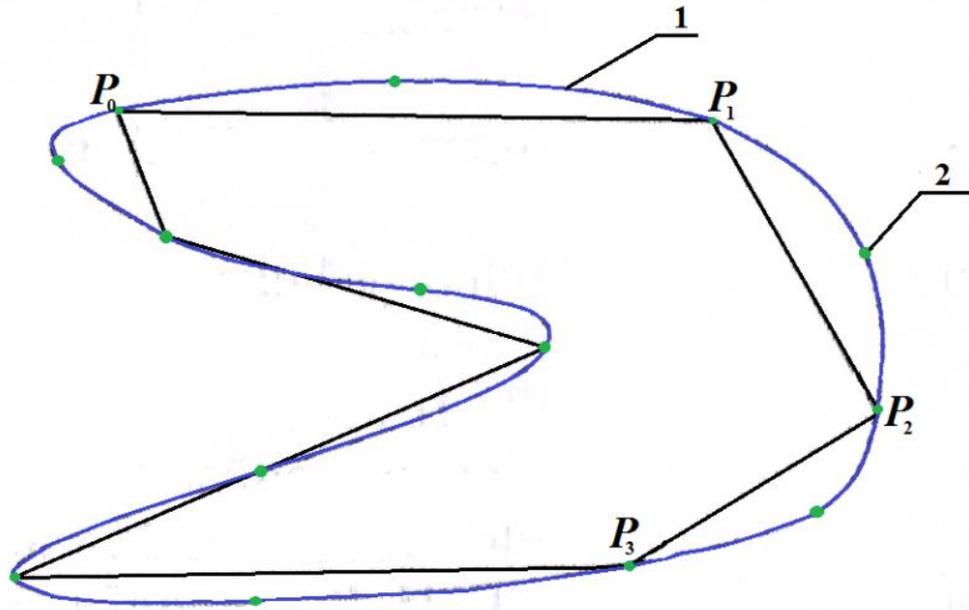


Рисунок 3.29 Последовательность точек на кривой:

1 — кубический сплайн; 2 — точка половинного деления

«

В результате исследований получена четырехточечная схема кубического сплайна:

$$p(t) = \frac{1}{3}[p_{i-1}(-2t + 4t^2 - 2t^3) + p_i(3 - 7t^2 + 4t^3) + p_{i+1}(2t + 5t^2 - 4t^3) + p_{i+2} - 2t^2 + 2t^3] \text{ [101].}$$

Показано, что при $\omega = \frac{1}{12}$ кривая проходит через точки интерполирующей схемы с небольшой осцилляцией. Проведенные эксперименты показали, что дан-

ный подход дает удовлетворительные результаты аппроксимации, а простота алгоритма делает его удобным в практической деятельности [101].

Заключительная задача на этапе проектирования конструкций верха обуви – сохранение информации в файл и передача её в смежные модули. Эта задача эффективно осуществляется с помощью нейронных сетей.

3.3. Способ интеграции в модуль «Раскладка» информации о шаблонах деталей обуви

В 1950 году Алан Тьюринг опубликовал статью, в которой описываются критерии разумности для машины (тест Тьюринга) [103]. Уже через 7 лет нейрофизиолог Фрэнком Розенблаттом предложил модель персептрона, а в 1960 году был создан первый нейрокомпьютер Марк-1. Машина позволяла без участия человека производить разбиение объектов на два класса [104]. Таким образом, было положено начало методам распознавания образов и искусственного интеллекта. В 1975 Вербос представил сеть с обратным распространением ошибки (рис. 3.30), а Фукусима – первую многослойную сеть. В 1982 году появились сети Хопфилда, которые позволяли передавать информацию в двух направлениях, позже появились сети, способные обучаться [105].

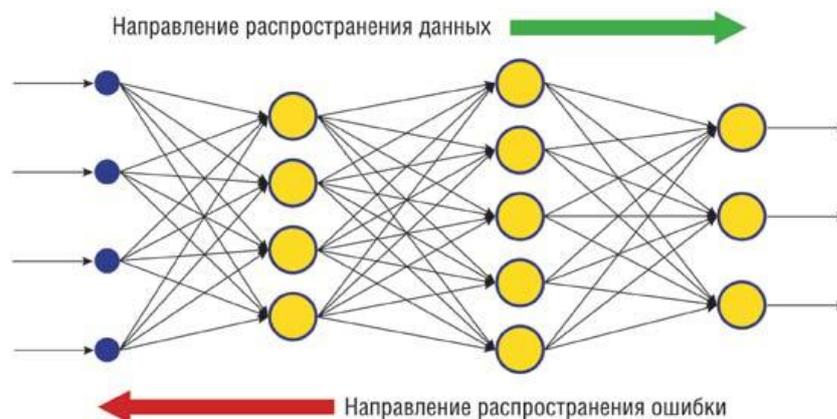


Рисунок 3.30 Многослойная нейронная сеть с обратным распространением ошибки [106]

Области применения нейронных сетей различны, в частности в обработке изображений для:

- подавления шума;
- распознавания образов и их классификация;
- сжатия данных;
- сегментации изображений и обнаружения краев.

Рекуррентные нейронные сети (англ. Recurrent neural network; RNN) являются мощным инструментом, позволяющим обрабатывать последовательности данных произвольной длины. Её структура похожа на многослойный персептрон, но содержит обратные связи. С помощью этих соединений модель может хранить информацию. Однако существенный недостаток рекуррентных нейронных сетей – трудность в обучении. Подходы 1-ого порядка, такие как градиентный спуск, не способны правильно обучить сеть даже в тех случаях, когда решение находится в 10 временных шагах. В 90-х годах интенсивно исследовались причины плохого обучения РНС и возможные пути решения [107].

Алгоритм обратного распространения во времени (back-propagation-through-time algorithm — ВРПТТ), применяемый для обучения рекуррентных сетей, является расширением стандартного алгоритма обратного распространения. Он может быть получен путем развертывания временных операций сети в многослойной сети прямого распространения, топология которой расширяется на один слой для каждого шага времени [108]. В результате развертывания веса сети рассчитываются очень долго и как следствие, она становится трудно обучаемой.

На основе RNN и выведенного сплайна нами предложен рекуррентный компьютер, не требующий развертывания, что значительно ускоряет процесс расчета (рис. 3.31). На вход поступают только данные, с которыми непосредственно производятся математические вычисления (координаты 4 точек). Выходная информация записывается в начало обрабатываемого массива. Предложенную сеть можно использовать как инструмент для уточнения контура, т.е для большого числа итераций (6-9) получить линейное описание последовательности точек.

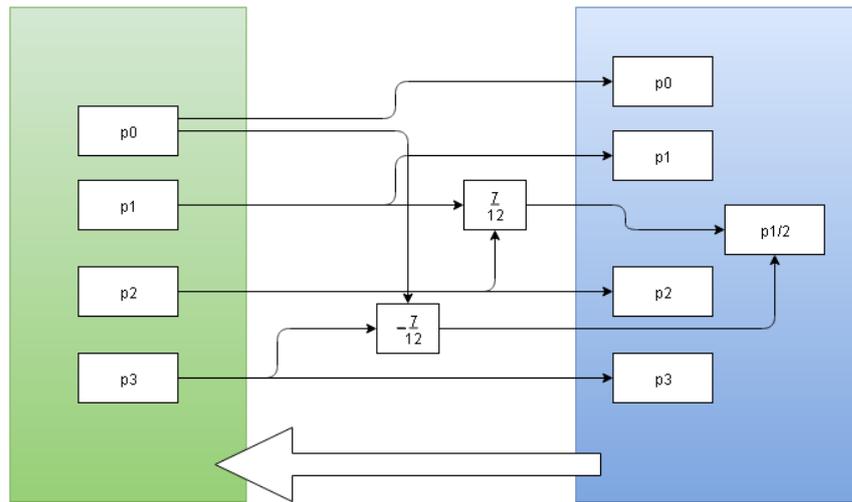


Рисунок 3.31 Рекуррентный компьютер на базе разработанного сплайна

Обычно в процессе обработки изображения после алгоритма векторизации получают избыточное описание объекта в виде массива точек, который необходимо сжать [109]. Предположим, что математическим описанием заданного контура является сплайн

$$p(t) = \frac{1}{3} [p_{i-1}(-2t + 4t^2 - 2t^3) + p_i(3 - 7t^2 + 4t^3) + p_{i+1}(2t + 5t^2 - 4t^3) + p_{i+2}(-2t^2 + 2t^3)] \quad (3.31)$$

Тогда для определения координаты точки $p_{i+\alpha}$, которая лежит между p_1 и p_2 , необходимо решить кубическое уравнение: $p_{i+\alpha} = a \cdot t^3 + b \cdot t^2 + c \cdot t + d$ относительно t . Его можно свести к квадратному уравнению, введя чебышевскую аппроксимацию [110],

$$p_{i+\alpha} = a(1.5t^2 - 0.5625t + 0.03125) + b \cdot t^2 + c \cdot t + d.$$

Отсюда получаем:

$$t = \frac{0.562a - c \pm \sqrt{(-0.562a - c)^2 - 4(1.5a + b)(0.03125a + d + p_{i+a})}}{3a + 2b} \quad (3.32)$$

Знак в (3.32) выбираем из условия $0 \leq t \leq 1$.

Алгоритм [111]. Для всех точек массива выполняем следующие шаги:

- находим значение t по формуле (3.32), в качестве коэффициентов берем проекции точек на ось x . Если $t \notin [0,1]$, то выполняем п.1 для проекций на y ;

- подставляем t в сплайн (3.31) и получаем проекцию точки $p'_{i+\alpha}$ на ось y (или x);
- вычисляем $|p'_{i+\alpha} - p_{i+\alpha}|$ и сравниваем с допустимым значением Δ
- Если $|p'_{i+\alpha} - p_{i+\alpha}| \leq \Delta$, то точка $p_{i+\alpha}$ не является базовой и её можно не учитывать, поэтому удаляем её из исходного массива.

Повторяем алгоритм до тех пор, пока можно исключить хотя бы одну точку [111].

Программная реализация алгоритма.

Функция *sgat*, описанная в классе *PolyLine*, вызывается для кривой, указанной пользователем. Входными параметрами является заданное значение точности *ee*.

1. Создаем вспомогательный динамический массив *mas* для записи базовых точек и начинаем два цикла. Запоминаем исходное количество точек в переменную *n1*.
2. Определяем первые четыре точки: p_0, p_1, p_2, p_3 и точку «половинного деления» $p_{1/2}$.
3. Вычисляем коэффициенты при t^3, t^2, t для проекций на ось x :

$$a_x = \frac{2}{3}(-p_{0x} + 2p_{1x} - 2p_{2x} + p_{3x}); \quad b_x = \frac{1}{3}(4p_{0x} - 7p_{1x} + 5p_{2x} - 2p_{3x}); \quad c_x = 23 - p_{0x} + p_{2x}.$$
4. По формуле (3.32) находим значение t . В силу того, что мы решаем квадратное уравнение, то решений будет два. Однако они могут не входить в интервал $[0,1]$, поэтому мы должны проверить: принадлежат ли найденные корни этому интервалу и в случае необходимости исключить заведомо ложные корни. Если мы не получили подходящих значений t , то возвращаемся к пункту 2, но вычисляем коэффициенты a_y, b_y, c_y .

5. Вычисляем проекции коэффициентов на ось y и значение ординат проверяемой точки, записываем результат в переменную $p4.y$.
6. Находим модуль разности истинного значения точки и вычисленного, сравниваем результат с допустимым значением ee . Если разность больше ee , точку отбросить мы не можем, поэтому запоминаем её в массив, иначе уменьшаем значение переменной n , отвечающей за количество точек, на 1.
7. Запоминаем базовую точку p_1 [111].

Выполняем пункты 2-7 для всех точек кривой [111].

Сравниваем значение исходного количества точек и полученное $n1 \vee n$:

- если исходное больше ($n1 > n$), то продолжаем алгоритм. Заменяем исходный массив точек *points* на *mas* и возвращаемся к пункту 1.
- если значения окажутся равными, то мы завершаем алгоритм и в массиве *points* находятся искомые базовые точки [111].

Для получения номера точек вызывается процедура *mod*, в которой вычисляется индекс точки по модулю от их общего числа. Функция *sgat*, описанная в классе *PolyLine*, вызывается для кривой, указанной пользователем. Входными параметрами является заданное значение точности ee [111].

На этапе экспериментальной работы в качестве исходных данных выбираем изображения разных деталей обуви (берцы, союзка, задинка). Загружаем картинку и вручную векторизуем изображения: расставляем по контуру детали точки с разным интервалом и плотностью (рис 3.33, линия 1). В углах детали желательно расставить больше точек, а на прямых участках можно ограничиться меньшим числом. На рисунке 3.34 (линия 1) приведен вариант кривой, полученной после применения программного алгоритма векторизации. Далее сжимаем исходный массив по алгоритму, описанному выше (рис 3.33 и 3.34, линия 2) [111]. Результаты эксперимента представлены в таблице 10.

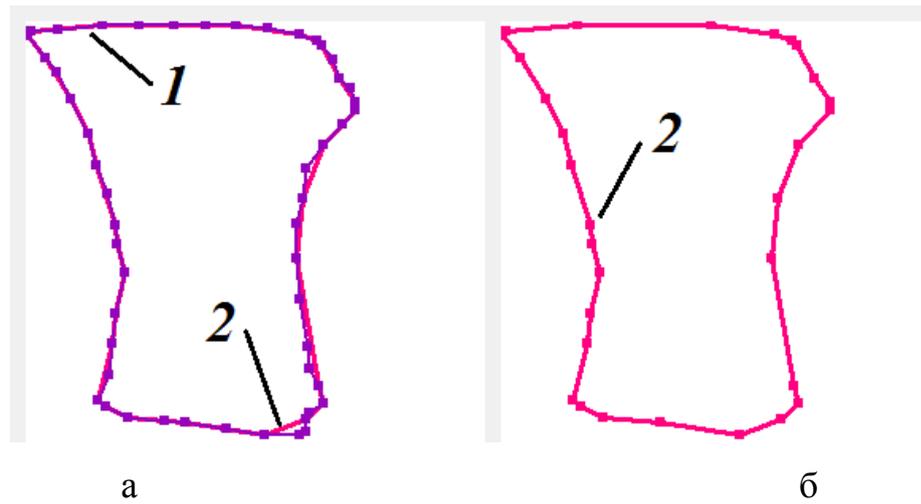


Рисунок 3.32 Сжатие информации о детали обуви (берец):
 1 – исходная линия, 2 – линия сжатия, а – исходная кривая, б-
 кривая после применения алгоритма сжатия

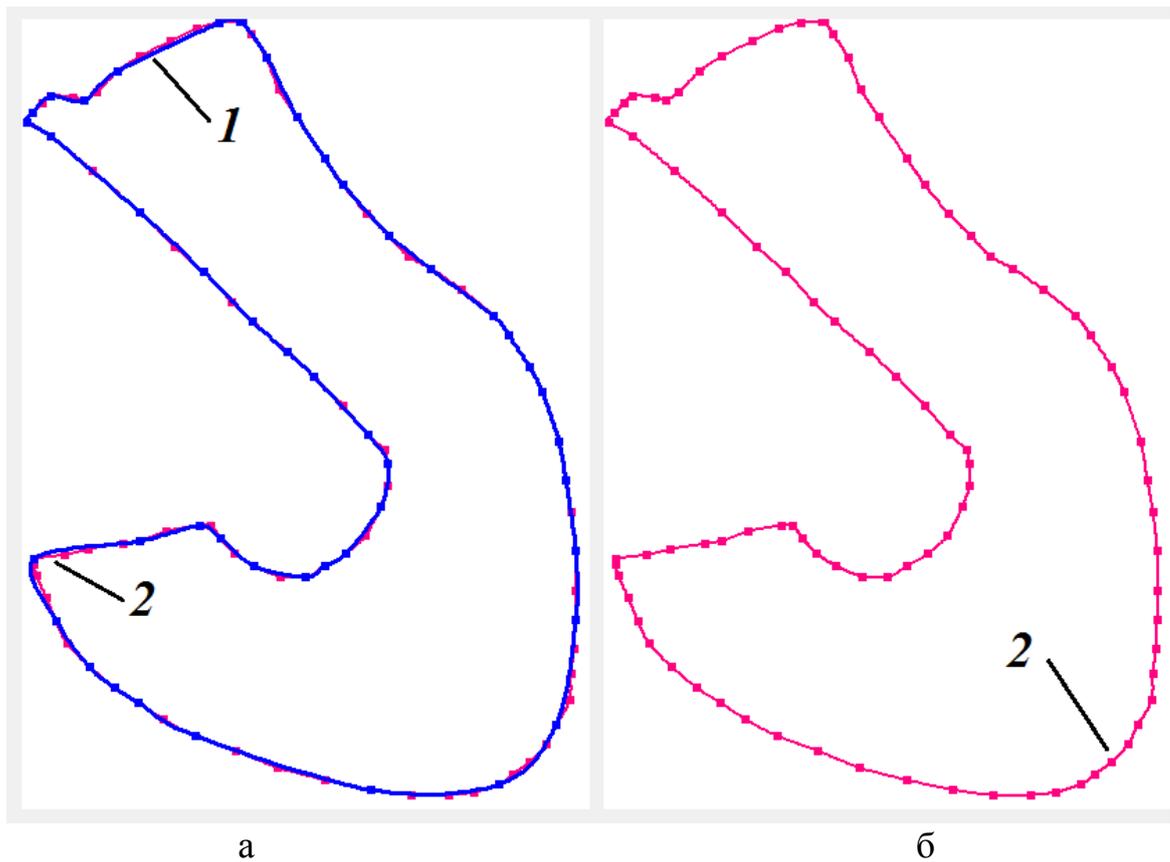


Рисунок 3.33 Сжатие информации о детали обуви (союзка):
 1 – исходная линия, 2 – линия сжатия [111], а – исходная
 кривая, б- кривая после применения алгоритма сжатия

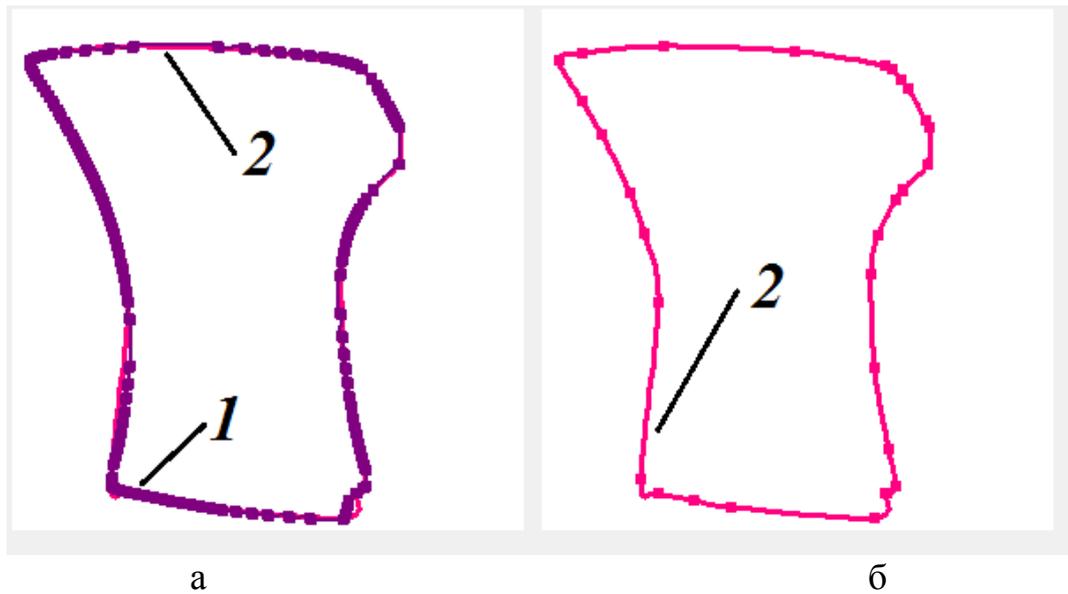


Рисунок 3.34 Сжатие информации о детали обуви (берец, векторизованный по ТА): 1 – исходная линия, 2 – линия сжатия, а – исходная кривая, б- кривая после применения алгоритма сжатия

Таблица 10 Результаты эксперимента [111]

Наименование детали	Количество дочек	
	до	после
Задинка 1	35	13
Берек	54	32
Задинка 2	53	31
Союзка	92	48
Берек векторизованный	289	31

Из рисунков видно, что участки, где производная резко изменяет свое направление, точек остается больше, а более гладкие области описываются меньшим количеством точек. Очевидно, что линии 1 и 2 накладываются друг на друга, т.е. алгоритм можно применять на практике, в том числе и после автоматической векторизации изображения [111].

Проведем экспериментальную апробацию модуля «Оцифровка» и рассчитаем экономическую эффективность применения средств технического зрения в производстве обуви.

Выводы по третьей главе

1. Предложена концепция блока «Проектирование» для работы с контурами, которая базируется на математическом описании таких основных операций как «симметрия», «перенос», «поворот», «создание производных линий и кривых» и «построение припусков», необходимых оператору-конструктору.
2. Предложен простой метод выделения замкнутого контура, основанный на теории графов. Показано, что через точки можно провести единственный замкнутый контур, если каждая из них является опорной для двух, но не более и не менее контуров детали.
3. Проанализированы основные типы соединительных элементов, используя которые, можно замыкать контуры детали и сохранять в памяти такую параметрическую форму, чтобы при градировании все основные принципы построения детали не нарушались. Описаны алгоритмы построения возможных соединений, требующие минимальных действий от конструктора.
4. Разработан рекуррентный компьютер, позволяющий регулировать число точек контура детали или шаблона. Выведено математическое описание кубических сплайнов на основе теории кратномасштабного анализа, гладкой интерполирующей схемы и осредняющего оператора. Исследован случай аппроксимации сплайном при сохранении направления производных в точках половинного деления. Дана оценка погрешности описания полученных сплайнов. Показано, что при $\omega = \frac{1}{12}$ кривая проходит через интерполяционные точки шаблонов деталей.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СРЕДСТВ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ В САПР ОБУВИ

4.1. Векторизация чертежей грунт-моделей и конструкций обуви

Технолог-конструктор может осуществлять ввод чертежей различными методами. Рассмотрим наиболее распространенные из них по таким характеристикам как уровень автоматизации и качество выходной информации.

При вводе данных с помощью дигитайзера, в котором конструктор размещает чертеж на рабочей области и производит оцифровку (рис. 4.1), точность зависит от его опыта. При этом невозможно сопоставить внесенные данные с оригиналом. Модернизация описанной методики позволяет свести погрешность к минимуму: используя дигитайзер, в рабочую область САПР загружают цифровое представление чертежа грунт-модели или шаблона (рис. 4.2). Таким образом, в



Рисунок 4.1 Пример векторизации чертежа с помощью дигитайзера

процессе оцифровки у оператора имеется возможность отследить как накладывается кривая на исходный контур. Если отклонение больше допустимой нормы, то

следует откорректировать линию, добавив в сплайн новую точку, изменить кривизну.

