

## ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 685.34.01

DOI 10.55421/3034-4689\_2026\_29\_4\_164

С. Ш. Керимова, И. Р. Татарчук, Е. В. Литвин,  
Н. В. Тихонова

### СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ МНОГОКОНТУРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ В СИСТЕМЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБУВИ

*Ключевые слова:* интеллектуальное проектирование обуви; многоконтурная оптимизация; генеративный синтез конструкции; предиктивный производственный анализ; компьютерное зрение; машинное обучение.

*В работе получена и экспериментально апробирована многоконтурной оптимизации в системе интеллектуального проектирования обуви. Методика основана на интеграции генеративных нейросетевых моделей, материаловедческой оптимизации и предиктивного производственного анализа в единую архитектуру конструкторско-технологической подготовки производства. Процесс формализован как задача многокритериальной оптимизации с интегральной функцией эффективности, учитывающей время проектирования, материалоемкость, уровень дефектности и точность воспроизведения формы готового изделия. Для оценки геометрической точности реализации цифровой модели в физическом изделии использован коэффициент объёмного сходства форм, рассчитываемый по результатам сопоставления САД-модели и 3D-скана готовой обуви. Экспериментальная апробация на парной выборке моделей показала статистически значимое улучшение показателей по сравнению с традиционным подходом: сокращение времени проектирования на 50%, снижение материальных отходов при раскрое на 25%, уменьшение уровня производственного брака на 50% и повышение точности формы изделия с 86,4% до 94,1%. Полученные результаты подтверждают эффективность интеграции технологий искусственного интеллекта в контур цифрового проектирования и демонстрируют возможность одновременной оптимизации временных, материальных и геометрических характеристик изделия без взаимного ухудшения показателей. Разработанная методика может быть интегрирована в существующие САД-системы и производственные линии предприятий массового сегмента.*

S. Sh. Kerimova, I. R. Tatarchuk, E. V. Litvin,  
N. V. Tikhonova

### STRUCTURAL MODEL OF MULTICONTOUR OPTIMIZATION IN THE INTELLIGENT FOOTWEAR DESIGN SYSTEM

*Keywords:* intelligent footwear design; multicontour optimization; generative structural synthesis; predictive production analysis; computer vision; machine learning.

*This study presents and experimentally validates a structural model of multicontour optimization in an intelligent footwear design system. The proposed methodology integrates generative neural network models, materials optimization, and predictive production analysis into a unified architecture of engineering and technological production preparation. The design process is formalized as a multicriteria optimization problem with an integral performance function that accounts for design time, material consumption, defect rate, and the accuracy of geometric reproduction of the finished product. To evaluate the geometric accuracy of transferring the digital model into the physical product, a volumetric shape similarity coefficient was employed, calculated through comparison of the CAD model and the 3D scan of the finished footwear. Experimental validation based on a paired sample of models demonstrated statistically significant improvements compared to the conventional approach: a 50% reduction in design time, a 25% decrease in material waste during cutting, a 50% reduction in production defects, and an increase in shape accuracy from 86.4% to 94.1%. The obtained results confirm the effectiveness of integrating artificial intelligence technologies into the digital design framework and demonstrate the possibility of simultaneous optimization of temporal, material, and geometric characteristics without mutual performance degradation. The proposed methodology can be integrated into existing CAD systems and production lines of mass-segment enterprises.*

#### Введение

Современная обувная промышленность развивается в условиях растущей глобальной конкуренции, ускорения инновационных циклов и необходимости гибкого реагирования на запросы потребителей. По данным Минпромторга Российской Федерации, объем внутреннего рынка обуви составляет порядка 300 млн. пар в год, при этом значительная часть продукции относится к массовому сегменту, характери-

зующемуся высокой трудоемкостью и низким уровнем цифровизации. В мировом масштабе ежегодный выпуск превышает 22 млрд. пар [1], что подтверждает масштаб и динамичное развитие отрасли.