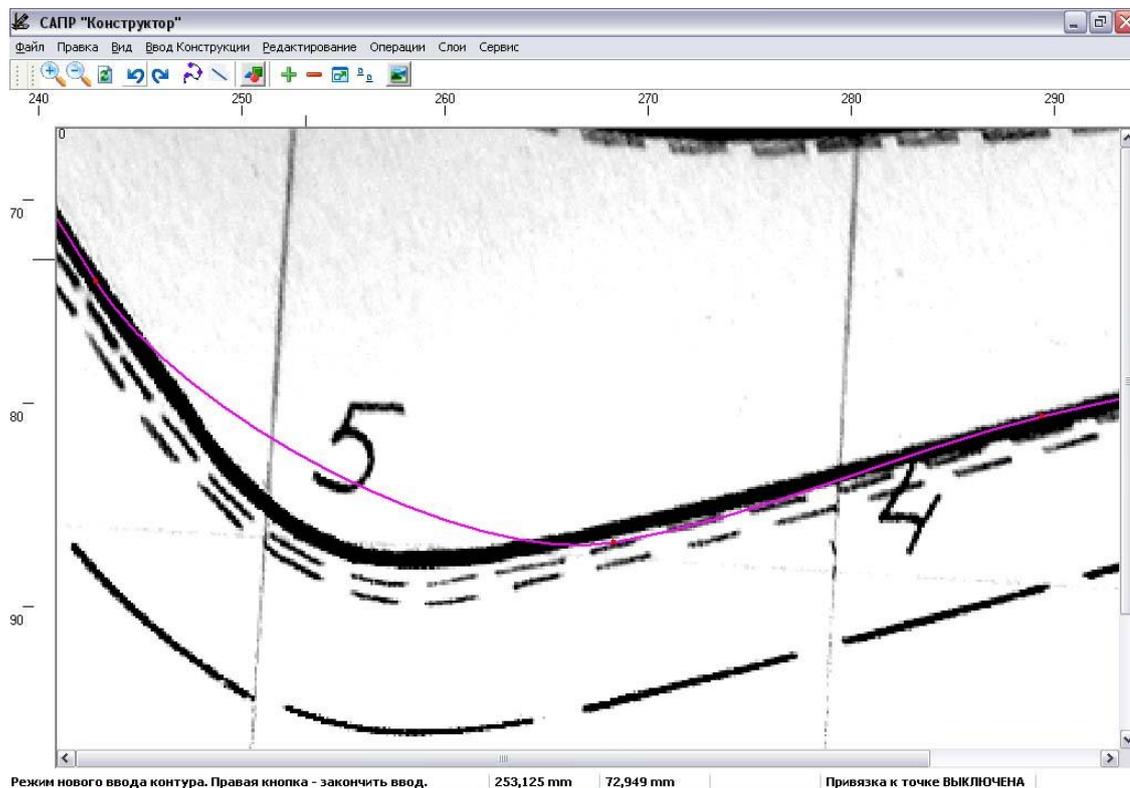


Рисунок 4.2. Пример векторизации с подложкой

Автоматизировать процесс ввода информации можно с помощью специальных программ. Ниже приведем краткий обзор ПО, используемого преимущественно для ручной и полуавтоматической векторизации, а так же допускающего автоматическую векторизацию.

Гибридный редактор *Spotlight Pro* включает предварительную подготовку растрового изображения, средства селекции и редактирования растровой, векторной и гибридной графики (рис.4.3), интерактивную и автоматическую векторизацию, распознавание текстов, экспорт и импорт векторных данных [3]. Дополнительно пакет обеспечивает автоматическое разделение по слоям цветных сканированных изображений на монохромные. *RasterDesk Pro* – версии *Spotlight*, реализован внутри *AutoCAD*. Функции пакета аналогичны *Spotlight Pro*, за исключением следующих: не поддерживается растеризация в пакетном режиме и отсутствует библиотека условных знаков [112]. В программах доступны полуавтомати-

ческая (трассировка) и автоматическая векторизации. Оператор должен выделить область, для которой требуется произвести векторизацию, или весь чертеж, при этом программа пробует распознать указанную область и сгенерировать подходящий объект. Процедуры выбора, трассировки и автоматической векторизации растровых символов основаны на алгоритмах их распознавания по векторным образцам, которые необходимо создавать заранее и хранить в файле библиотеки символьных шаблонов [112].

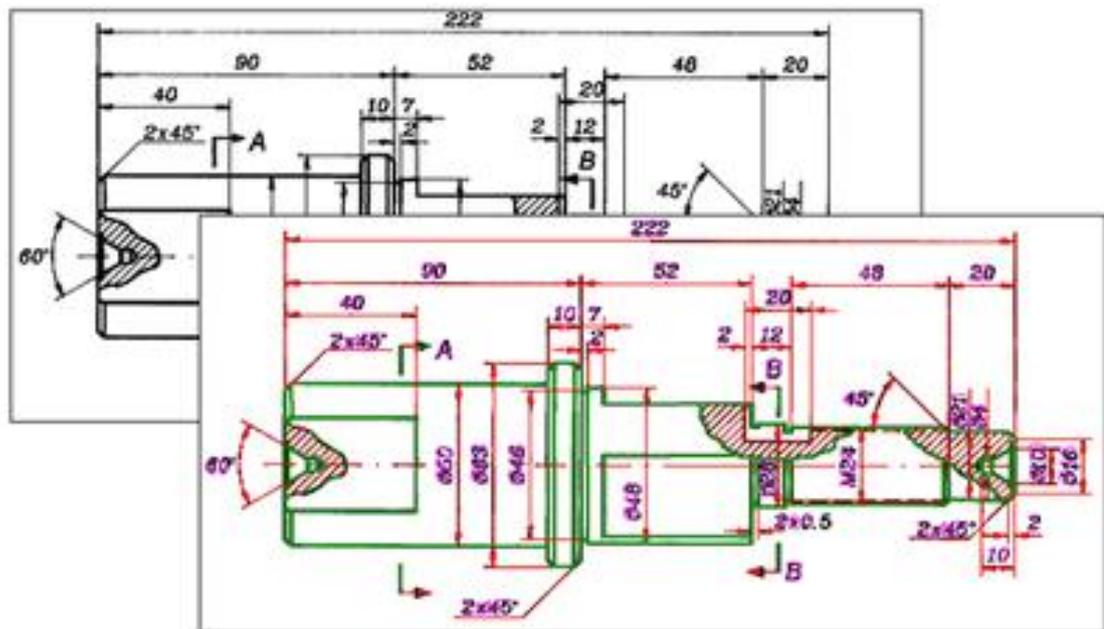


Рисунок 4.3. Пример векторизации в Spotlight Pro

Полуавтоматический векторизатор *EasyTrace* от российской компании Easy Trace Group предназначен для редактирования векторных карт. В программе собран набор утилит и инструментов, позволяющих подготавливать растр к распознаванию, векторизовать объекты (сетка карты, полигоны болот, озёра, здания, круглые объекты), восстанавливать топологические связи [113].

Надстройка *Adobe Streamline* сегодня входит в Adobe Illustrator и предназначена для преобразования в векторную форму черно-белых штриховых и цветных точечных изображений [3] (рис. 4.4).



Рисунок 4.4. Пример трассировки фотографии в Adobe Illustrator

Помимо выбора метода трассировки результаты векторизации зависят еще от таких параметров как цвет, тип и точность контуров. Пакет рекомендуют применять для трассировки цветных изображений (логотипов, иконок, набросков).

Векторный графический редактор *Inkscape* с открытым исходным кодом, являющийся аналогом Adobe Illustrator, Corel Draw, Freehand или Xara X, отличается от прочих редакторов использованием открытого формата Scalable Vector Graphics (SVG), основанного на стандарте от W3C. Приложение Inkscape работает в разных операционных системах (Linux, Windows, Mac OS). Проект имеет свое сообщество, включающее как пользователей, так и программистов. Разработчики ориентируются на нужды сообщества, периодически выпускают дополненные версии и новые плагины [114]. Программа является бесплатным аналогом CorelDraw и имеет много схожих функций, в том числе и векторизацию изображений. Доступно 3 алгоритма создания контуров: сокращение яркости, определение краев и квантование цветов (рис. 4.5). Поскольку в последнем используется 2 цвета, то он сводится к первому алгоритму.

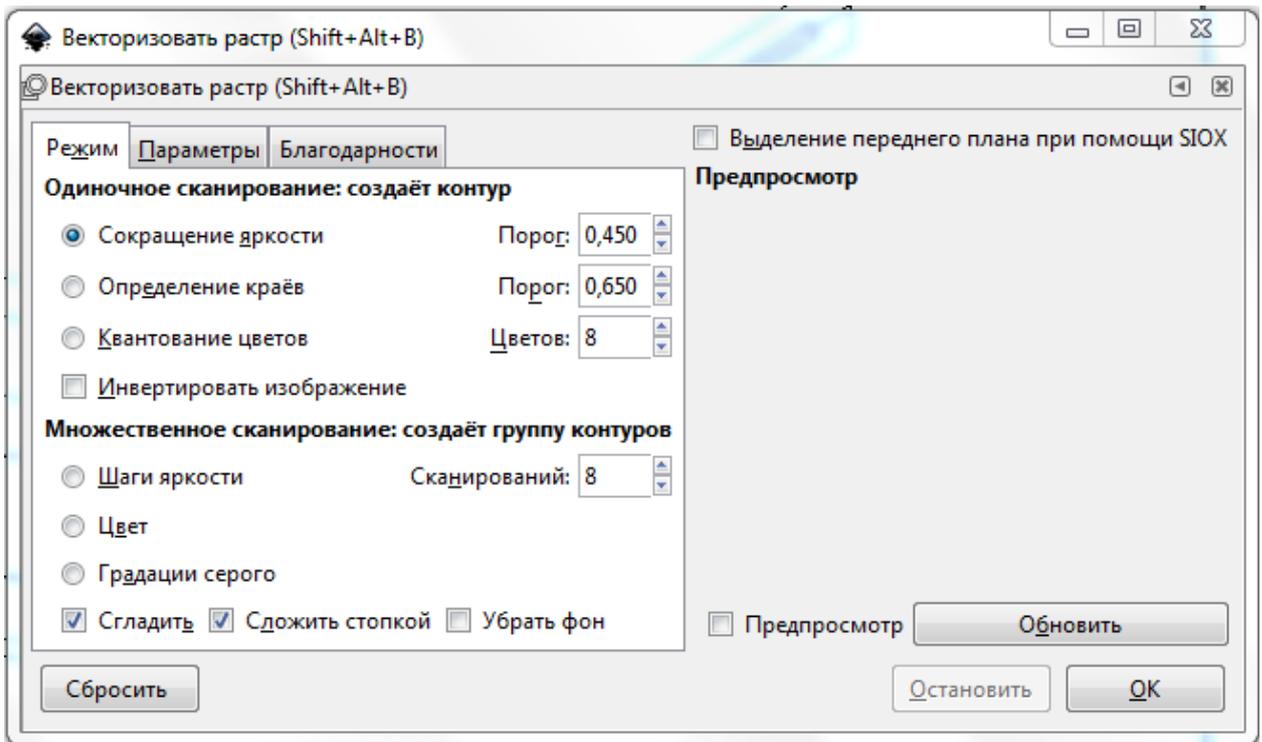


Рисунок 4.5. Окно режимов векторизации

WinTopo представляет собой программное приложение для преобразования TIF, JPG, PNG, GIF, BMP файлов и отсканированных изображений в векторные. В программе применяются алгоритмы векторизации Кенни, Зонга Суня и имеет настраиваемые параметры.

Для оценки разработанного нами топологического алгоритма (ТА) сравним его с перечисленными выше пакетами программ. На официальном сайте компании EasyTrace предложены ссылки на 3 версии продукта: v7.0.645 , v7.99.1051 и v10.0.2490. Первые две серьезно устарели и не имеют инструментов для автоматической векторизации. Демо-версия v10.0.2490 содержит ограничения на размер файла (до 32 килобайт, 2000x2000 пикселей), количество слоев (не больше 17), на каждом векторном слое можно установить не более 60 объектов. Перечисленное не позволяет в этой программе протестировать чертеж обуви. Однако на сайте размещены видео-уроки [115], которые позволили провести анализ и выявить:

- перед векторизацией требуется предварительная подготовка изображения (настройка резкости, контраста, применение разных фильтров);

- автоматическая «сшивка» не способна поддерживать узлы степени 3 и выше;
- полученный в результате работы алгоритма чертеж требует ручной коррекции, в частности, удаления лишних линий, формирования связей.

Демо-версии остальных программ тестировались на растровом чертеже, предоставленном обувной фабрикой «Парижская Коммуна» (рис.4.6). Необходимо заметить, что в пакетах рассматривались только автоматические алгоритмы векторизации, поскольку полуавтоматические практически сводятся к ручной оцифровке. Перед векторизацией проводилась предварительная обработка изображения: повышение контраста, удаление мелкого шума, пороговое преобразование. Ниже приведены результаты векторизации исходного чертежа (рис. 4.7, 4.8).

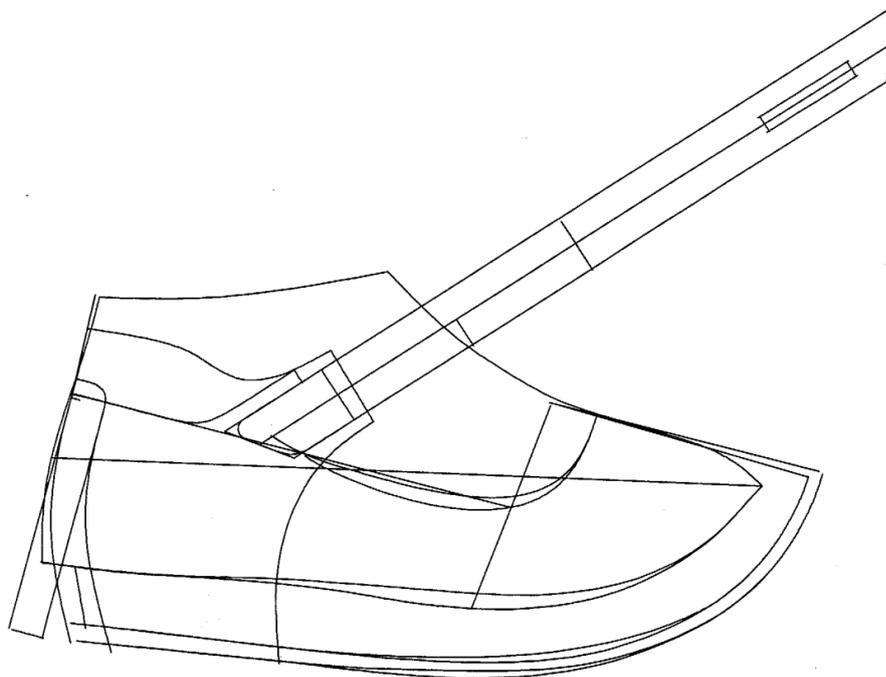


Рисунок 4.6. Растровое изображение чертежа

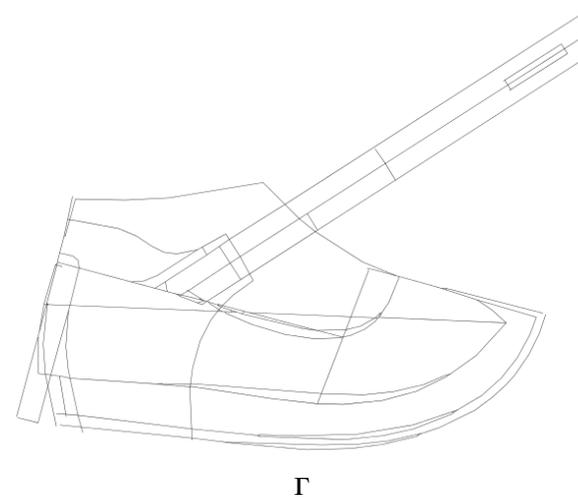
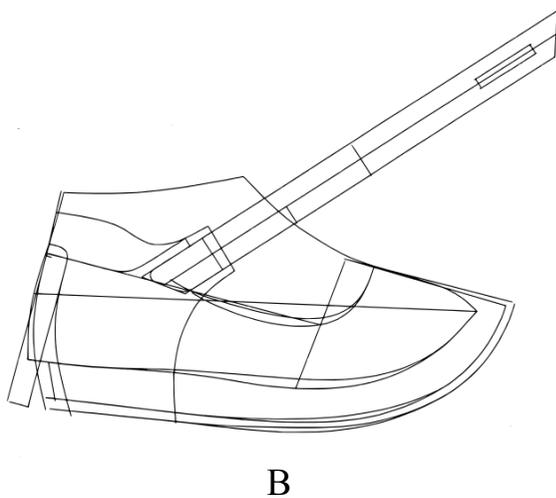
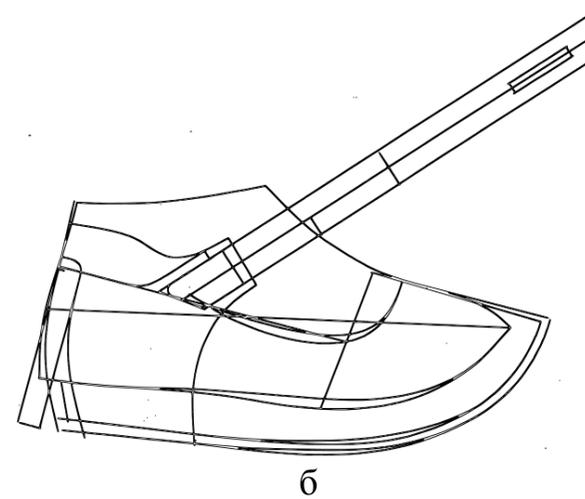
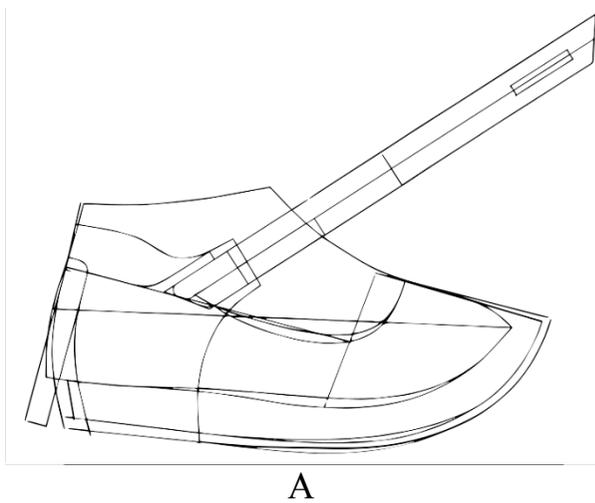


Рисунок 4.7. Векторизованный чертеж: а – в Adobe Illustrator, б – в Inkscape по алгоритму определения краев, в – в Inkscape по алгоритму сокращения яркости, г – в Spotlight Pro

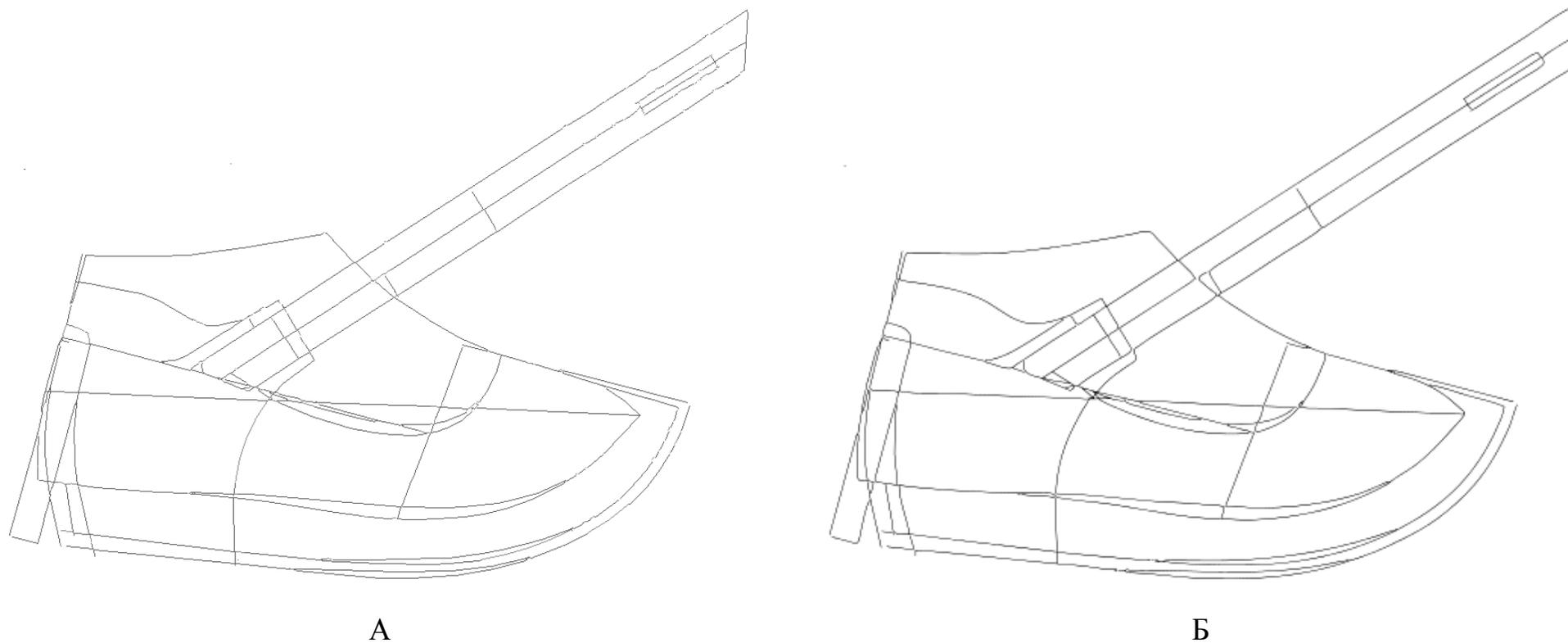


Рисунок 4.8. Векторизованный чертеж: а – в WinТоро, б – по ТА

На первом этапе тестирования оценивалась сохранность общего представления чертежа: наличие всех линий, отсутствие шума. Как видно из рисунков 4.7, 4.8, алгоритмы справились с этой задачей. Определялась пригодность полученного векторного представления чертежа для работы в САПР: способ представления контура, возможность редактирования линий, точность описания развилок. На рисунке 4.9 показано расположение выбранных областей, позволяющих провести оценку по указанным критериям. Для получения наиболее достоверных результатов отмеченные части чертежа рассматривать в увеличенном масштабе.

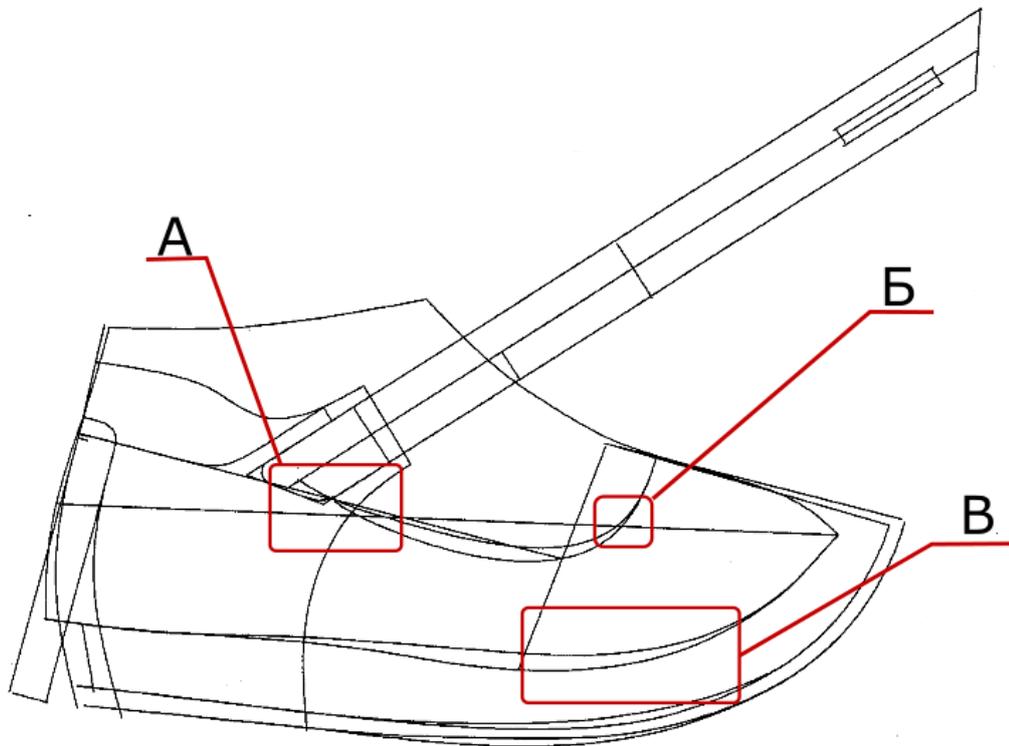


Рисунок 4.9. Рассматриваемые области на исходном чертеже

В результате эксперимента выявлено, что алгоритмы векторизации, заложенные в Adobe Illustrator и Inkscape, не подходят для построения чертежей конструкций верха обуви. Adobe Illustrator в качестве преобразованного чертежа выдал набор замкнутых областей (рис.4.10), с которыми не может работать конструктор. Для наглядности на рисунке области закрашены в разные цвета.

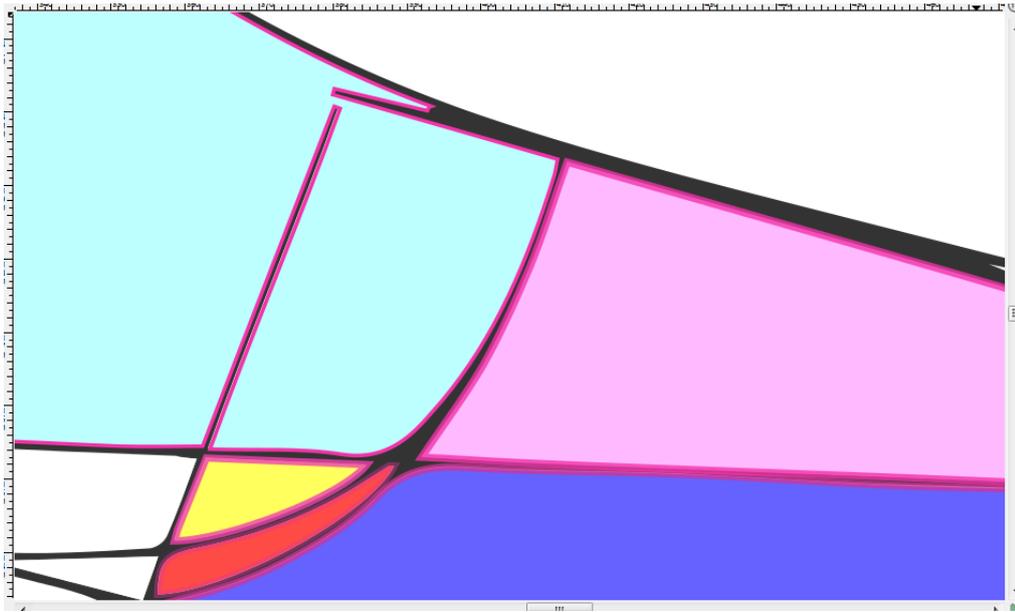


Рисунок 4.10. Область Б, векторизованная в Adobe Illustrator

В Inkscape по алгоритму сокращения яркости получаем набор замкнутых контуров в виде областей аналогичных Adobe Illustrator. Результатом работы метода определения краев явился набор контуров. Однако описание каждой линии с двух сторон не пригодно для редактирования и последующей обработки в САПР (4.11). Таким образом, предложенный алгоритм сравниваем с программами Spotlight Pro и WinTopo Pro.

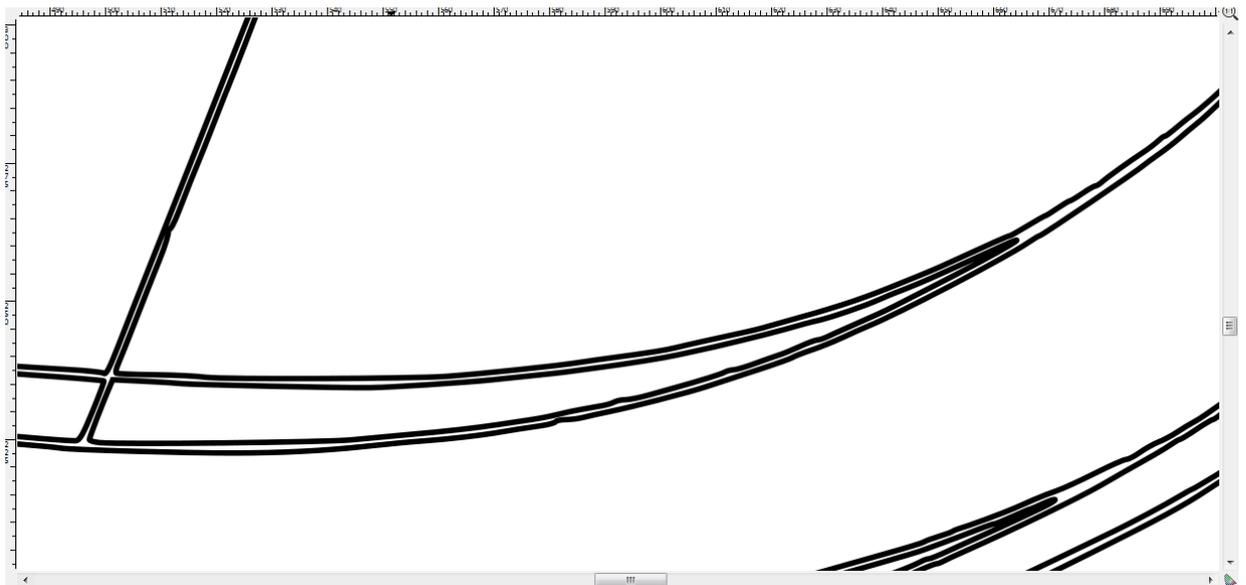


Рисунок 4.11. Область В, векторизованная в Inkscape

Область А на чертеже одна из самых сложных для векторизации, поскольку содержит большое количество развилок (рис.4.12, а), поэтому ни один из алгоритмов не реализовал точную векторизацию.

Область Б гораздо проще (рис.4.13, а), однако в Spotlight Pro и WinToro Pro было получено множество ложных развилок и разрывов (рис.4.13, б, в, цветные линии), особенно в WinToro Pro. Предложенный алгоритм описал её точно, распознав развилку (рис.4.13, г), правильно соединив линии.

В ходе эксперимента было обнаружено, что Spotlight Pro векторизует кубические кривые как прямые линии. К примеру, область В (рис.4.14, а) содержит кривые третьего порядка, на рисунке 4.14 (б) отчетливо видны «разломы», появившиеся после векторизации. В WinToro Pro эта область описана кривыми, однако на некоторых участках заметны разрывы, образовавшиеся на концах двух отрезков (рис. 4.14, в). Предложенный же алгоритм описал область В плавными кривыми (рис. 4.14, г).

Существенный недостаток WinToro Pro – ошибочное распознавание развилок, чувствительность к шуму и мелкие линии. Spotlight Pro преобразует контуры в прямые линии, разбивая на отдельные участки, что приводит к появлению разрывов. Предложенный алгоритм гораздо лучше справился с чертежом, чем Adobe Illustrator и Inkscape. По сравнению с Spotlight Pro и WinToro Pro он корректно распознал развилки и описал контуры сплайнами. В процессе векторизации с помощью ГА происходит изменение размера апертуры, что позволяет быстро проходить участки, не содержащие развилки. Кроме того, предложенный алгоритм открыт для модификации, тогда как рассмотренные пакеты программ не имеют такой возможности.

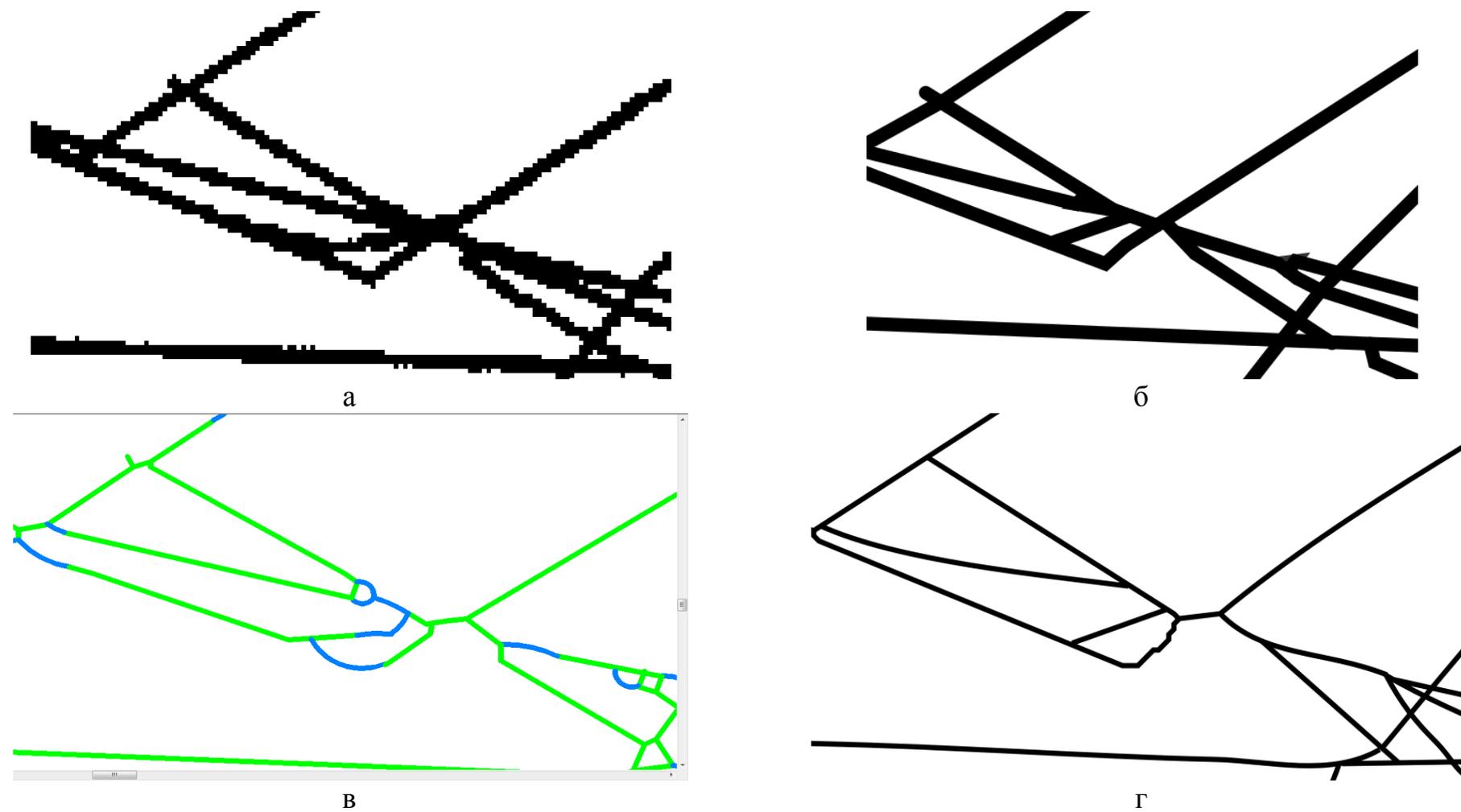
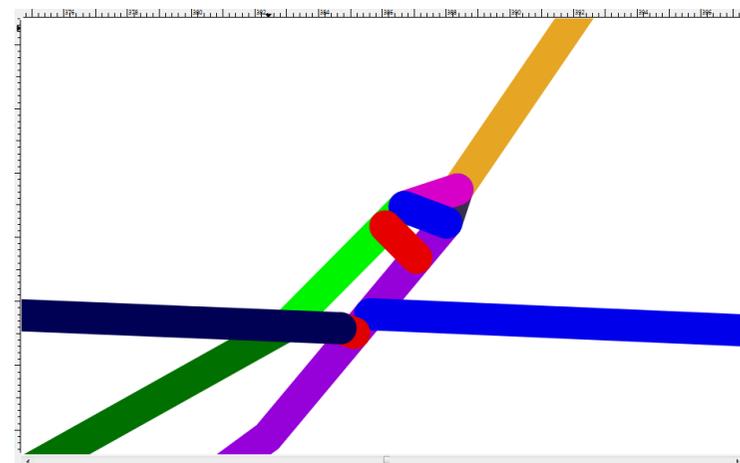


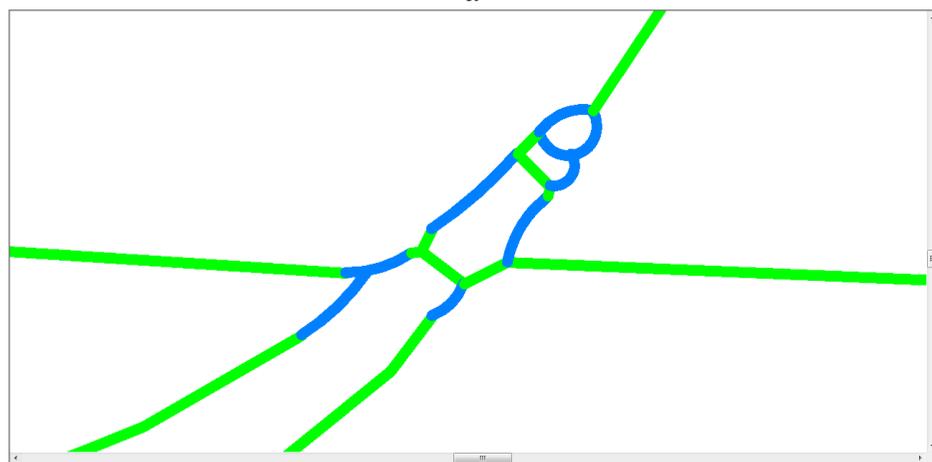
Рисунок 4.12. Область А: а – исходный чертеж, б – векторизованная в Spotlight Pro, в – векторизованная в WinTopo Pro, г – векторизованная по ТА



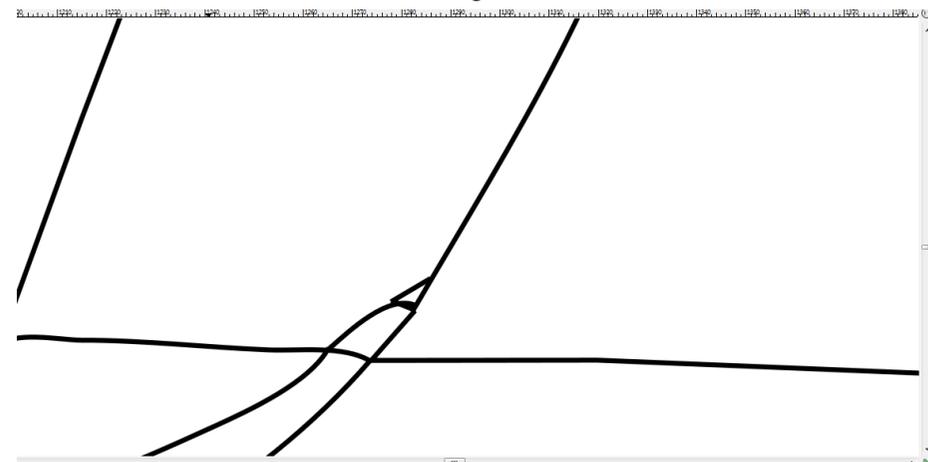
а



б

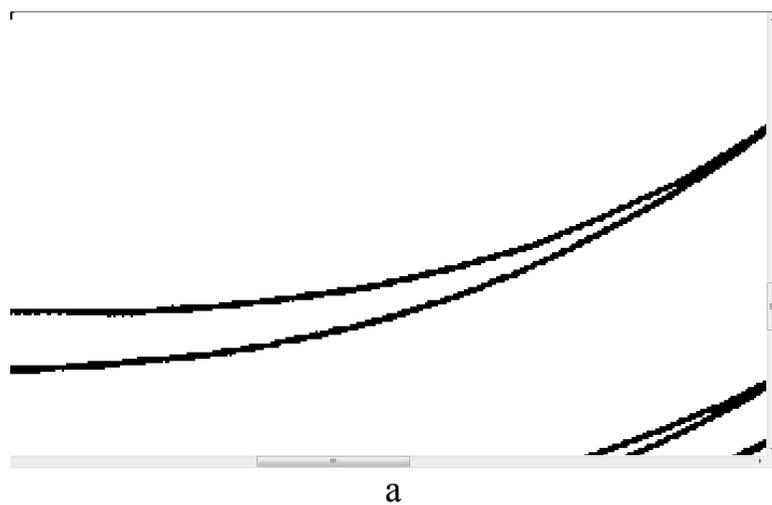


в

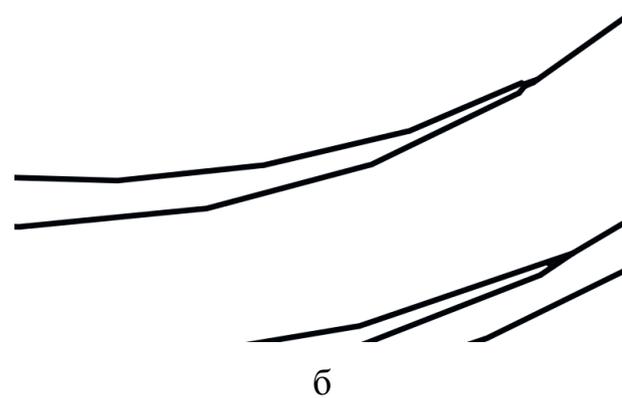


г

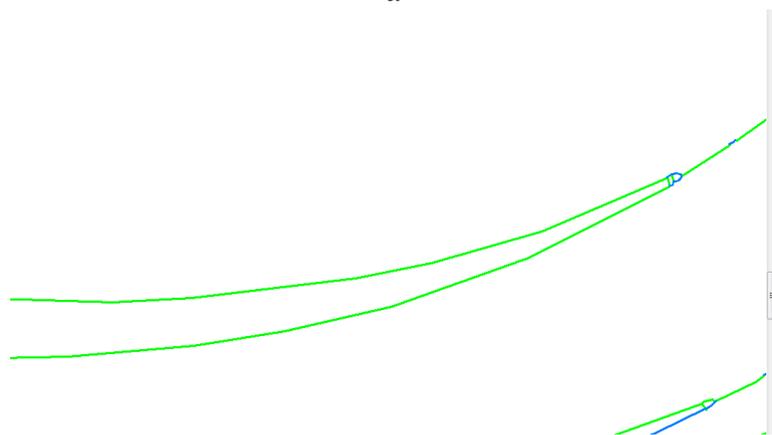
Рисунок 4.13. Область Б: а – исходный чертеж, б – векторизованная в Spotlight Pro, в – векторизованная в WinToro Pro, г – векторизованная по ТА



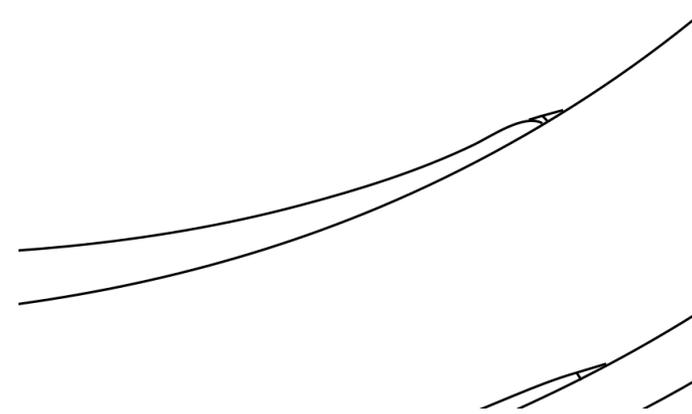
а



б



в



г

Рисунок 4.14. Область В: а – исходный чертеж, б – векторизованная в Spotlight Pro, в – векторизованная в WinToro Pro, г – векторизованная по ГА

Вместе с тем, автоматическую векторизацию осложняет ряд недостатков таких как:

- необходимость предварительной обработки;
- чувствительность к мелкому шуму, что приводит к не корректному распознаванию (лишние контуры);
- привязка к библиотеке символов, и, как следствие, ошибочному распознаванию элементов;
- значительное количество ошибок в чертежах, содержащих множество мелких сложных узлов, линий и проч.
- невозможность создания развилок из 4 и более линий, т.к. не все программы её поддерживают (EasyTrace).

Таблица 11. Временные затраты на проектирование новой модели обуви в зависимости от используемых инструментов

Инструмент	Время	Точность
Оцифровка с помощью дигитайзера	2 часа	Зависит от конструктора, невозможно проверить
Оцифровка с подложкой	2 часа	Зависит от конструктора, можно проверить и откорректировать
Пакеты программ для векторизации (полуавтоматический режим)	1,5-2 часа	Зависит от алгоритма, возможно проверить и откорректировать, требует предварительную обработку
Пакеты программ для векторизации (автоматический режим)	7-10 минут	Зависит от алгоритма, возможны лишние линии и развилки
Предложенный метод	7-10 минут	Распознает развилки, минимальная доработка, ошибочно распознавание на сложных участках

Таблица 12. Характеристики пакетов программ векторизации и предложенного алгоритма

Характеристики	Пакеты программ					
	Adobe Illustrator	Inkscape	EasyTrace	WinTopo	Spotlight Pro	TA
Операционная система	Microsoft Windows 7 с пакетом обновлений SP1, Windows 8.1 или Windows 10	Linux, Windows, Mac OS	Microsoft Windows XP/Vista/7.	Windows XP, Windows 2000, Windows Vista, Windows 7 / 8 / 8.1 or Windows 10	Microsoft Windows 8/7/Vista/XP (SP2)/MS Windows Server 2003	Microsoft Windows 7 с пакетом обновлений SP1
Цена 1 лицензии на локальный компьютер	16 912,07 руб (на 12 месяцев)	бесплатно	960 EUR	200 фунтов стерлингов	142 300 руб.	Бесплатно для МГУДТ
Результат векторизации	Набор замкнутых областей	Линии, описанные с двух сторон	Средние линии	Средние линии	Средние линии, описанные отрезками	Средние линии, описанные кубическим сплайном
Распознавание развилок	-	-	Невозможность автоматически распознать развилки степени 3 и выше	Большое количество лишних линий и развилок	Лишние развилки	+
Пригодность результата для последующей работы в САПР	-	-	+	+	+	+

Анализ таблиц 11, 12 показывают, что предложенный алгоритм работает наравне с коммерческими программами по временным характеристикам, при этом его качество лучше в некоторых моментах наиболее важных для предприятия обуви. Нами проведен ряд экспериментов на разных чертежах конструкций верха обуви (Приложение F). Выявлено, что топологический алгоритм позволяет векторизовать любой чертеж конструкций верха обуви (туфли лодочка, сапоги, полуботинки и т.п.), нечувствителен к мелкому шуму, находит ключевые точки, учитывает толщину линии, обнаруживает развилки.