Тем не менее, к числу наиболее существенных проблем обувных предприятий относятся высокая себестоимость продукции, обусловленная расходом материалов и их высокой стоимостью, длительными сроками проектирования новых моделей, а также высоким процентом производственного брака, осо-

бенно на предприятиях, с низким уровнем автоматизации. В то же время предприятия среднего и премиального сегмента продукции демонстрируют меньшую долю брака благодаря внедрению цифровых систем контроля процессов производства и готовой продукции, а также широкой автоматизацией всей цепочки процессов проектирования изделий, что указывает на прямую зависимость качества продукции от уровня технологичности производства и его цифровизации [2].

Использование систем автоматизированного проектирования (САПР / CAD) позволило сделать первый шаг в цифровой трансформации отрасли, однако традиционные CAD-решения в основном ориентированы на визуализацию и геометрическое моделирование. Они не обладают встроенными инструментами предиктивного анализа, автоматизированного подбора материалов и оптимизации производственных параметров. В связи с этим всё более актуальной становится интеграция технологий искусственного интеллекта (ИИ), включающих нейросетевые алгоритмы, машинное обучение, а также технологии компьютерного зрения [3].

Зарубежные авторы отмечают перспективность использования ИИ для генеративного дизайна, анализа свойств материалов и контроля качества продукции [4]. Применение нейросетевых моделей, включая генеративно-сопоставительные сети (GAN) и вариационные автоэнкодеры (VAE), позволяет создавать новые формы изделий и прогнозировать эксплуатационные характеристики на основе многомерных данных.

Так в работе [5] описано внедрение инструмента AI Archive, интегрированного в процесс разработки обуви марки Adidas, и показано, как генеративные алгоритмы расширяют возможности креативного проектирования. В работе [6] показан гибридный подход, при котором нейросетевая модель дополняет традиционные дизайнерские методы, приводя к улучшению качества дизайна и ускорению итераций. В обзоре [7] авторы рассматривают применение различных нейронных моделей в модной индустрии, что подкрепляет идею о потенциале ИИ и для обувного направления. А в работе [8] предложен метод генеративного проектирования спортивной обуви на основе многокритериальной модели (с 4 основными и 17 вторичными индикаторами).

Российские авторы также активно исследуют вопросы цифровизации лёгкой промышленности, однако их разработки в основном касаются автоматизации раскроя [9], трёхмерного моделирования [10] и внедрения отдельных модулей САПР [11-12]. При этом комплексных работ, объединяющих все стадии производственного цикла — от генерации конструкции до контроля качества, — практически нет. Кроме того, недостаточно исследованы вопросы интеграции ИИ в действующие производственные линии, а также отсутствует единая методика, адаптированная к отечественным предприятиям массового сегмента [13-14].

Таким образом, сохраняется существенный разрыв между возможностями современных ИИ-технологий и их реальным применением в обувной про-

мышленности России. Для преодоления этого разрыва требуется создание методики на основе системного подхода, которая позволит объединить цифровое проектирование, оптимизацию выбора материалов и интеллектуальный контроль качества в единую технологическую цепочку.

## Материалы и методы исследования

Исследование направлено на проверку гипотезы о том, что интеграция технологий искусственного интеллекта в контур конструкторско-технологической подготовки производства обуви обеспечивает статистически значимое повышение эффективности производственного цикла за счёт одновременного сокращения времени проектирования (Т), снижения материалоёмкости (М), уменьшения уровня дефектности (D) и повышения точности воспроизведения формы готового изделия (Е), оцениваемой по коэффициенту объёмного сходства форм между САД-моделью и 3D-сканом готовой обуви после формования и снятия с колодки.

Объектом исследования являлись процессы проектирования и изготовления обувных изделий массового сегмента. Предмет исследования: методы интеграции генеративных нейросетевых моделей, алгоритмов машинного обучения и технологий компьютерного зрения в архитектуру цифрового проектирования обуви.