Внедрение предложенного алгоритма позволяет автоматизировать процесс ввода информации о чертежах конструкций верха обуви и сократить время на проектирование. Кроме того, топологический алгоритм можно использовать при разработке электронного пособия для лиц с ограниченными возможностями [116]. Тогда рисунок будет увеличен без потери качества, что поможет слабовидящим лучше рассмотреть чертеж [117].

Развитие технологий в условиях жесткой конкуренции требует от предприятия внедрения новых и перспективных технологий – 3D моделирование и проектирование. В первой главе было отмечено, что проектирование в 3D слишком затратно для предприятий малой мощности из-за дорогостоящего оборудования и ПО. Рассмотрим перспективы использования открытых программ 3D моделирования.

4.2. Концепция использования в обувном производстве открытых программ 3D моделирования

Отрасль информационных технологий (ИТ), сегодня, является одной из наиболее развивающихся, как в России, так и в мире. Масштабы мирового рынка информационных технологий оценивается в \$1,7 трлн. По имеющимся прогнозам до 2017 года рост рынка будет составлять около 5 % в год. Это свидетельствует о том, что рынок ИТ уверенно попадает в 25 процентов самых быстро растущих рынков мировой экономики. В свою очередь, темп роста этого сегмента в России за последние 10 лет превосходит среднемировой и в течение ближайших 5 – 7 лет

обладает потенциалом для еще более быстрого подъема – на 10 и более процентов в год.

Применение бесплатных открытых САПР существенно снижает затраты на ПО. Приведем наиболее известные из них: LibreCAD, QCad, FreeCad – автоматизированные системы проектирования общего назначения, поддерживающие формирование чертежей в 2D. В последней САПР имеются функции для разработки 3D моделей. Ниже показаны даты последних релизов:

- LibreCAD 5 июня 2016 (рис. 4.15);
- FreeCad 18 апреля 2016 (рис. 4.16);
- QCad 30 июня 2016.

Таким образом, все рассматриваемые САПР обновляются, а значит, имеют общество разработчиков, которые стремятся усовершенствовать свой продукт. Указанные системы не обладают необходимыми функциональными возможностями для проектирования обуви: симметрия, построение припусков, выделение замкнутых контуров, кубические сплайны, градирование и раскладка. Все перечисленные программы работают в разных операционных системах, написаны на языке высокого уровня с++ и распространяются с открытым исходным кодом. Таким образом, функционал описанных САПР можно расширить с помощью дополнительных библиотек, написанных на с++ или питоне. Предложенное нами математическое описание всех необходимых операций позволяет реализовать их на языке программирования.

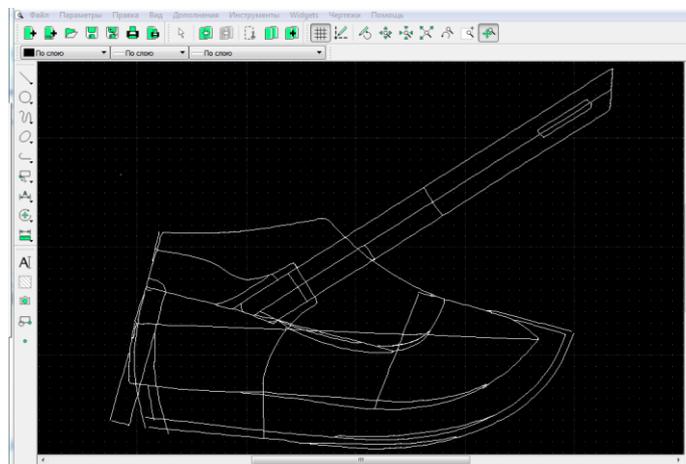


Рисунок 4.15. Проектирование обуви в САПР LibreCad

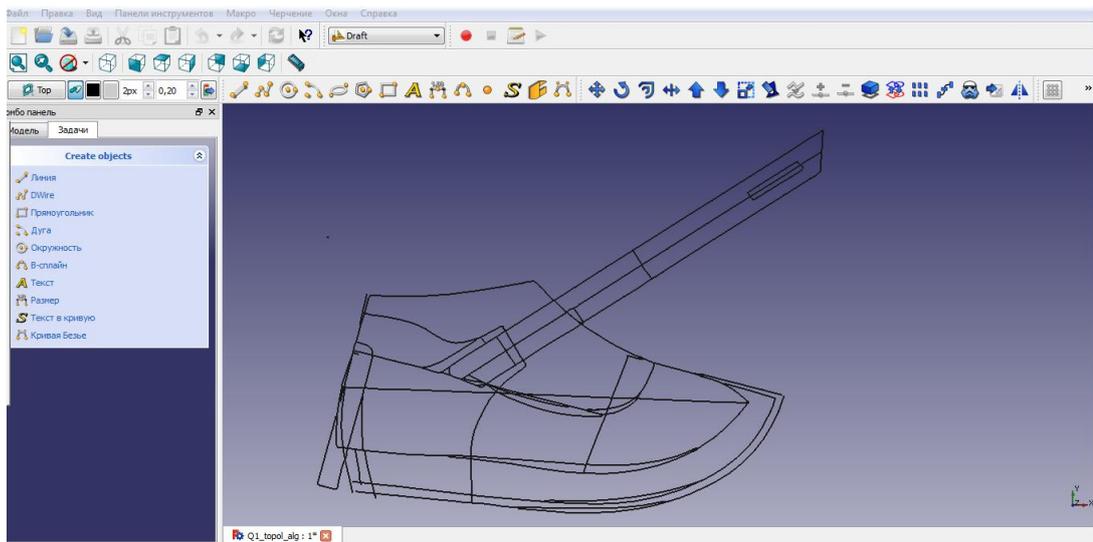


Рисунок 4.16. Проектирование обуви в САПР FreeCad

На рисунке 4.17 приведена концепция проектирования в 2D с использованием средств технического зрения и разработанных модулей.

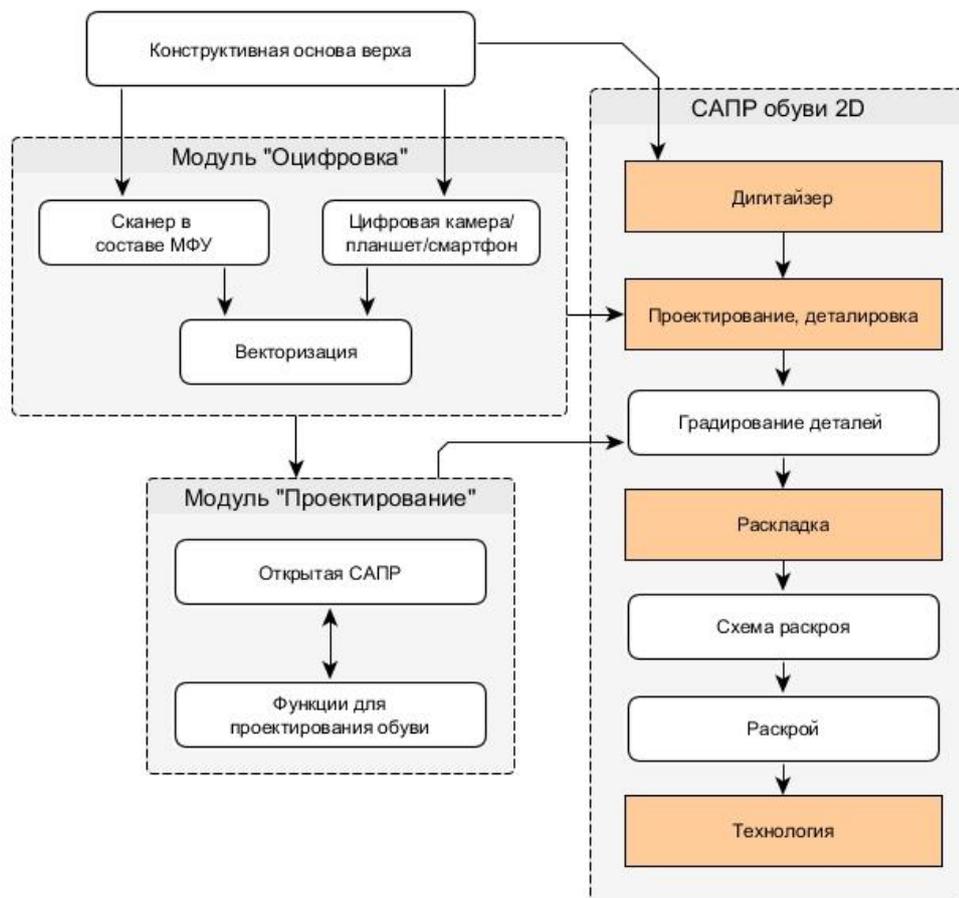


Рисунок 4.17. Концепция проектирования в 2D с использованием средств технического зрения

Отдельным и очень важным вопросом является тенденция использования мобильных и планшетных устройств. По данным статистики, в декабре 2013 года для выхода в сеть, телефоны, смартфоны, планшетные компьютеры использовали около 25, 5 миллиона жителей российских городов в возрасте старше 12 лет, население которых превышает 100 тысяч человек, что составляет более 40%. Эта тенденция и наличие в мобильных и планшетных устройствах фотокамеры позволяет использовать их, как цифровой фотоаппарат [118]. Таким образом, можно получить 3D модель объекта [119]. Целесообразность использования бесконтактного метода, основанного на фотографиях, подтверждена в работе Лаптева А.А. [120]. К тому же, совершенствование и использование новых информационных технологий входит в перечень приоритетных направлений развития науки [121].

Положение снимка в момент фотографирования определяют три элемента внутреннего ориентирования – фокусное расстояние фотокамеры f , координаты x_0 , y_0 главной точки o и шесть элементов внешнего ориентирования – координаты центра проекции S – X_S , Y_S , Z_S , продольный и поперечный углы наклона снимка α и ω и угол поворота χ » [122]. По одиночному снимку положение точки объекта можно найти в частном случае, когда объект плоский, например равнинная местность ($Z = \text{const}$). Координаты x и y точек снимков измеряются на монокомпараторе или стереокомпараторе. Элементы внутреннего ориентирования известны из результатов калибровки фотоаппарата, а элементы внешнего ориентирования можно определить при фотографировании объекта или в процессе фототриангуляции. Если элементы внешнего ориентирования снимков неизвестны, то координаты точки объекта находят с использованием опорных точек (метод обратной засечки) [123]. Опорная точка – опознанная на снимке контурная точка объекта, координаты которой получены в результате геодезических измерений или из фототриангуляции. Элементы взаимного ориентирования позволяют установить снимки в то положение относительно друг друга, которое они занимали при фотографировании объекта (рис. 4.18) [105].

Описанный процесс получения 3D модели занимает часы в случае ручной обработки [124]. На сегодняшний день существует программы и сервисы, позво-

ляющие автоматизировать ряд действий. Рассмотрим бесплатные пакеты, с помощью которых можно получить и работать с 3D моделью объекта.

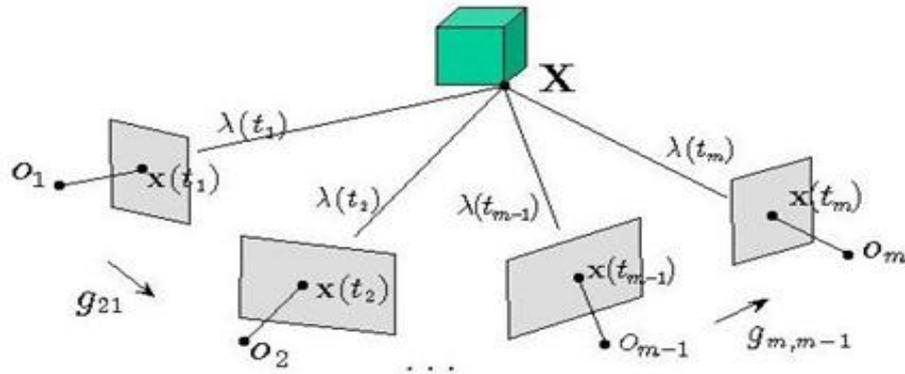


Рисунок 4.18. Получение 3D модели с помощью фотограмметрии [125]

Компания Autodesk, разработала облачный сервис под названием 123D *Catch* [126], который позволяет в автоматическом режиме построить 3D модель объекта по набору фотоизображений. Недостатки:

- все результаты хранятся в открытом доступе;
- ограниченное число фотографий (70), т.е. объекты сложной формы невозможно оцифровать;
- программа не работает с прозрачными объектами;
- работа ведется с фотографиями до 3 мегапикселей, следовательно, снижена точность измерений.



Рисунок 4.19. Интерфейс программы Catch [126]

Regard +MeshLab+Blender=3D модель

Regard – аналогичное **Catch** приложение, однако устанавливается локально. Имеет ряд настроек и свою библиотеку параметров фотоаппаратов [127]. Если устройства нет в списке распространенных, то есть возможность внести недостающие параметры вручную. В Regard осуществляется поиск ключевых точек, промежуточные этапы можно посмотреть и проверить правильность полученных результатов. Окончательное 3D-представление объекта сохраняется в распространенный формат файла, поддерживаемый разными программами.

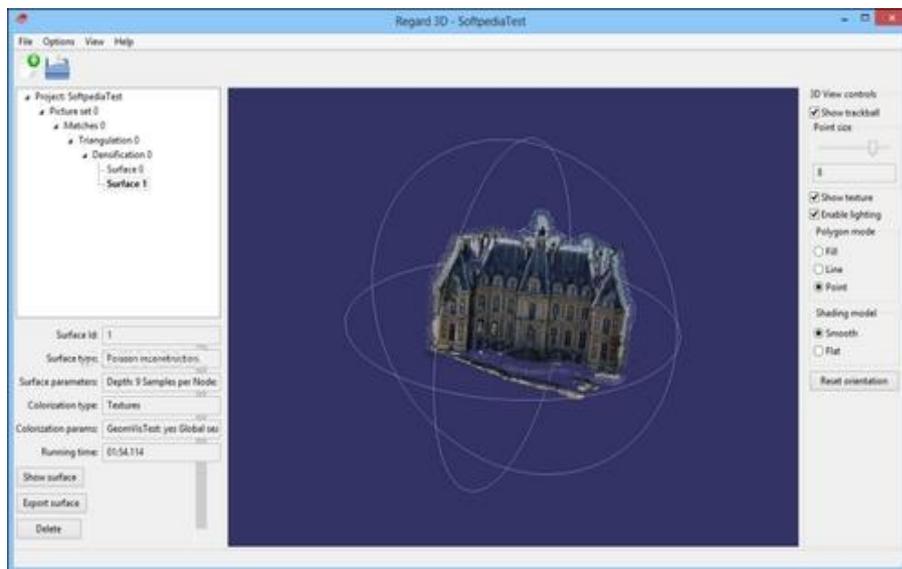


Рисунок 4.20. Пример 3D модели в Regard [127]

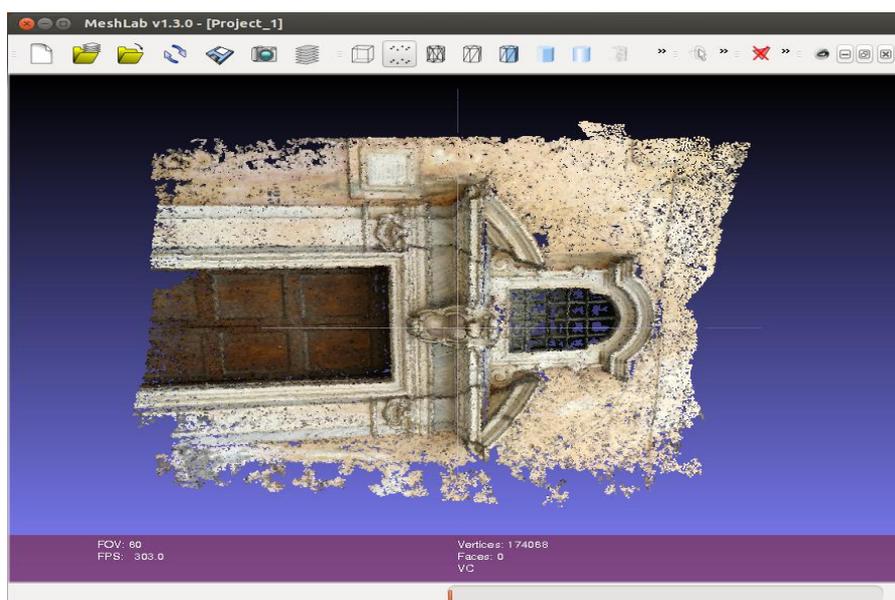


Рисунок 4.21. Пример 3D модели в MeshLab [128]

Бесплатная программа *MeshLab* [128] предназначена для обработки объектов, полученных в результате трехмерного сканирования, имеет обширный инструментарий, позволяющий очищать, редактировать, восстанавливать, визуализировать и конвертировать 3D модели [129]. Программа полностью совместима с Windows 7, Mac OS и Linux. В MeshLab происходит удаление лишних точек, полученных при оцифровке. Поскольку технологии постоянно развиваются, то качество фотографий будет улучшаться. Следовательно, при сохранении функциональных возможностей, со временем необходимость в MeshLab исчезнет.

Blender — свободный, профессиональный пакет для создания трёхмерной компьютерной графики, включающий в себя средства моделирования (рис. 4.22), анимации, рендеринга, постобработки и монтажа видео со звуком, компоновки с помощью «узлов» (Node Compositing), а также для создания интерактивных игр. В настоящее время пользуется наибольшей популярностью среди бесплатных 3D редакторов в связи с его быстрым и стабильным развитием, которому способствует профессиональная команда разработчиков» [130]. Поскольку Blender поддерживает основные форматы сканированных файлов, то ее могут использовать предприятия, имеющие 3D сканер.

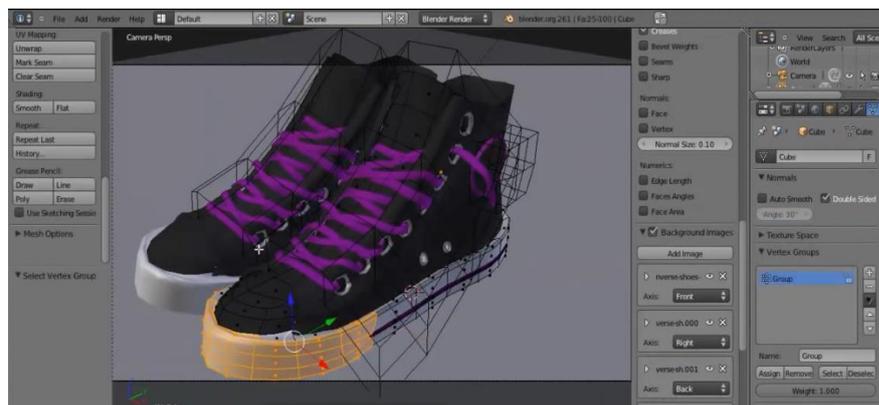


Рисунок 4.22. Пример создания 3D модели обуви в Blender

Современный мир чаще и чаще преподносит нам технические новинки, которые все более приближают созданные человеком виртуальные миры к реальности [131]. Одной из таких новинок является *Kinect*, который представляет собой сенсорный контроллер бесконтактного действия (рис. 4.23). Благодаря встроенной

цветной видеокамере, микрофонной решетке и нескольких глубинных сенсоров, это устройство фиксирует и интерпретирует сигналы, подаваемые в бесконтактном режиме. То есть с помощью такого контроллера можно передавать команды не только голосом, но и жестами. Уже доступна версия 2 (рис. 4.24), которая обладает большей точностью сканирования. Разработанное в 2011 разработано приложение KinectFusion позволяет в режиме реального времени на основе карт глубины создавать геометрически точные 3D модели [132]. Низкая стоимость и широкие функциональные возможности Kinect позволяют использовать его в качестве недорогого 3D-сканера и применять для формирования раскладки [133].



Рисунок 4.23. Камера Kinect [134]



Рисунок 4.24. Камера Kinect 2.0 [135]

В ходе анализа пакетов программ и устройства Kinect выявлено, что они могут использоваться как в связке, так и отдельно. Таким образом, развитие технологий сканирования позволяет прогнозировать упрощение предложенной схемы оцифровки 3D-моделей, повышение качества проектируемой обуви, а так же сокращение времени на её разработку.



Рисунок 4.25. Получение по фотографии (а) 3D модель обуви (б)

На рисунке 4.26 приведена концепция проектирования в 3D с использованием средств технического зрения и разработанных модулей.

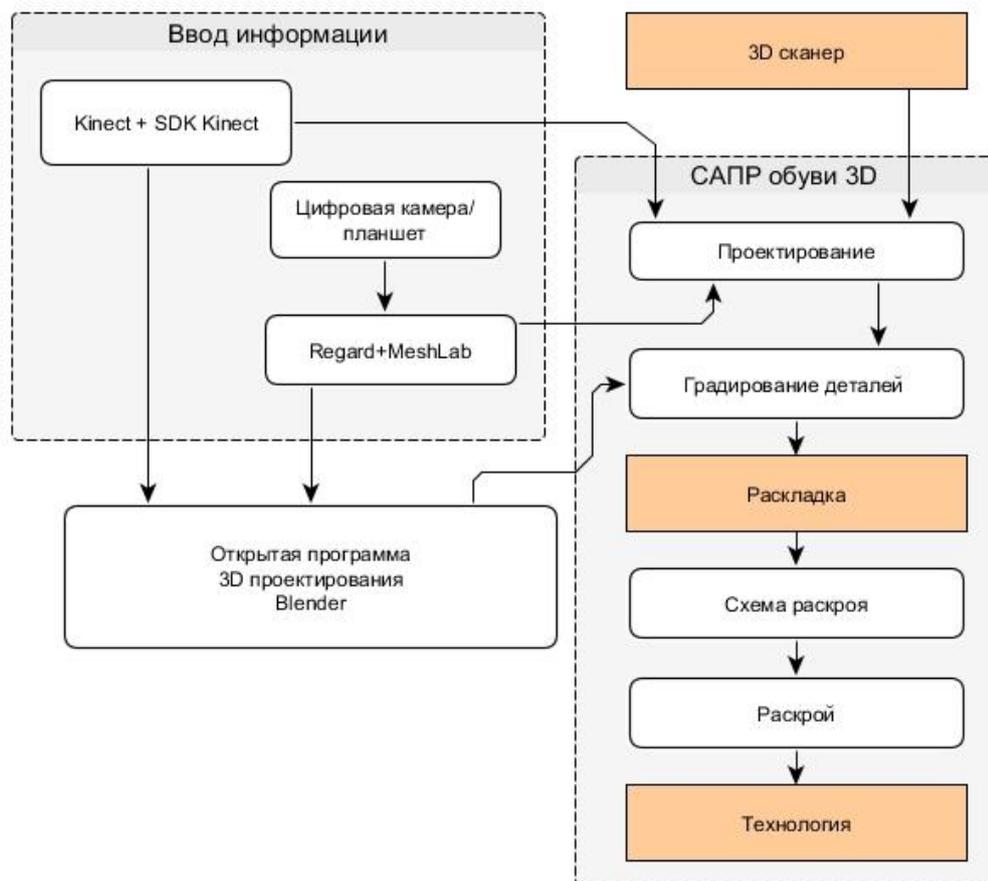


Рисунок 4.26. Концепция проектирования в 3D с использованием средств технического зрения

4.3. Экономическая эффективность применения средств технического зрения в производстве обуви

В таблице 13 показана экономия средств при альтернативном использовании оборудования и программного обеспечения в процессе проектирования обуви. Заметим, что в 2D происходит снижение не только материальных затрат, но согласно таблице 11 уменьшение времени на ввод исходной информации и повышение точности.