Методологической основой работы послужил системный подход, предполагающий формирование многоконтурной модели взаимодействия конструктивных параметров, свойств материалов и производственных ограничений. В рамках данной модели проектирование рассматривалось как задача многокритериальной оптимизации с интегральной функцией эффективности:  $F = f(T, M, D, E)$ .

Для формирования обучающей и тестовой выборки использовались корпоративные базы данных российских обувных предприятий, включающие: параметры конструктивных решений (геометрия колодок, конфигурация деталей верха и низа обуви), технологические карты производства, сведения о применяемых материалах (физико-механические и гигиенические характеристики), статистику производственных дефектов и эксплуатационных отказов.

Общий объём выборки составил более 15 000 структурированных записей, охватывающих повседневную, детскую и специализированную обувь. Данные были анонимизированы и приведены к единому параметрическому формату. Для исключения смещения использовалось разделение на обучающую и тестовую подвыборки.

Каждая запись базы данных представляла собой структурированный параметрический вектор, включающий: геометрические параметры конструкции (длина колодки, высота подъёма, конфигурация деталей), материаловедческие характеристики (плотность, модуль упругости, коэффициент трения, гигроскопичность), технологические параметры (тип сборки, режимы формования, параметры раскроя), а также выходные показатели (уровень дефектности,

износостойкость, эксплуатационные характеристики). Данные хранились в табличном формате с унифицированной системой признаков, что обеспечивало возможность их использования в задачах машинного обучения и генеративного моделирования.

Функционирование разработанной системы интеллектуального проектирования обуви целесообразно рассматривать в рамках двух взаимосвязанных, но методически различающихся этапов: этапа обучения моделей и этапа эксплуатации системы при проектировании изделий.

На этапе обучения выполнялось формирование и подготовка базы данных, включающей параметризованные описания обувных конструкций, сведения о материалах, технологических картах, статистике дефектов и результатах эксплуатации изделий. После предварительной очистки, нормализации и унификации данных осуществлялось разделение выборки на обучающую и тестовую подвыборки.

В данном режиме решались следующие задачи:

- обучение генеративных нейросетевых моделей на параметризованных представлениях геометрии обувных конструкций;
- обучение рекомендательных алгоритмов для выбора материалов;
- обучение предиктивных моделей оценки дефектности и износостойкости;
- настройка модулей компьютерного зрения для распознавания дефектов поверхности материалов и геометрических отклонений деталей.

Таким образом, этап обучения обеспечивал формирование математических зависимостей между конструктивными параметрами, свойствами материалов и производственными результатами, используемых далее в рабочем режиме системы.

На этапе эксплуатации обученные модели использовались в составе единой многоконтурной архитектуры проектирования. Входом системы являлось параметризованное техническое задание, включающее тип обуви, размерный диапазон, конструктивные ограничения, требования к материалам и производственные условия.

В рабочем режиме система последовательно выполняла:

- генеративный синтез конструктивного решения;
- подбор материалов с учётом физико-механических и эксплуатационных требований;
- моделирование производственных параметров, включая раскрой и прогноз дефектности;
- оценку интегральной функции эффективности  $F = f(T, M, D, E)$ ;
- итерационную корректировку параметров до достижения оптимального решения.

Такое разделение позволяет более чётко определить роль искусственного интеллекта в предлагаемой методике: на этапе обучения происходит формирование моделей и зависимостей, а на этапе эксплуатации — их практическое применение в задачах цифрового проектирования и подготовки производства обуви.

В качестве генеративного модуля применялась полимодальная платформа искусственного интеллекта Gemini (Google DeepMind, 2023), интегриро-

ванная с параметрической САД-средой. Система использовалась не как автономный проектировщик, а как инструмент генеративного синтеза в рамках формализованного алгоритма.

Архитектура обработки включала три функциональных уровня: семантический, генеративный и оптимизационный. При этом, семантический уровень представляет собой преобразование параметризованного технического задания в набор формализованных признаков (тип обуви, диапазон размеров, требования к нагрузке, ограничения по материалам). Генеративный уровень подразумевает синтез параметрической 3D-модели конструкции на основе нейросетевых архитектур GAN и VAE с учётом антропометрических и технологических ограничений. На оптимизационном уровне происходит сопоставление с базой эталонных конструкций и корректировка геометрии с учётом: свойств выбранных материалов, производственных допусков, результатов предиктивного анализа дефектности.

Генеративные нейросетевые архитектуры GAN и VAE применялись для ускоренного синтеза геометрии: колодок, подошвенных блоков, деталей верха обуви.

Модели обучались на параметризованных представлениях конструкций. Обучение проводилось с использованием стандартных архитектур генеративных сетей с многослойными полносвязными и сверточными блоками. В качестве функций потерь использовались комбинации реконструкционной ошибки и регуляризирующих членов, обеспечивающих устойчивость генерации и согласованность параметрического пространства. Особое внимание уделялось обеспечению точности воспроизведения проектной геометрии, которая в дальнейшем оценивалась путём сопоставления САД-модели и 3D-скана готового изделия после формования и снятия с колодки.

Выбор материалов осуществлялся с использованием рекомендательных алгоритмов, обученных на базе данных, включающей: плотность, модуль упругости, показатели износостойкости, гигиенические характеристики.

Для прогнозирования долговечности применялись модели регрессионного машинного обучения, позволяющие оценить сопротивление износу элементов подошвы и верха обуви в зависимости от эксплуатационных условий.

Материаловедческий модуль был связан с генеративным контуром [15] через механизм обратной параметрической коррекции геометрии, что обеспечивало согласование формы изделия с физическими свойствами выбранных материалов.

На этапе производственной оптимизации исследование базировалось на формировании цифровых двойников технологических процессов изготовления обуви. Цифровой двойник представлял собой параметрическую модель производственного цикла, включающую операции раскроя, сборки и контроля качества, с возможностью варьирования конструктивных и технологических параметров.

Такой подход позволил оценивать влияние изменений геометрии изделия, свойств материалов и про-

изводственных ограничений на интегральные показатели эффективности до запуска модели в физическое производство.

Для моделирования раскроя применялись алгоритмы комбинаторной оптимизации размещения деталей на цифровых картах натуральных кож. В качестве целевой функции использовалась минимизация коэффициента отходов при соблюдении технологических допусков и направленности волокон материала.

Алгоритм обеспечивал формирование нескольких альтернативных схем размещения с последующим выбором варианта, обеспечивающего минимальное значение показателя материалоемкости (М).

Контроль качества реализовывался посредством алгоритмов компьютерного зрения, интегрированных в цифровой производственный контур.

Система обеспечивала: выявление дефектов поверхности материалов; обнаружение геометрических отклонений деталей; прогноз вероятности технологических дефектов сборки на основе анализа конструктивных и материаловедческих параметров. Для анализа изображений использовались сверточные нейронные сети, обученные на размеченных выборках дефектов, с задачами классификации и сегментации областей повреждений.

Полученные данные передавались в оптимизационный контур, формируя обратную связь для корректировки конструкции и технологических параметров.

Логическая структура разработанной методики представлена на рисунке 1 и реализует четырехконтурную модель интеллектуального проектирования обуви.