Таблица 13 Материальные затраты на проектирование обуви

Концепция проектирования	Программа для проектирования	Цена (тыс. руб.)	Устройство	Цена (тыс. руб.)	Итого тыс. руб.
2D известная	Autodesk AutoCAD (локальная лицензия на 1 год)	71,3	Дигитайзер 2D (Cal-Comp DrawingBoard VI)	30	101,3
2D передоложенная концепция	FreeCad/LibreCad	0	Планшетный сканер в составе МФУ (Brother MFC-J2320)	12	12
3D известная	Autodesk Maya 2017 (локальная лицензия на 3 года)	101,2	Сканер 3D (3D сканер Roland LPX-60DS)	300	401,2
3D передоложенная концепция	Regard+ Mesh-Lab+Blender	0	Цифровая фотокамера (Canon PowerShot SX410 IS)	12	12

Анализ рисунков 4.17 и 4.26 показал, что предложенные модули «Оцифровка» и «Проектирование» с использованием средств технического зрения позволяют обойти «узкие» места в САПР обуви на этапах ввода информации и проектирования.

Сравнительный анализ продемонстрировал доступность использования систем технического зрения по ряду таких показателей как:

- сокращение временных затрат на разработку новой модели при проектировании в 2D;
- расширение электронных баз данных и процессов автоматизации;
- существенное снижение стоимости используемого оборудования и ПО.

ВЫВОДЫ ПО ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ

1. Выявлены особенности известных пакетов векторизации чертежей конструкций верха обуви. Показано, что результаты обработки чертежей в Adobe Illustrator и Inkscape не пригодны для последующей работы в САПР обуви. При автоматическом распознавании EasyTrace не способна поддерживать узлы степени 3 и выше, а участки со сложной топологией даже коммерческие программы не могут корректно векторизовать.
2. Проведена апробация модуля «Оцифровка» на разных чертежах конструкций верха обуви. Выявлено, что полученное векторное представление грунд-моделей удовлетворяет заданной точности и его можно использовать в САПР.
3. Предложены открытые САПР для проектирования обуви в 2D. Сформулированы задачи их модернизации путем расширения функциональных возможностей за счет применения дополнительных библиотек, написанных на языках программирования с++ или питоне. Показано, что модули «Оцифровка» и «Проектирование» с использованием средств технического зрения могут быть интегрированы в отечественные САПР 2D.
4. Предложена рабочая гипотеза использования в обувном производстве открытых программ проектирования в 3D-пространстве: связка Regard+MeshLab+Blender (на основе фотограмметрии) и Kinect SDK с применением камеры Kinect.
5. Приведенный расчет материальных затрат на проектирование обуви показал экономическую эффективность использования систем технического зрения, заключающуюся в: сокращении временных затрат на разработку новой модели при проектировании в 2D; расширении электронных баз данных и процессов автоматизации; существенном снижении стоимости используемого оборудования и программного обеспечения.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Рассмотрены модули конфигураций САПР легкой промышленности. Проведен анализ пакетов программ известных фирм (АСКО-2Д, ShoesModel, Ассоль, Naxos, ClassiCAD, Crispin, Shoemaster, Rhinoceros) и описаны их функциональные возможности. Выявлено, что ввод информации в отечественных САПР обуви осуществляется преимущественно в ручном режиме с помощью дигитайзеров.
2. Анализ рынка САПР показал, что современное программное обеспечение не может полностью решить задачи преобразования растрового представления чертежей конструкций верха обуви в векторное, а автоматизация процесса сдерживается высокой стоимостью оборудования.
3. Выявлена возможность внедрения средств технического зрения в САПР обуви для интеграции с разными модулями. Показано, что сканер является предпочтительным устройством ввода информации о чертежах конструкций верха обуви. Предложено в качестве перспективного устройства получения 3D модели использовать камеры цифрового фотоаппарата, смартфона или планшета.
4. Сформулированы требования к модулю «Оцифровка» и предложена его структурно-логическая схема, которая обеспечивает автоматизированный ввод информации о чертежах конструкций верха обуви в САПР. Установлено, что нужно разработать метод преобразования растровой информации о чертежах конструкций верха обуви в векторную форму.
5. Разработана структурно-логическая схема топологического алгоритма, позволяющего векторизовать чертежи конструкций верха обуви в соответствии с установленным набором апертур.
6. Выбран формат SVG, как наилучший для хранения векторного описания чертежей конструкций верха обуви. Выявлена необходимость интеграции полученной информации в смежные модули САПР.
7. Выявлена необходимость разработки математического описания для шаблонов деталей верха обуви, сохраняющего вторые производные и оперативно строящего контуры.

- 8.** Предложено математическое описание технологических преобразований конструктивной основы. Выделены основные свойства и задачи при детализовке обуви. Предложен простой метод выделения замкнутого контура, основанный на теории графов.
- 9.** Разработан рекуррентный компьютер, позволяющий регулировать число точек контура детали или шаблона. Выведено математическое описание кубических сплайнов на основе теории кратномасштабного анализа, гладкой интерполирующей схемы и осредняющего оператора. Показано, что при $\omega = \frac{1}{12}$ кривая проходит через интерполяционные точки шаблонов деталей.
- 10.** Проведена апробация модуля «Оцифровка» на разных чертежах конструкций верха обуви. Выявлено, что полученное векторное представление грунд-моделей удовлетворяет заданной точности и его можно использовать в САПР.
- 11.** Предложены открытые САПР для проектирования обуви в 2D. Сформулированы задачи по их модернизации. Выявлено, что их функциональные возможности можно расширить за счет применения дополнительных библиотек, написанных на языках программирования с++ или питоне. Показано, что модули «Оцифровка» и «Проектирование» с использованием средств технического зрения могут быть интегрированы в отечественные САПР 2D.
- 12.** Предложена рабочая гипотеза использования в обувном производстве открытых программ проектирования в 3D-пространстве: связка Regard +MeshLab+Blender (на основе фотограмметрии) и Kinect SDK с применением камеры Kinect.
- 13.** Приведенный расчет материальных затрат на проектирование обуви показал экономическую эффективность систем технического зрения, выражающуюся в: сокращении временных затрат на разработку новой модели при проектировании в 2D; расширении электронной базы данных и процессов автоматизации; существенном снижении стоимости используемого оборудования и программного обеспечения.

Список литературы

1. Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. РАЗВИТИЕ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ НА ПЕРИОД ДО 2025 ГОДА // [сайт] URL: <http://minpromtorg.gov.ru/> (дата обращения: 20/сентября/2015).
2. Стратегия развития информационного общества в Российской Федерации от 7 февраля 2008 г. N Пр-212.
3. Муртазина А.Р. *Программное обеспечение для векторизации чертежей* // Сборник научных трудов аспирантов. Вып.20. — 2014.
4. Максимова И.А., Костылева В.В. *Разработка и обоснование технологии изготовления специальной обуви в условиях массового производства* — М.: МГУДТ, 2009.
5. Бехренс А. *Машиностроительное проектирование за прошедшие 35 лет* // CAD/CAM/CAE Observer. — Выпуск №5. — 2006.
6. Jon Peddie Research. отчет Cad 2015 // [сайт] URL: <http://jonpeddie.com/> (дата обращения: 20/сентября/2015).
7. Autodesk. Autodesk завершает приобретение Delcam // [сайт] URL: <http://news.autodesk.com> (дата обращения: 20/сентября/2015).
8. Autodesk. Autodesk Inc // [сайт] URL: <http://www.autodesk.com/> (дата обращения: 20/сентября/2015).
9. Shoemaster // [сайт] URL: <http://www.shoemaster.co.uk/software-products/>.
10. [Форум обувщиков] URL: forum.shoemaker.ru (дата обращения: 20/09/2015).
11. [similarwe] URL: similarweb.com (дата обращения: 20/сентября/2015).
12. [pr-cy] URL: <http://pr-cy.ru/> (дата обращения: 20/09/2015).
13. [prodvigator] URL: <https://prodvigator.ru/> (дата обращения: 20/сентября/2015).
14. [alexa] URL: <http://www.alexa.com/> (дата обращения: 20/сентября/2015).
15. Robert McNeel и Associates. resources // [сайт] URL: <https://www.rhino3d.com/> (дата обращения: 20/сентября/2015).
16. АСКО-2Д // [сайт] URL: <http://asko2d.narod.ru/>.
17. ShoesModel // [МГУДТ] URL: <http://www.mgudt.ru> (дата обращения: 1/октябрь/2015).
18. Перцовский Павел Глебович. Программно-методический комплекс для расчета рационального использования материалов в подготовительно-раскройном

- производстве обувной промышленности : диссертация кандидата технических наук : 05.19.06. - Москва, 1999. - 210 с.
19. Ассоль // [сайт] URL: <http://assol.org>.
20. [TESEO - worldwide leader in automatic leather cutting] URL: <http://www.teseo.com/> (дата обращения: 10/октябрь/2015).
21. Линник А. И. Макетное моделирование обуви : курс лекций / А. И. Линник. – Витебск : УО «ВГТУ», 2010. – 60 с.
22. [Page of ClassiCAD company, engaged in creating and selling CAD software] URL: http://www.classicad.cz/index_en.htm (дата обращения: 10/октябрь/2015).
23. Гуляшов Антон Владимирович. Совершенствование методов компьютерного проектирования кожгалантерейных изделий : диссертация кандидата технических наук. М. 2010, 207 с..
24. Delcam // [сайт] URL: <http://www.footwear-cadcam.com/ru/home.asp>.
25. Минкомсвязь России. Приказ Минкомсвязи России «Об утверждении плана импортозамещения программного обеспечения» №96 // [сайт] URL: <http://minsvyaz.ru/ru/documents/4548/> (дата обращения: 20/сентября/2015).
26. Мязина Ю.С., Лисиенкова Л.Н. *САПР одежды: учебное пособие* — Челябинск: ЮУрГУ, 2007.
27. Андреева М.В. *НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВВОДА ЛЕКАЛ В КОМПЬЮТЕР* — «ФОТОДИГИТАЙЗЕР» // Журнал "Швейная промышленность". — Выпуск 6. — 2001.
28. *Сборник научных трудов к 110 – летию Ю.П. Зыбина 80 – летию кафедры художественного моделирования, конструирования и технологии изделий из кожи* — М.: МГУДТ, 2011.
29. Gerber Technology // [сайт] URL: <http://www.gerbertechnology.com/>.
30. Azariadis P. and Asparagathos N. *design of Plane Developments of Doubly Curved Surfaces* // Computer-Aided Design. — №29, — Выпуск 10. — 1997.
31. Лиокумович В.Х. *Конструирование обуви* — М.: Легкая индустрия, 1975.
32. Ключникова В. М., Кочеткова Т. С., Калита А. Н. *Практикум по конструированию изделий из кожи: Учебн. пособие для студентов вузов* — М.: Легпромбытиздат, 1985.
33. А. Р. Муртазина, И. Б. Разин, В. В. Костылева, В. П. Миронов *Концепция модуля «оцифровка» в системах автоматизированного проектирования конструкций верха обуви* // Научный журнал «Дизайн и технологии». — №51 (93), — февраль 2016. — с. 127-132.

34. Жук, Д.М., Мартынюк В.А., Сомов П.А. *Системы автоматизированного проектирования. Кн.2: Технические средства и операционные системы* — М.: Высш. шк., 1988.
35. Инженерная графика Курс лекций по истории искусства // [сайт] URL: http://256bit.ru/informat/eu_Hardware/hard2_1.htm.
36. 5. Интернет-магазин largeforma оборудования для широкоформатной печати [Электронный ресурс]: режим доступа к ресурсу: <http://www.largeformat.ru/> // [Интернет-магазин largeforma оборудования для широкоформатной печати] URL: <http://www.largeformat.ru/> (дата обращения: 15/январь/2015).
37. Цифровой фотоаппарат // [сайт] URL: <http://sibdor.tom.ru/index.php/oborudovanie/23-tsifrovoj-fotoapparat>.
38. Гурчиани М.Т., Габдреева Н.В. *Словарь композитов русского языка новейшего периода* — М.: ФЛИНТА: Наука, 2012.
39. [Яндекс маркет – сервис для выбора товаров и места их покупки] URL: <https://market.yandex.ru> (дата обращения: 15/январь/2015).
40. Кочеткова Т. С., Ключникова В. М. *Антропологические и биомеханические основы конструирования изделий из кожи: Учебник для вузов* — М.: Легпромбытиздат, 1991.
41. Румянцева Е.Г., Костылева В.В. *Обзор методов исследования тела человека в пространстве: учебное пособие* — М.: ИИЦ МГУДТ, 2010.
42. [Услуги и продажа оборудования в сфере 3D печати и сканирования] URL: <http://3dboom.su/> (дата обращения: 15/январь/2016).
43. Мовчан А. *Компьютерные системы биометрической идентификации* — s.l.: LAP Lambert Academic Publishing, 2015. — 80 с.
44. Леонтьев Б.К. *Секреты сканирования на ПК* — М.: ООО «Бизнессофт», Литературное агентство «Бук-Пресс», 2006.
45. Пореев В.Н. *Компьютерная графика* — СПб.: БХВ-Петербург, 2002.
46. Лазариди К.Х., Андреев В.И., Донской А.С. и др *Машинная графика и основы САПР в текстильной и легкой промышленности* — Л.: ЛИТЛП, 1990.
47. Дэвид Буш *Цифровая фотография и работа с изображением* — Москва: КУДИЦ-Образ, 2004.
48. Кен Милберн, Рон Рокуэлл, Марк Чемберс *Цифровая фотография библия пользователя* — М.: Вильямс, 2003.
49. [Standa Photonics] URL: <http://www.standaphotonics.com/lenses/aspherical-lenses.php> (дата обращения: 10/октябрь/2015).

50. [Сайт Василия Андреева об искусстве фотографии и о том, как стать фотографом] URL: <http://vasili-photo.com/articles/aberrations.html> (дата обращения: 11/октябрь/2015).
51. [Düğün, Portre, Reklam Fotoğrafçısı - Kürşat Karabulut] URL: <http://www.kursatkarabulut.com/chromatic-aberration-nedir/> (дата обращения: 10/октябрь/2015).
52. [OpenCV] URL: <http://opencv.org/> (дата обращения: 1/февраль/2015).
53. Sanna A., Lamberti F., Paravati G., Henaio R., Eduardo A., Manuri F. *A Kinect-Based Natural Interface for Quadrotor Control* // *Intelligent Technologies for Interactive Entertainment*. — №78, — 2012.
54. Z. Zhang "*Camera Calibration*" // eds G. Medioni and S.B. Kang *Emerging Topics in Computer Vision* — Upper Saddle River: Prentice Hall Professional Technical Reference, 2004. — с. 4-43.
55. Ajmal Mian, Lecture 08 – Camera Calibration, CITS 4402 Computer Vision Ajmal Mian.
56. Гонсалес Р., Вудс Р. *Цифровая обработка изображений* — М.: Издательство Техносфера, 2005.
57. Павлидис Т. *Алгоритмы машинной графики и обработки изображений* — Москва: Радио и связь, 1986.
58. Фурман Я.А., Кревецкий А.В., Передреев А.К. и др *Введение в контурный анализ; приложения к обработке изображений и сигналов* — 2-е изд — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
59. N. Otsu *A threshold selection method from gray-level histograms* // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. — №SMC-9., Выпуск 1. — January 1979. — с. 62-66.
60. Zhou H., Lin D.J., Huang T.S. *Static hand gesture recognition based on local orientation histogram feature distribution model* // *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop*. — №10, — 2004.
61. Р. Дуда, П. Харт *Распознавание образов и анализ сцен* — М.: Мир, 1976.
62. Кудряшов А.П. *Извлечение и сопоставление точечных особенностей* // *Электронный научный журнал «Исследовано в России»*. — 2007. — с. 1095-1104.
63. Hans Moravec *Proceedings of the seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence // Rover Visual Obstacle Avoidance*. — Vancouver, British Columbia, 1981. — с. 785-790.

64. C. Harris and M. Stephens A combined corner and edge detector // Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference. — Manchester, 1988. — с. pp 147-151.
65. Lowe D.G International Conference on Computer Vision // Object recognition from local scale-invariant features. — Corfu, Greece, 1999. — с. 1150-1157.
66. David G. Lowe *Distinctive image features from scale-invariant keypoints* // International Journal of Computer Vision. — №60, — Выпуск № 2. — January 2004. — с. 91-110.
67. Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L. *SURF: Speeded up robust features* // Computer Vision and Image Understanding. — №110, — Выпуск № 3. — июнь 2008. — с. 346-359.
68. Edward Rosten and Tom Drummond *Machine learning for high speed corner detection* // 9th European Conference on Computer Vision. — №1, — May 2006. — с. 430-443.
69. Разин И.Б., Миронов В.П., Муртазина А.Р. Методы сегментации изображений // Сборник материалов конференции ИННОВАЦИИ-2015. — Москва, 2015. — с. 91-93.
70. Местецкий Л.М. *Непрерывная морфология бинарных изображений: фигуры, скелеты, циркуляры.* — М.: Физматлит, 2009.
71. Местецкий Л. *Скелет многоугольной фигуры – представление плоским прямолинейным графом* // Труды 20-ой Международной Конференция по Компьютерной Графике и Зрению. — 2010.
72. В.Т. Фисенко, Т.Ю. Фисенко *Компьютерная обработка и распознавание изображений* — СПб: СПбГУ ИТМО, 2008.
73. Tagliasacchi A., Zhang X., Cohen-or D. *Curve Skeleton Extraction from Incomplete Point Cloud* // ACM Transactions on Graphics (Special Issue of SIGGRAPH). — №28, — Выпуск №3. — 2009.
74. Manisha Bhagwat, R. K. Krishna & Vivek Pise *Simplified Watershed Transformation* // International Journal of Computer Science & Communication. — №1., Выпуск 1. — 2010. — с. 175-177.
75. Fabbri R., Estrozi L.F, Costa F. *On Voronoi Diagrams and Medial Axes* // Journal of Mathematical Imaging and Vision. — №17, — 2012.
76. Муртазина А.Р., Миронов В.П., Разин И.Б. Топологический алгоритм векторизации изображений // сборнике статей Международной научно-практической конференции РОЛЬ НАУКИ В РАЗВИТИИ ОБЩЕСТВА. — Уфа, 2015.

77. Шапиро Л., Стокман ДЖ. *Компьютерное зрение* — М.: БИНОМ Лаборатория знаний, 2009.
78. [Historical resource on 3D printing] URL: http://www.fabbers.com/tech/STL_Format (дата обращения: 20/октябрь/2015).
79. [Системы автоматизированного проектирования САПР CAD/CAM/CAE] URL: <http://sapr-cad.ru/glava-standarty-obmena-dannymi-mezhdu-sistemami/format-iges> (дата обращения: 20/октябрь/2015).
80. [Open Standards - the basics. BuildingSMART] URL: <http://buildingsmart.org> (дата обращения: 21/октябрь/2015).
81. Wavefront Technologies. [Описание файла OBJ] URL: <http://www.martinreddy.net/gfx/3d/OBJ.spec> (дата обращения: 22/октябрь/2015).
82. [Bentley Responds to Autodesk] URL: <https://www.bentley.com> (дата обращения: 22/октябрь/2015).
83. Петрова Н., Совершенствование процесса проектирования обуви с использованием современных информационных технологий.: Диссертация на соискание уч. ст. маг. (с приложением), 2011.
84. Прагт М. Фокс А. *Вычислительная геометрия. Применение в проектировании и на производстве.* — М.: Мир, 1982. — 304 с.
85. В. М. Дегтярев *Компьютерная геометрия и графика* — Москва: Академия, 2010.
86. Е. А. Никулин *Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики* — СПб: БХВ-Петербург, 2003.
87. Дингельдей Ф. *Сборник упражнений и практических задач по интегральному исчислению.* — М.-Л.: ГТТИ, 1933.
88. Н. Д. Ганелина, В. Д. Фроловский, *Исследование методов построения кратчайшего пути обхода отрезков на плоскости* // Сиб. журн. вычисл. матем. — №9., Выпуск № 3. — 2006. — с. 241-252.
89. Сергей Стечкин, Юрий Субботин *Сплайны в вычислительной математике* — М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства "Наука", 1976. — 248 с.
90. Роджерс Д., Адамс Дж *Математические основы машинной графики* — М.: Мир, 2001. — 604 с.
91. Ибрагимов И.И. *Методы интерполяции функций и некоторые их применения* — М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства "Наука", 1971. — 520 с.

92. Ирина Бурова, Юрий Демьянович *Теория минимальных сплайнов* — СПб.: СПбГУ, 2005. — 316 с.
93. Анатолий Половко, Павел Бутусов *Интерполяция. Методы и компьютерные технологии их реализации* — СПб.: БХВ-Петербург, 2004. — 320 с.
94. Бердышев В.И., Петрак Л.В. *Аппроксимация функций, сжатие численной информации, приближения* — Екатеринбург: УрО РАН, 1999.
95. RIESENFELD R. *On Chaikin's algorithm.* // IEEE Computer Graphics and Applications. — №4., Выпуск 3. — 1975. — с. 304-310.
96. Столниц Э., ДеРоуз Т., Салезин Д. *Вейвлеты в компьютерной графике* — Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002.
97. Dyn N., Levin D., Gregory J. *A four-point interpolatory subdivision scheme for curve design.* // Computer-Aided Geometric Design. — 1987.
98. Муртазина А.Р., Миронов В.П., Разин И.Б., Тихонова К.Н. *Интерполяция точек кубического сплайна методом половинного деления* // Научный журнал «Дизайн и технологии». — 2010. — с. 36-39.
99. Муртазина А.Р., Миронов В.П., Разин И.Б. *Приближение к классическому сплайну в 2D* // Научный журнал «Дизайн и технологии». — 2011. — с. 41-46.
100. Прасолов В.В. *Задачи и теоремы линейной алгебры* — М.: Наука, ФМ, 1996.
101. Мазиков А.В., Миронов В.П., Муртазина А.Р. *Четырёхточечная интерполирующая кубическая схема для проектирования кривых* // Научный журнал «Дизайн и технологии». — 2013. — с. 75-79.
102. Василенко В.А. *Сплайн-функции: теория, алгоритмы, программы* — Новосибирск: Наука, 1983.
103. Майника Э. *Алгоритмы оптимизации на сетях и графах* — М.: Мир, 1981.
104. Закревский А.Д. *Логика распознавания* — М.: Наука и техника, 1988.
105. Л.А Котюжанский, В.А. Пухов *Универсальная система распознавания образов – структура, обучение и тестирование системы* // — Екатеринбург, 2008.
106. [Сайт компании НейроПроект, специализирующейся на разработке ПО для анализа данных, оказании консалтинговых и образовательных услуг. Литература по нейронным сетям, генетическим алгоритмам. Программы по нейронным сетям] URL: http://www.neuroproject.ru/articles_dak_nn.php (дата обращения: 12/октябрь/2015).
107. А.Б. Барский *Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений* — М.: Финансы и статистика, 2004.