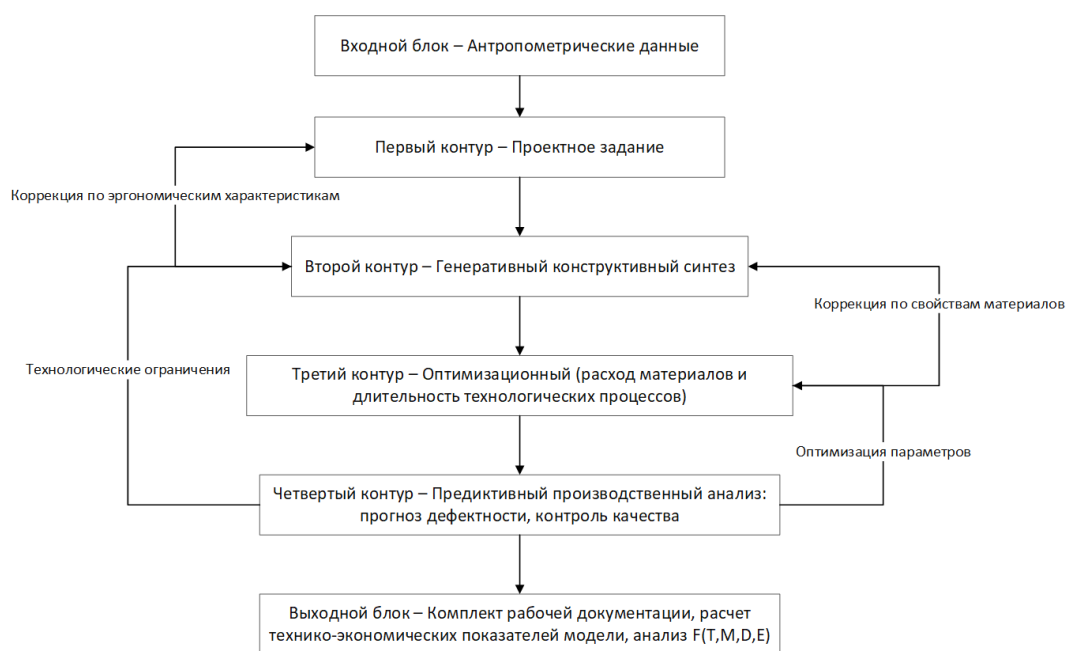


Рис. 1 – Структурная модель многоконтурной оптимизации в системе интеллектуального проектирования обуви

Fig. 1 – Structural model of multicontour optimization in the system of intelligent footwear design

Архитектура разработанной системы интеллектуального проектирования обуви представлена на рис. 2. В отличие от структурной модели многоконтурной оптимизации (рис. 1), данная схема отражает функциональную организацию системы, состав её основных модулей, потоки данных между ними и механизм итерационной обратной связи, включая генеративный синтез, материаловедческую оптимизацию, предиктивный анализ и контроль качества. Представленная архитектура демонстрирует замкнутый цикл обработки данных с обратной связью, обеспечивающий итерационную оптимизацию проектных решений.

В отличие от линейного алгоритма «запрос – генерация – проверка», предложенный подход основан на многопараметрической итерационной оптимизации, включающей: формирование параметризованного технического задания (Контур I); генеративный синтез конструкции с учётом антропометрических и

технологических ограничений (Контур II); материаловедческую и технологическую оптимизацию (Контур III); предиктивный производственный анализ с расчётом интегральной функции эффективности  $F(T, M, D, E)$  (Контур IV).

На каждом этапе осуществляется двусторонняя обратная связь между контурами, что позволяет корректировать геометрию изделия, выбор материалов и технологические параметры до достижения оптимального значения интегрального показателя.

Функционирование разработанной системы в режиме проектирования реализуется как последовательность взаимосвязанных этапов многоконтурной оптимизации, обеспечивающих переход от параметризованного технического задания к оптимизированному конструктивно-технологическому решению. Рассмотрим пример алгоритма многоконтурной оптимизации в системе интеллектуального проектирования обуви.