108. Саймон Хайкин *Нейронные сети: полный курс, 2-е издание* — М.: Издательский дом «Вильямс», 2006.
109. Куракин А.В., Распознавание динамических жестов в системе компьютерного зрения на основе медиального представления формы изображений, 2012.
110. Каленчук-Порханова А.А., Вакал Л.П. *Наилучшая чебышевская аппроксимация для сжатия численной информации* // Компьютерная математика. — 2009. — с. 111-119.
111. Муртазина А.Р., Миронов В.П., Разин И.Б. *Алгоритм сжатия данных* // Научный журнал «Дизайн и технологии». — 2014. — с. 51-55.
112. CSoft. [Группа компаний CSoft специализируется на предоставлении комплексных решений для автоматизации проектирования] URL: <http://www.csoft.ru/catalog/soft/rasterdesk-pro/rasterdesk-pro-11.html> (дата обращения: 10/октябрь/2015).
113. [Векторизация карт Easy Trace] URL: <http://www.easytrace.com> (дата обращения: 10/октябрь/2015).
114. [Inkscape графический редактор] URL: <https://inkscape.org/ru/o-programyue/> (дата обращения: 10/октябрь/2015).
115. Easy Trace. [Easy Trace] URL: <http://www.easytrace.com/ru/video2/video/otcifrovka-lesoustroitelnykh-planshetov-eshche-proshche> (дата обращения: 15/октябрь/2015).
116. Костылева В.В., Разин И.Б., Муртазина А.Р. Некоторые аспекты реализации электронного пособия по конструированию изделий из кожи для обучения лиц с ограниченными возможностями здоровья // Актуальные проблемы развития современной науки и образования: Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 30 апреля 2015 г.: в 5 частях. Часть III. — М. «АР-Консалт», 2015. — с. 88-90.
117. Костылева В.В., Муртазина А.Р., Разин И.Б. Электронное пособие для лиц с ограниченными возможностями // Сборник научных публикаций «Актуальные проблемы инклюзии: качество жизни, безбарьерная среда, образование без границ». — ФГБОУ ВПО «МГУДТ», 2016. — с. 6-9.
118. Российский статистический ежегодник. 2015: Стат.сб./Росстат. - Р76 М., 2015. – 728 с.

119. Suzuki S., Abe K. *Topological Structural Analysis of Digitized Binary Images by Border Following* // Computer vision, graphics, and image processing. — №30, — 1985.
120. Лаптев А. А., Автоматизированная система бесконтактного обмера и обработки данных поверхности стопы. : Диссертация на соискание уч. ст. канд.,2012.
121. Указ Президента РФ от 7 июля 2011 г. N 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации».
122. А. Вахитов, Л. Гуревич, Д. Павленко *Обзор алгоритмов стереозрения* // Стохастическая оптимизация в информатике. — 2008. — с. 151-167.
123. Жук Д.В., Тузиков А.В., Бородач А.В. *Восстановление трёхмерной модели сцены по цифровым изображениям* // «Искусственный интеллект». — Выпуск №2. — 2006. — с. 142-146.
124. Жук Д.В., Тузиков А.В. *Реконструкция трехмерной модели по двум цифровым изображениям* // Информатика. — Выпуск № 1. — 2006. — с. 16-26.
125. Л.А. Котюжанский *Вычисление карты глубины стереоизображения на графическом процессоре в реальном времени* // Фундаментальные исследования. — Выпуск № 6. — 2012.
126. [Autodesk 123D - Free 3D Modeling Software, 3D Models, DIY Projects, Personal Fabrication Tools] URL: <http://www.123dapp.com/catch> (дата обращения: 15/ноябрь/2015).
127. [Regard3d] URL: <http://www.regard3d.org/> (дата обращения: 15/ноябрь/2015).
128. [MeshLab Home Page] URL: <http://meshlab.sourceforge.net/> (дата обращения: 15/ноябрь/2015).
129. Лекция по работе с облаком точек при помощи библиотеки PCL // [сайт] URL: <http://www.pointclouds.org/assets/icra2012/people.pdf> (дата обращения: 20/октября/2015).
130. [blender.org Free and Open 3D Creation Software] URL: <https://www.blender.org/> (дата обращения: 15/ноябрь/2015).
131. Оганезов К.В., Разин И.Б. Распознавание контуров кож с использованием камеры microsoft kinect v1. // Сборник научных трудов аспирантов. Вып. 20. — М., 2014. — с. 75-79.
132. S. Izadi, D. Kim, O. Hilliges, D. Molyneaux, R. Newcombe, P. Kohli, J. Shotton, S. Hodges, D. Freeman, A. Davison, A. Fitzgibbon *KinectFusion: real-time 3D*

reconstruction and interaction using a moving depth camera // *UIST '11 Proceedings of the 24th annual ACM symposium on user interface software and technology*. — 2011.

133. Разин И.Б., Миронов В.П., Муртазина А.Р., Оганезов К.В. Применение библиотеки OpenCV // *Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности. Часть 2*. — М., 2015. — с. 244-246.

134. [Девайсы, новости и обзоры компьютерной техники — DeviceBox.ru] URL: <http://devicebox.ru/kinect/> (дата обращения: 10/декабрь/2015).

135. [heise online - IT-News, Nachrichten und Hintergründe] URL: <http://www.heise.de/preisvergleich/microsoft-kinect-2-0-xbox-one-a1142031.html> (дата обращения: 10/декабрь/2015).

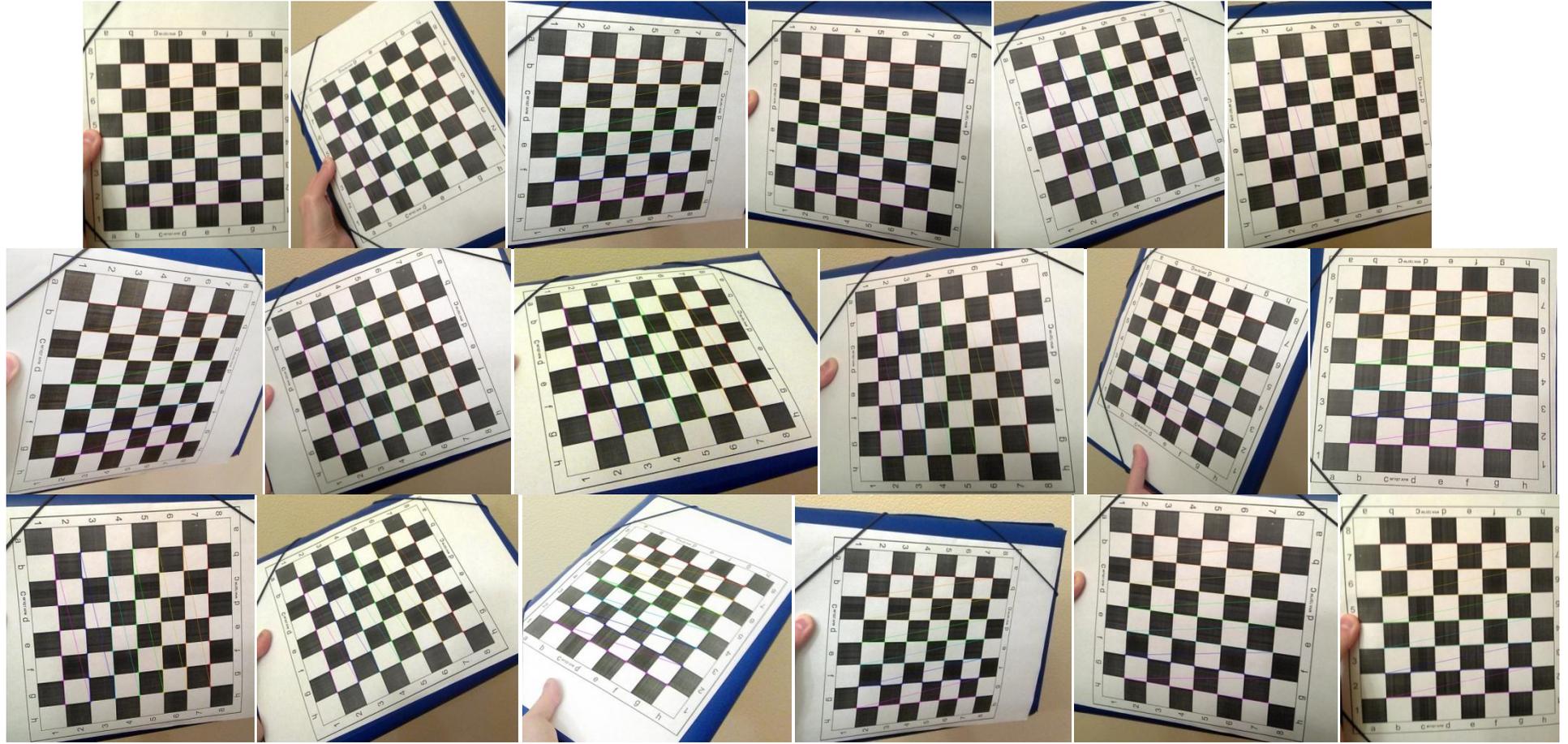
Приложение А

Структура bmp файла

смещение	размер	название	описание
0	2	bfType	подпись, должны быть 4D42 в шестнадцатеричной системе
2	4	bfSize	размер BMP-файла в байтах
6	2	bfReserved1	зарезервированы, должны быть равны нулю
8	2	bfReserved2	
10	4	bfOffBits	Смещение начала данных изображения в байтах
14	4	biSize	размер структуры BITMAPINFOHEADER, должны быть 40
18	4	biWidth	ширина изображения в пикселях
22	4	biHeight	Высота изображения в пикселях
26	2	biPlanes	Количество плоскостей в изображении, должно быть 1
28	2	biBitCount	Количество бит на пиксель (1, 4, 8, 24 или)
30	4	biCompression	тип сжатия (0 = нет, 1 = RLE-8, 2 = RLE-4)
34	4	biSizeImage	размер данных изображения в байтах (в том числе обивка)
38	4	biXPelsPerMeter	горизонтальное разрешение в пикселях на метр
42	4	biYPelsPerMeter	Разрешение по вертикали в пикселях на метр
46	4	biClrUsed	Количество цветов в изображении, или ноль
50	4	biClrImportant	ряд важных цветов, или ноль

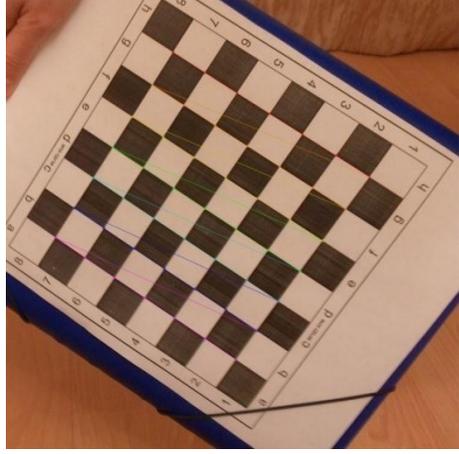
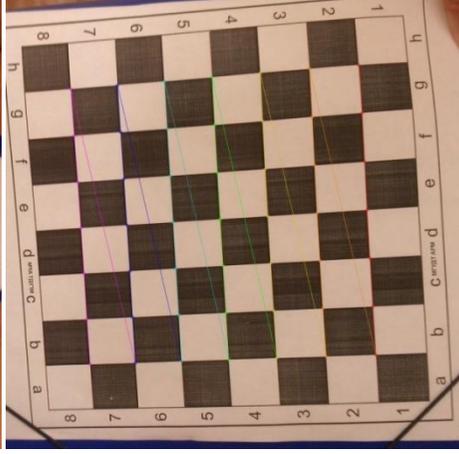
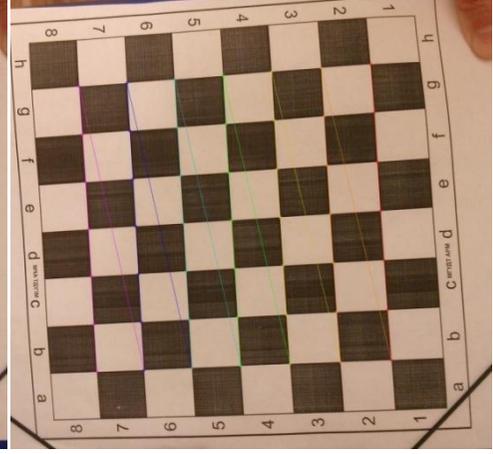
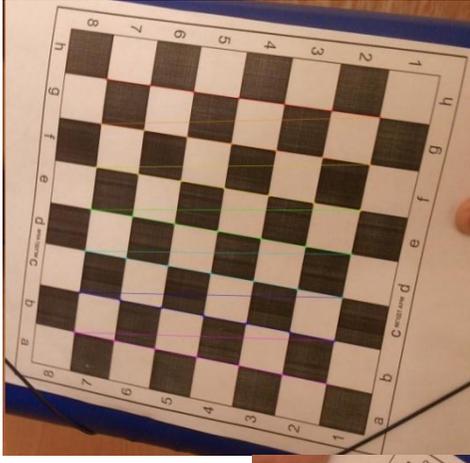
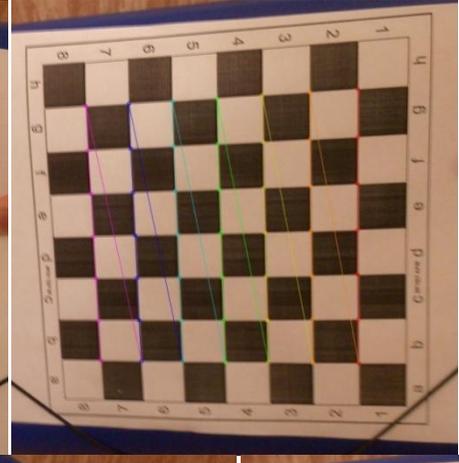
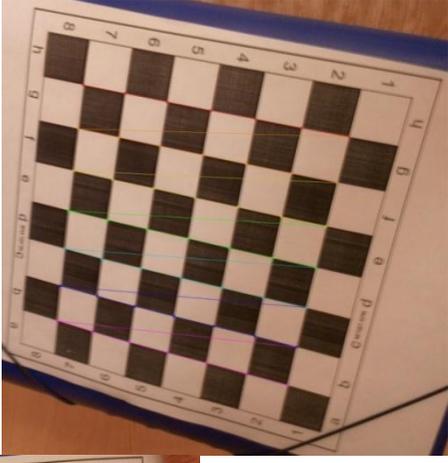
Приложение В

Калибровка камеры смартфона



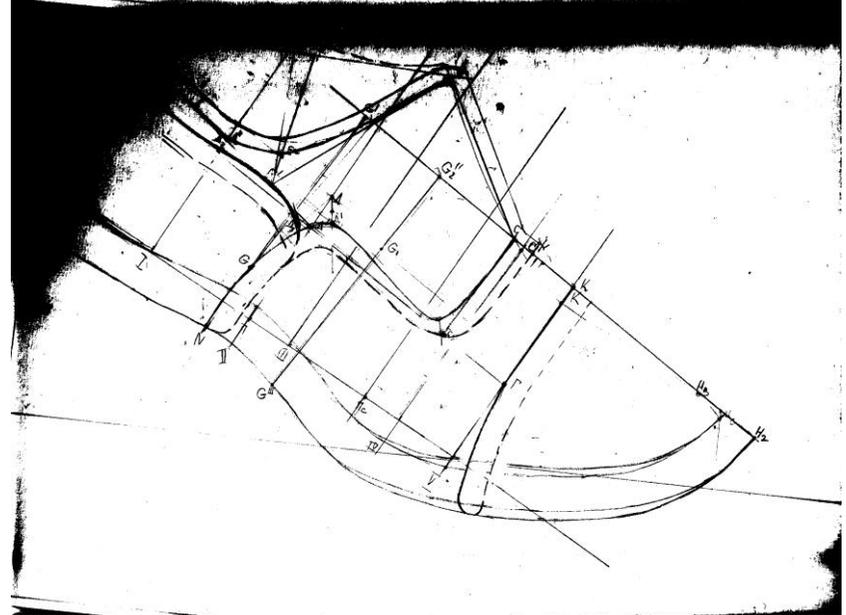
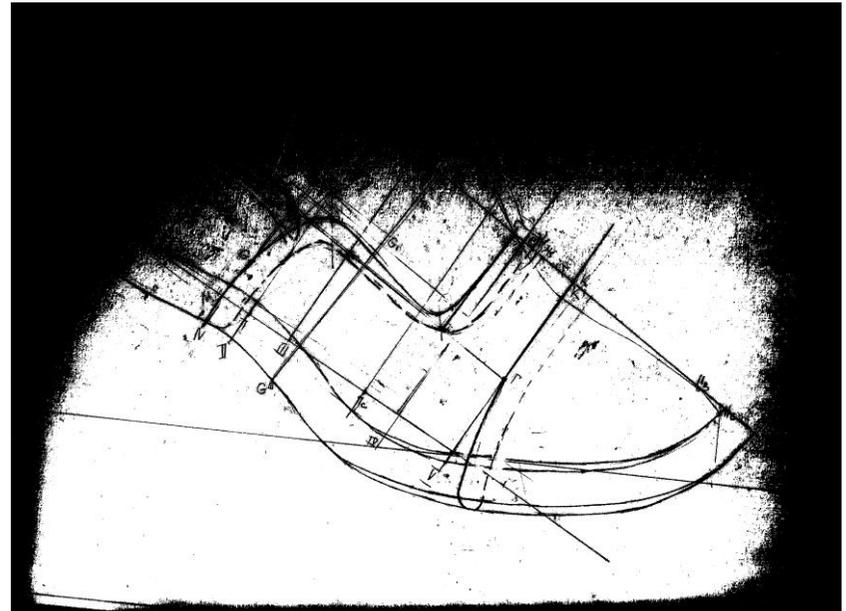
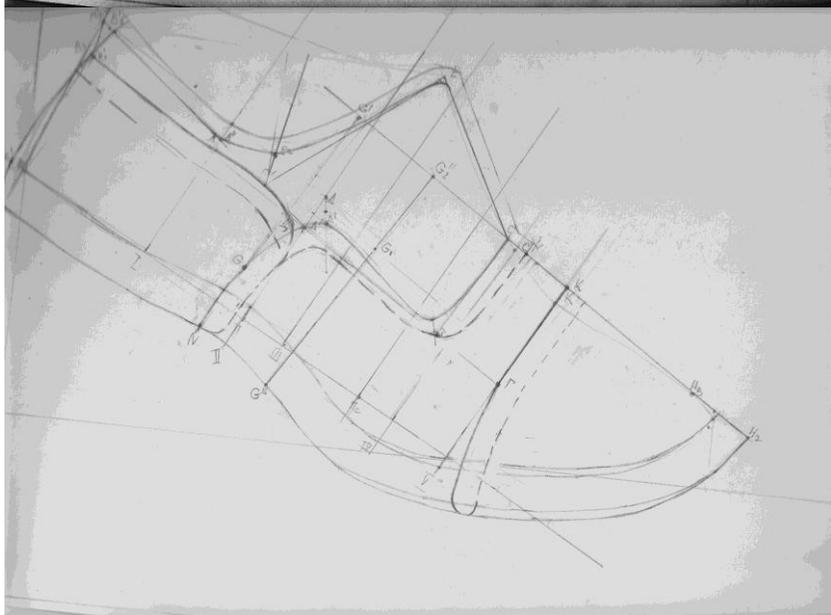
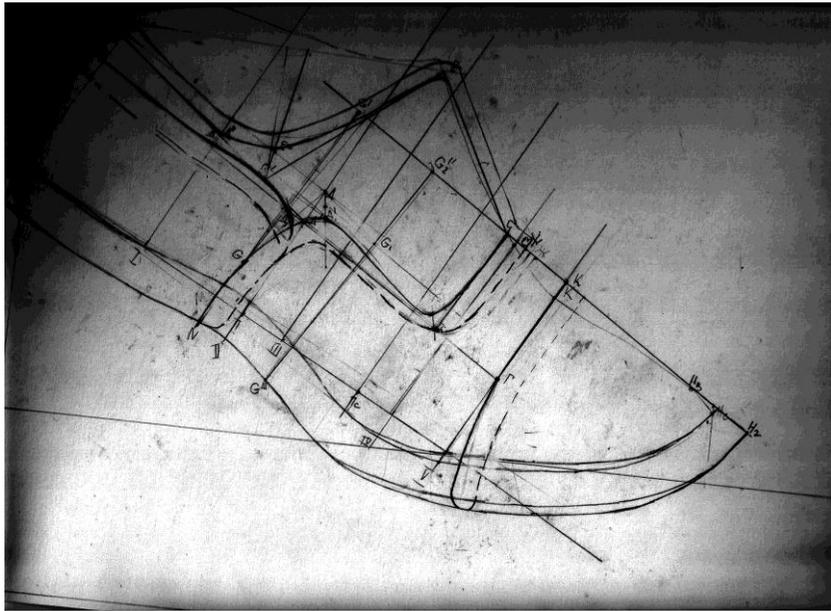
Приложение С

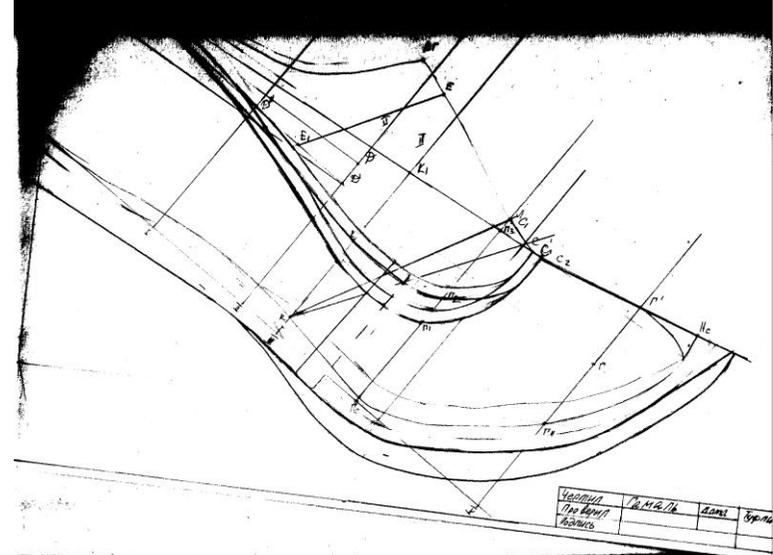
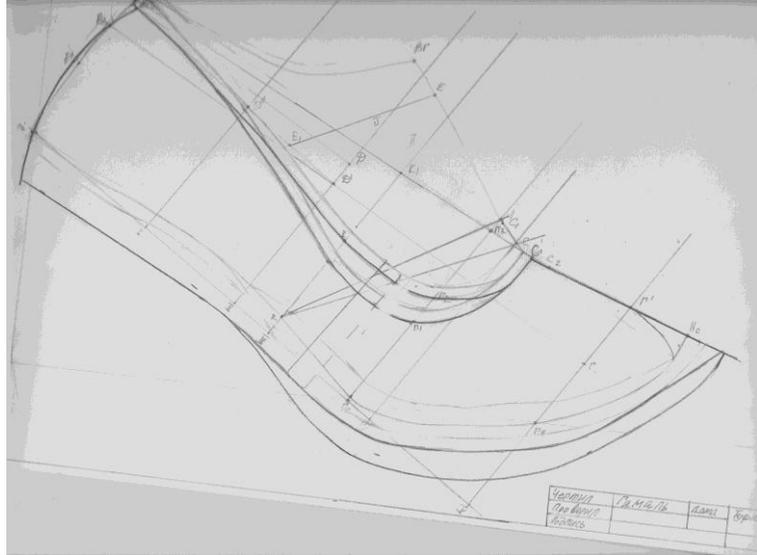
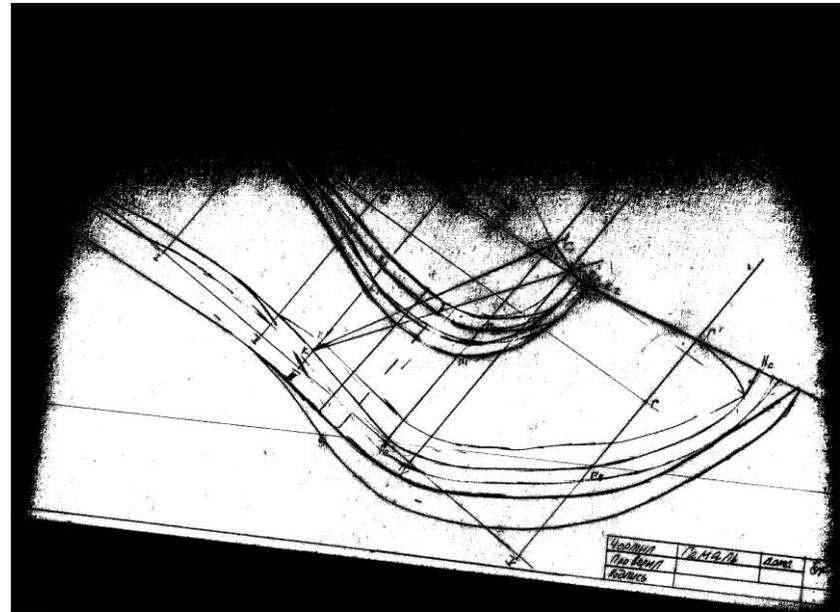
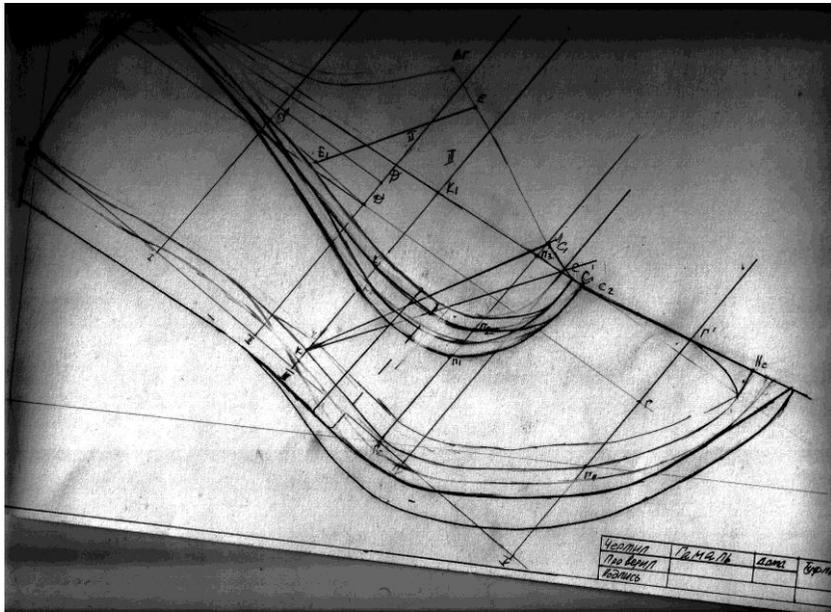
Калибровка камеры планшета

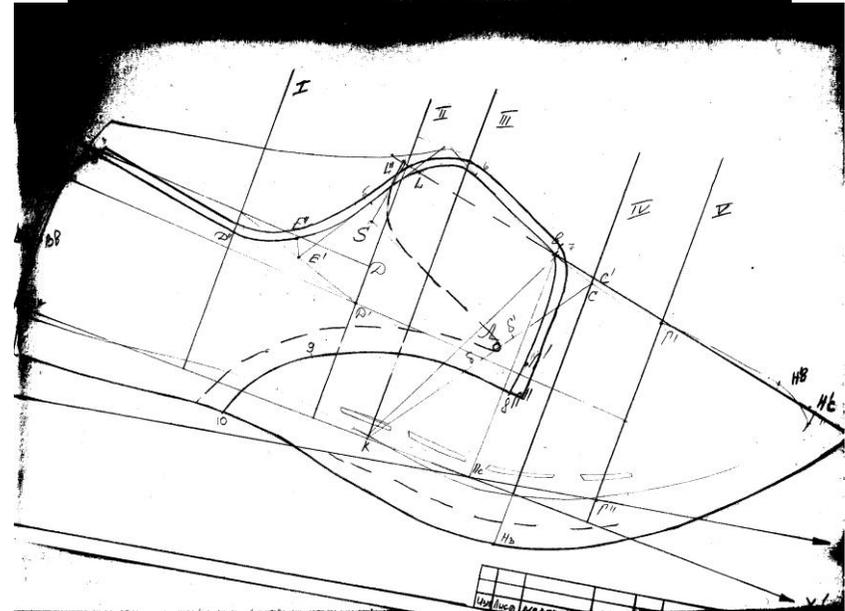
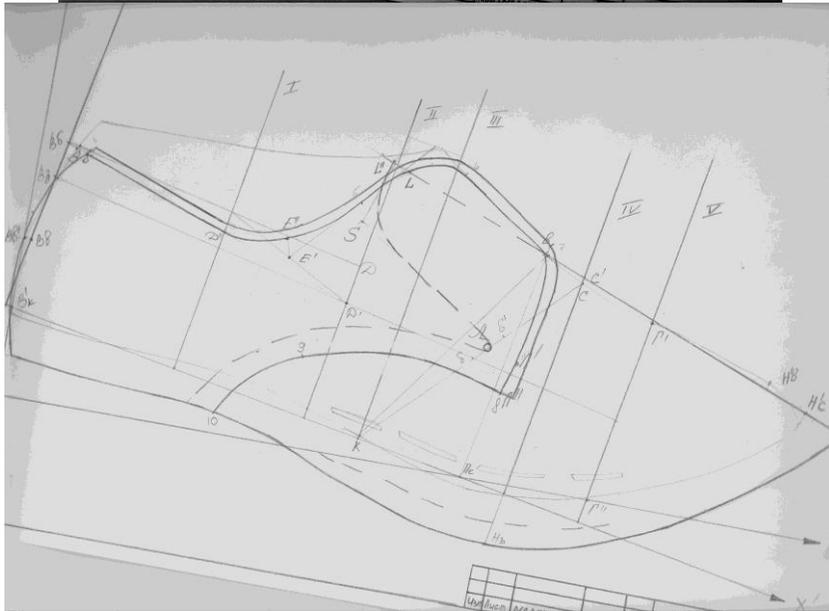
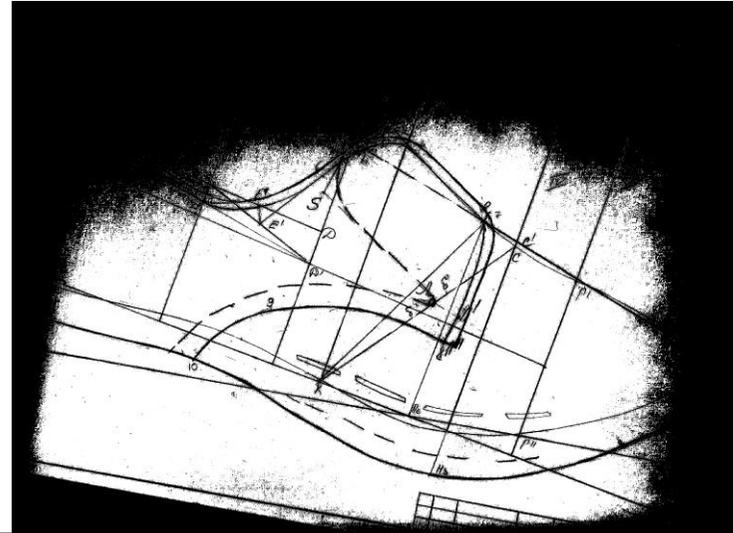
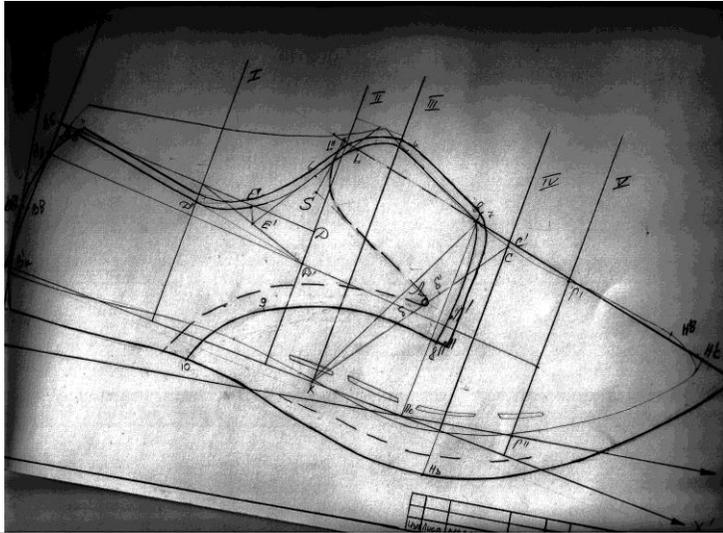


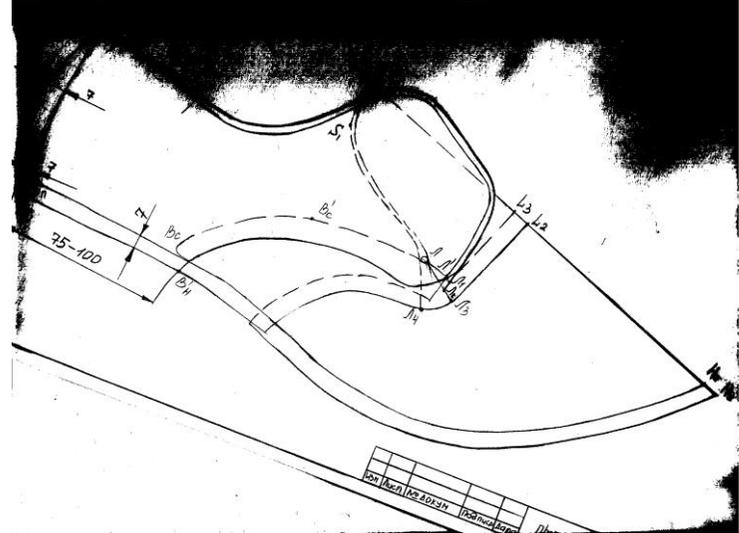
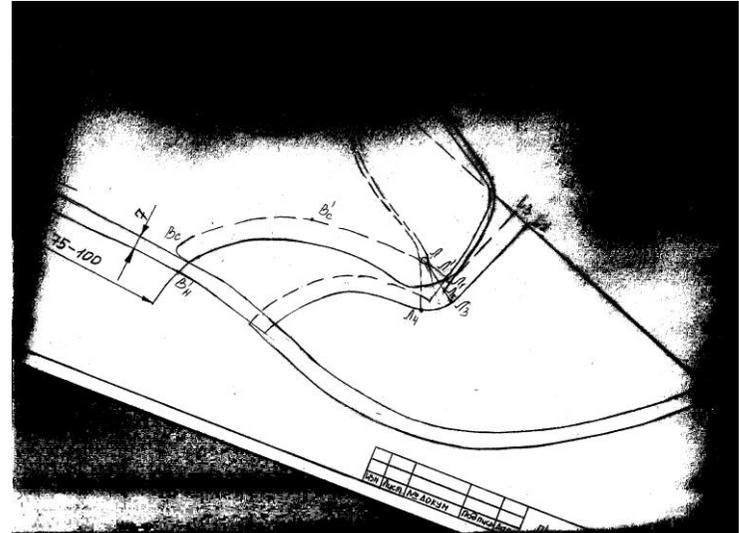
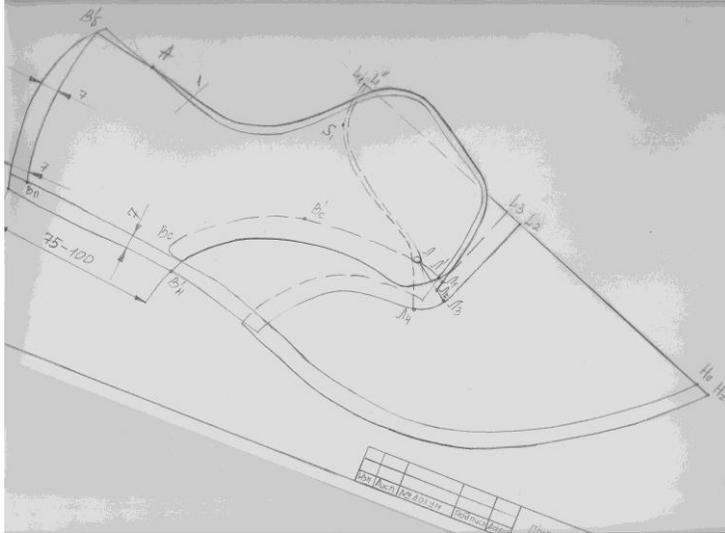
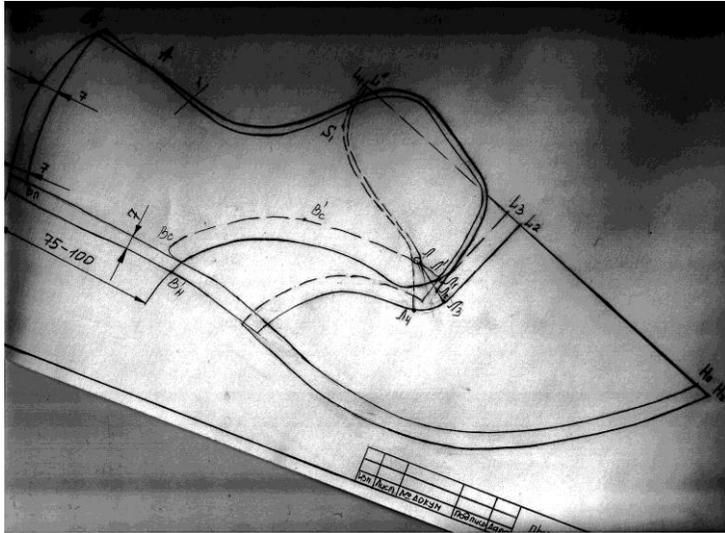
Приложение D

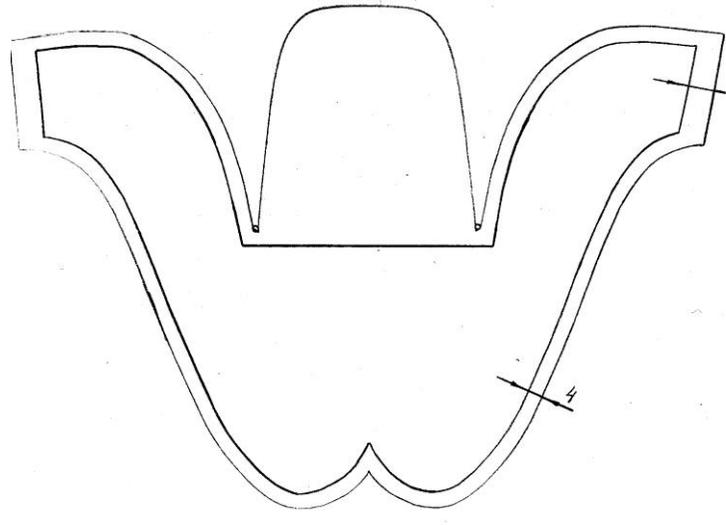
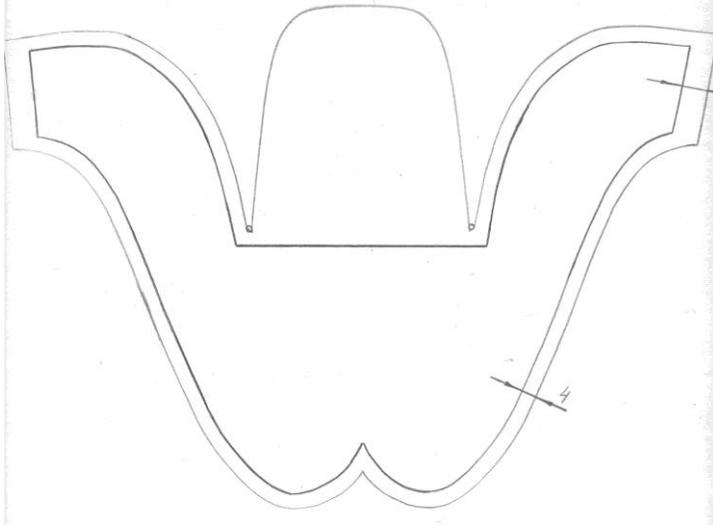
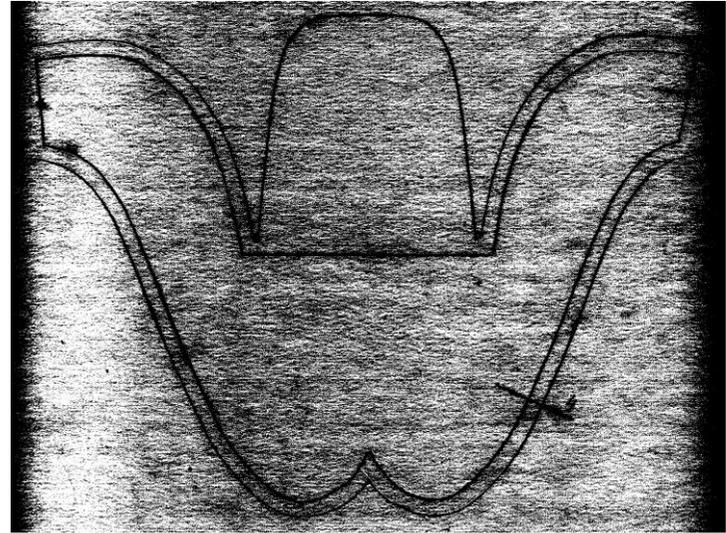
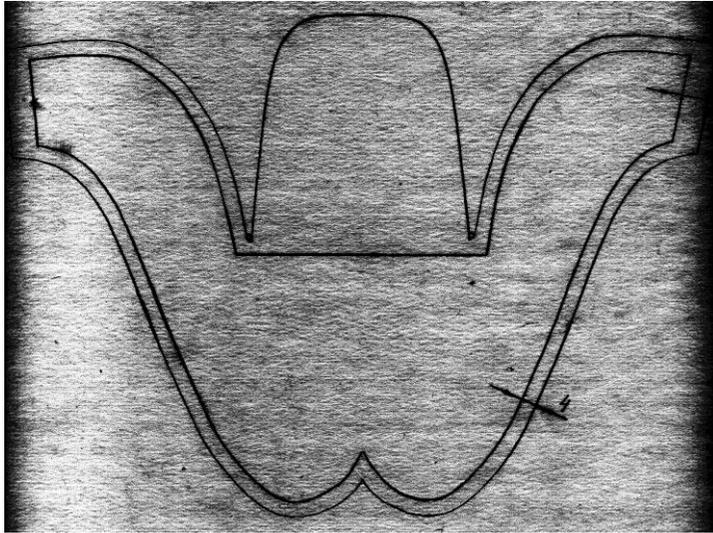
Метод Отцу

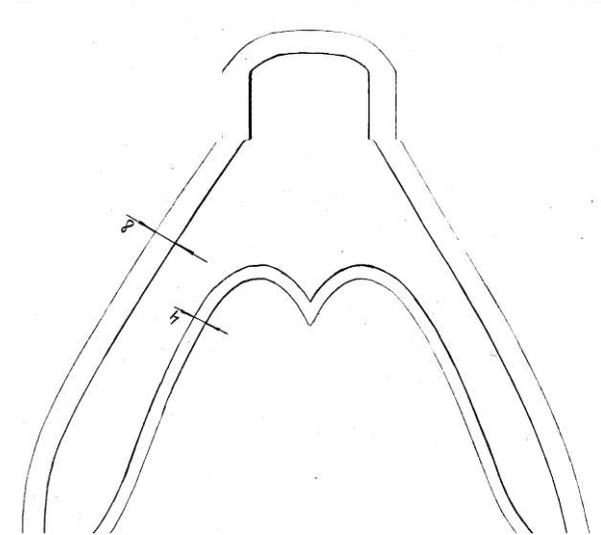
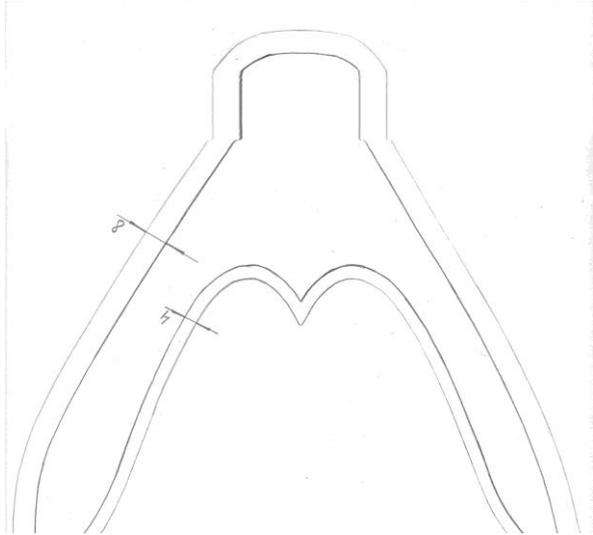
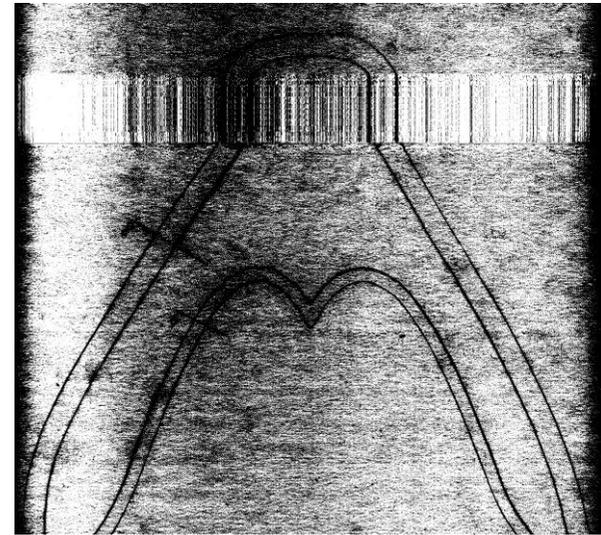
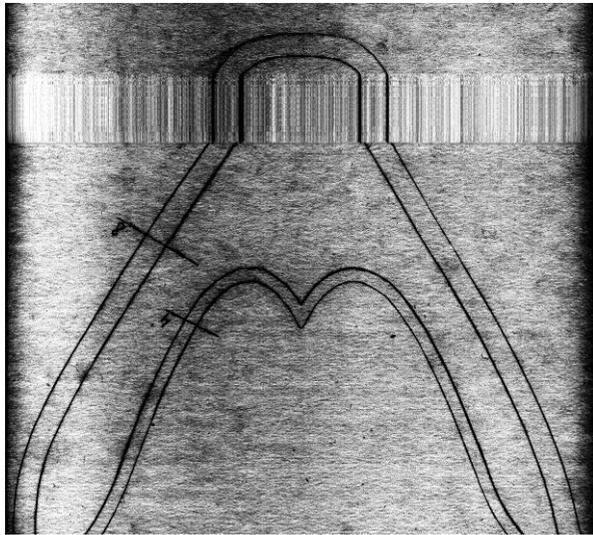






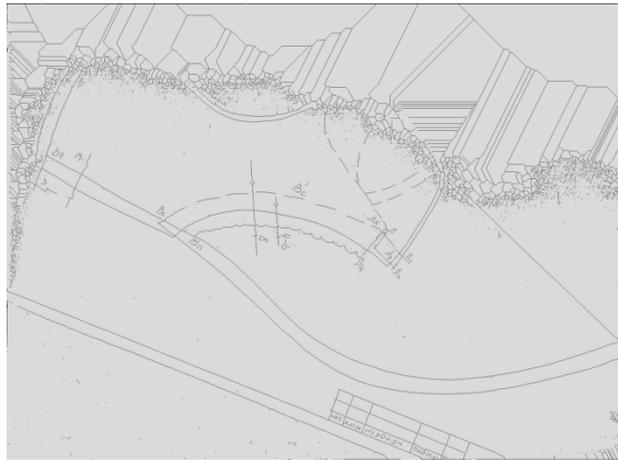
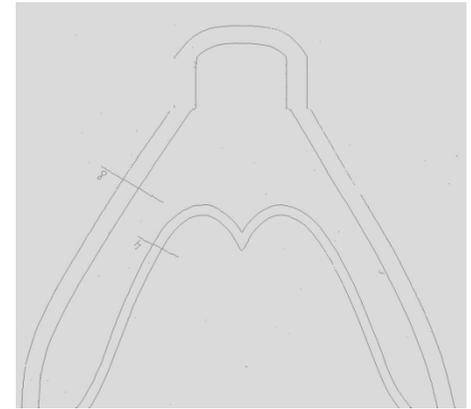
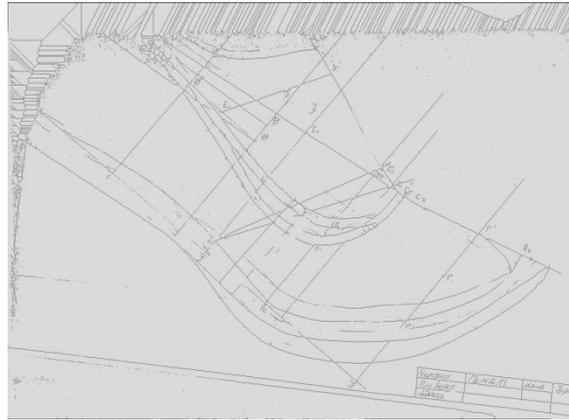
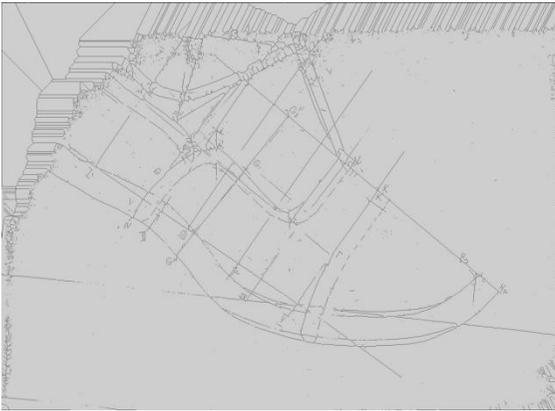
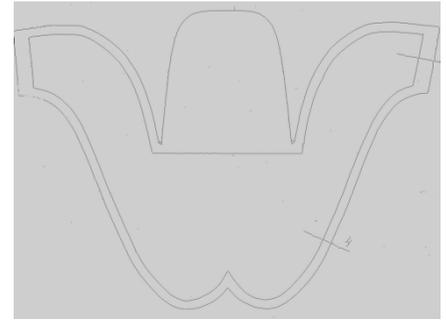






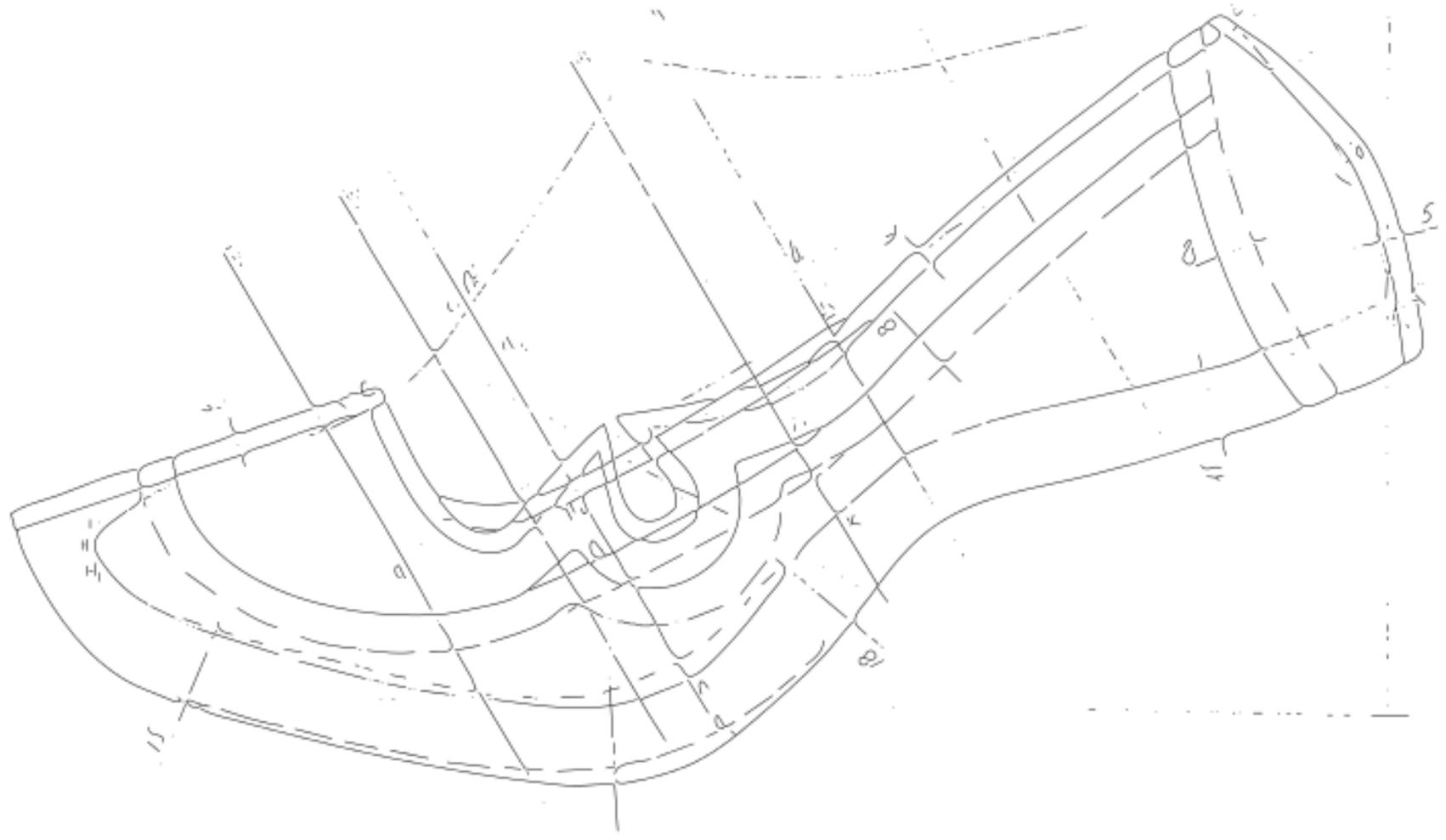
Приложение Е

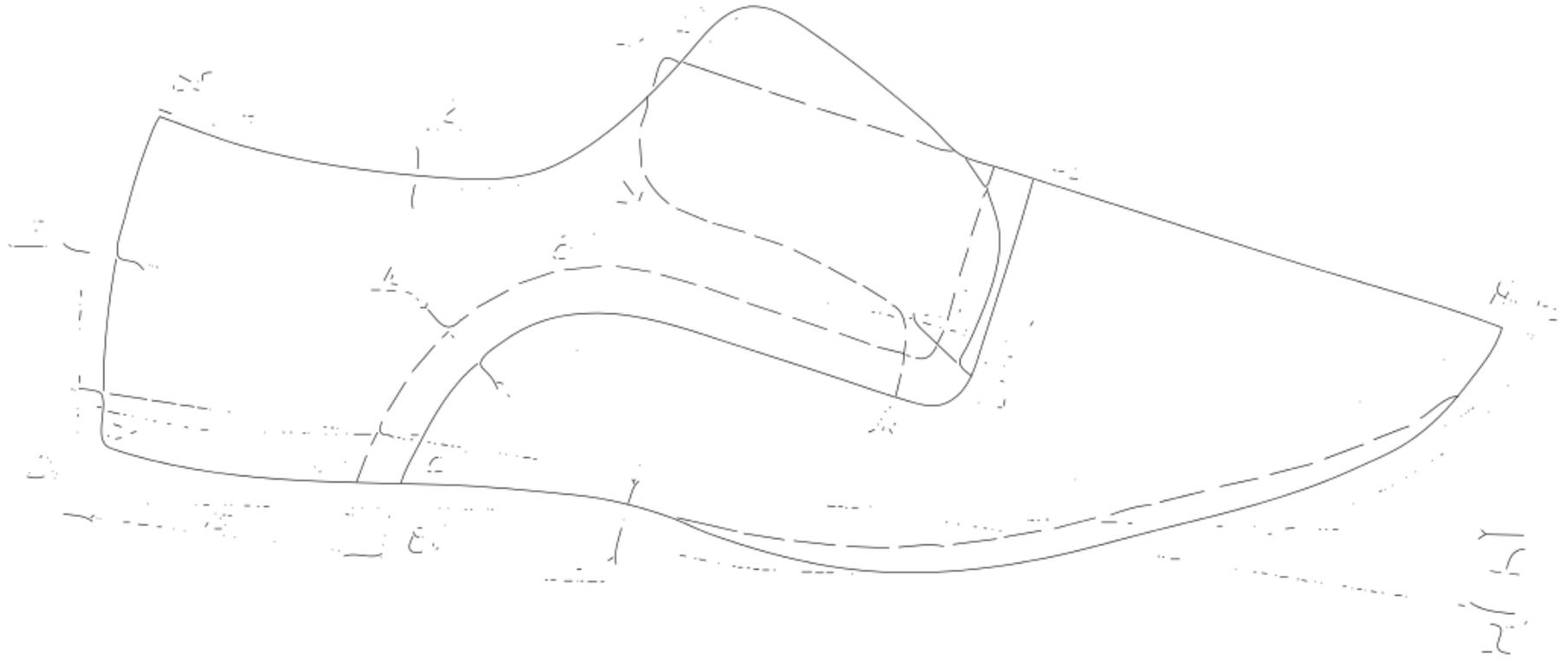
Скелетизация

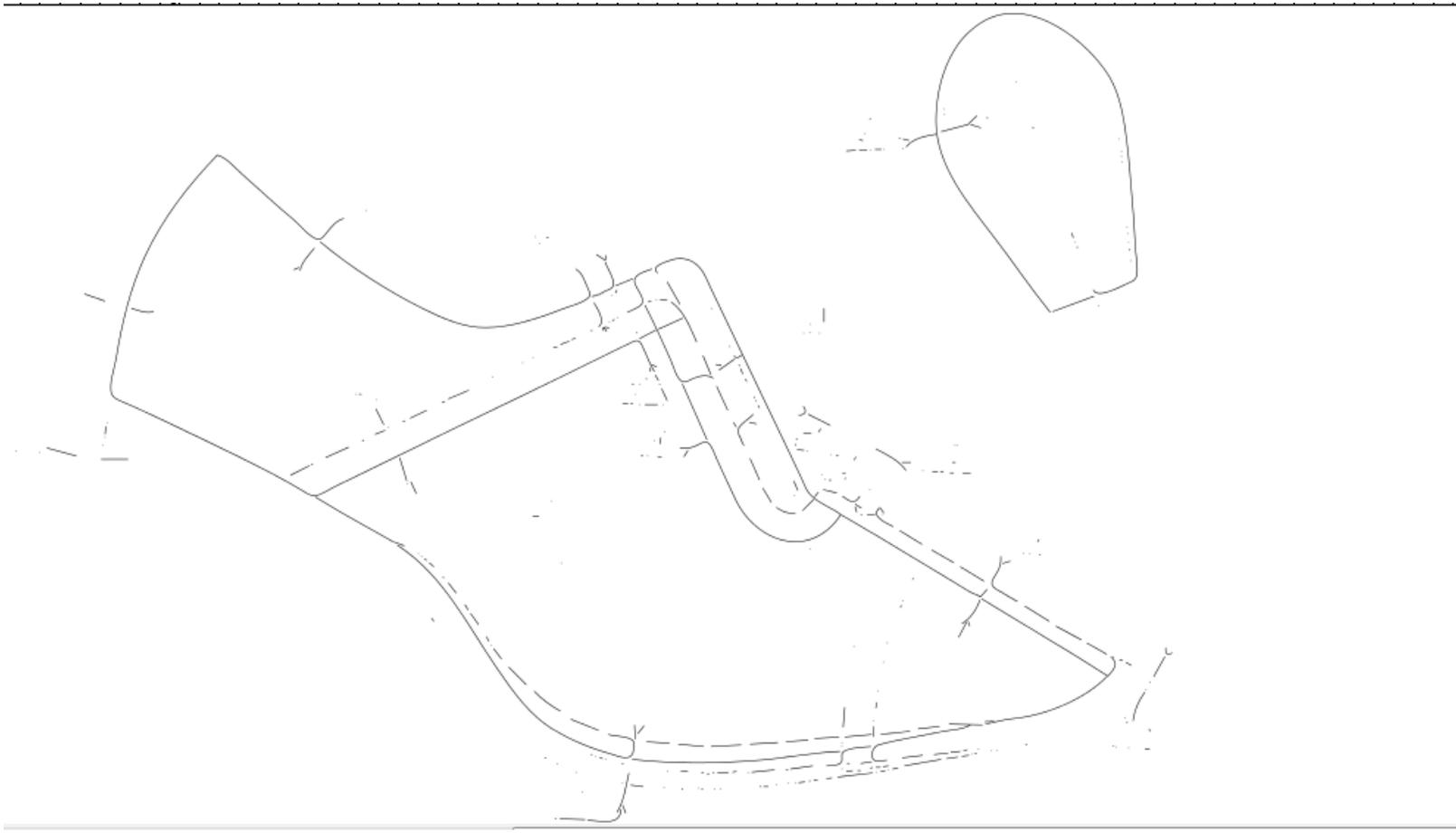


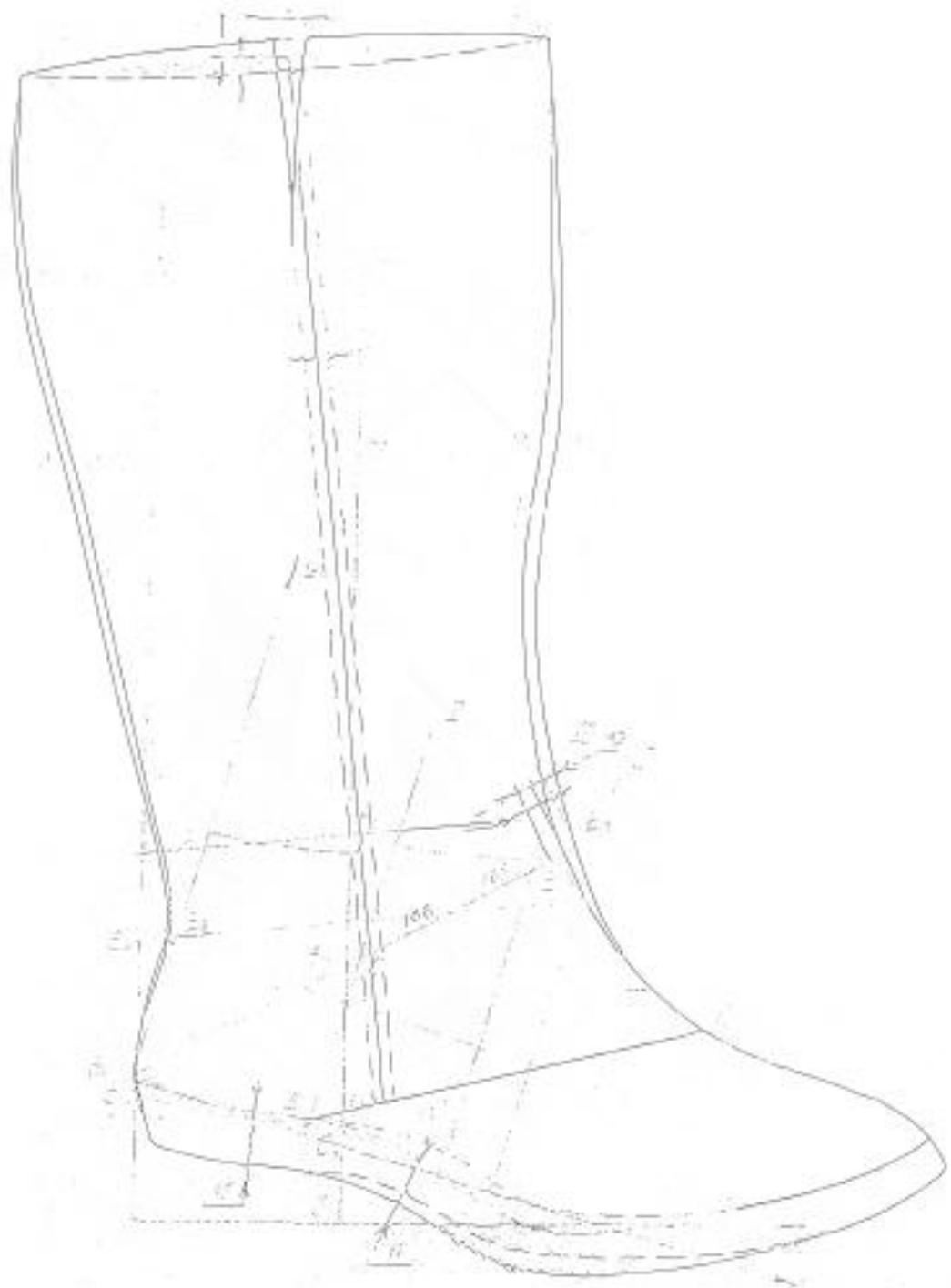
Приложение F

Топологический алгоритм









Приложение G

Акты о внедрении результатов диссертационного исследования

«УТВЕРЖДАЮ»
 проректор по учебной
 и методической работе МГУДТ



С.Г. Дембицкий

 2016 г.

АКТ

Внедрения в учебный процесс результатов
 диссертационной работы Муртазиной А.Р.

Мы, нижеподписавшиеся, Разин И.Б., Миронов В.П., Семенов А.А. составили настоящий акт о том, что результаты теоретических исследований, полученные в диссертации Муртазиной А.Р., содержатся в курсе лекций по дисциплине «Компьютерная обработка изображений», которые используется кафедрой информационных технологий в учебном процессе для подготовки бакалавров по направлению 09.03.02 (230400) Информационные системы и технологии.

Заведующий кафедрой
 Информационных технологий

И.Б. Разин

К.т.н., доцент кафедры
 информационных технологий

В.П. Миронов

К.т.н., доцент кафедры
 информационных технологий

А.А. Семенов

Аспирант кафедры
 ХМК и ТИК

А.Р. Муртазина

«УТВЕРЖДАЮ»

проректор по учебной
и методической работе МГУДТ

С.Г. Дембицкий

2016 г.



АКТ

внедрения в учебный процесс результатов
диссертационной работы Муртазиной А.Р.

Мы, нижеподписавшиеся, Костылева В.В., Разин И.Б., Миронов В.П., составили настоящий акт о том, что результаты теоретических исследований, полученные в диссертации Муртазиной А.Р., содержатся в учебном пособии «Электронные средства обучения для лиц с ограниченными возможностями по здоровью: практические примеры интерфейсов», которое используется кафедрами художественного моделирования, конструирования и технологий изделий из кожи и информационных технологий в учебном процессе для подготовки бакалавров по направлениям 29.03.01 (262000) Технология изделий легкой промышленности, 29.03.05 (262200) Конструирование изделий легкой промышленности, 09.03.02 (230400) Информационные системы и технологии.

Заведующий кафедрой
ХМК и ТИК, профессор



В.В. Костылева

Заведующий кафедрой
Информационных технологий



И.Б. Разин

К.т.н., доцент кафедры
информационных технологий



В.П. Миронов

Аспирант кафедры
ХМК и ТИК



А.Р. Муртазина

«УТВЕРЖДАЮ»

проректор по научной
работе МГУДТ
О.В. Кашеев

« _____ » 2016



«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
ЗАО МОФ «Парижская коммуна»
А.А. Никитин

« _____ » 2016



АКТ

Мы, нижеподписавшиеся представители МГУДТ и ЗАО МОФ «Парижская коммуна» составили настоящий акт о том, что результаты проведенных аспирантом Муртазиной А.Р. в рамках диссертационного исследования «Разработка системы проектирования конструкций верха обуви с использованием средств технического зрения» представляют интерес для Центра моделирования и технологии предприятия, так как позволяют усмотреть тенденции развития современного рынка в области программного обеспечения САПР легкой промышленности и производства обуви, в частности. Авторская программа содержит необходимый набор инструментов для интеллектуального распознавания чертежей конструкций верха обуви, поэтому расширяет спектр программных продуктов, используемых в отрасли. Предложенные МГУДТ решения могут составить основу перспективной политики предприятия в области совершенствования действующих на фабрике САПР.

Представители МГУДТ

Представители ЗАО МОФ
«Парижская коммуна»

Зав. кафедрой ХМК и ТИК

Костылева В.В. _____

Зав. кафедрой информационных
технологий Разин И. Б. _____

асп. Муртазина А.Р. _____

доц. кафедры информационных
технологий Миронов В.П. _____Зам. ген. Директора по
стратегическому и

корпоративному развитию

Куренков А.В. _____

Начальник Центра моделирования
и технологии

Вихрова Л.А. _____