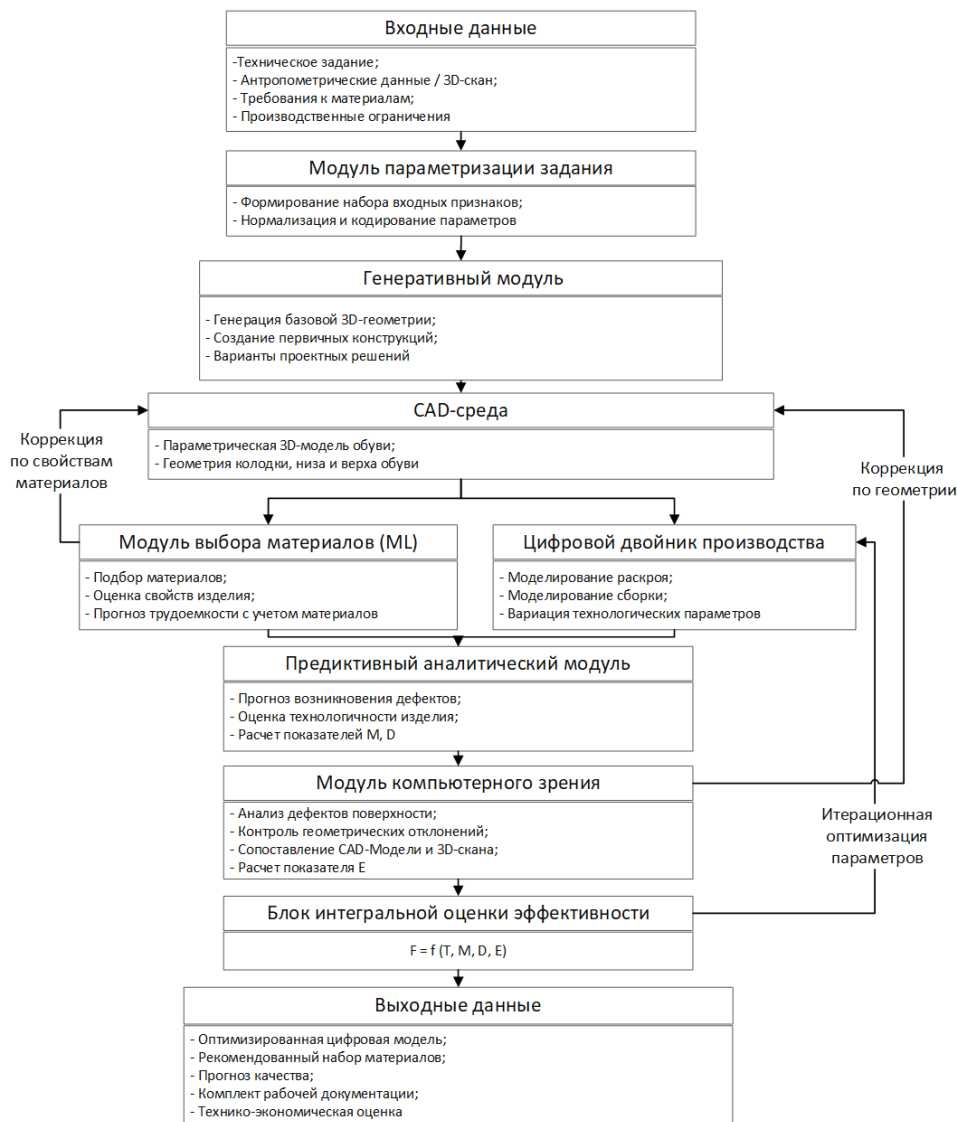


Рис. 2 – Функциональная архитектура системы интеллектуального проектирования обуви

Fig. 2 – Functional architecture of the intelligent footwear design system

Входные данные: тип обуви; размерный диапазон; антропометрические параметры; требования к конструкции; ограничения по материалам; технологические ограничения производства.

Выходные данные: оптимизированная цифровая модель обуви; рекомендованный набор материалов; параметры раскроя; прогноз дефектности; значение интегральной функции эффективности  $F=f(T, M, D, E)$ .

Шаг 1 - Формирование параметризованного технического задания. На основе исходных требований к изделию формируется структурированный набор входных параметров, включающий геометрические, материаловедческие и технологические ограничения.

Шаг 2 - Генеративный синтез конструкции. Генеративный модуль формирует базовую параметрическую 3D-модель обуви, включающую геометрию колодки, подошвы и деталей верха, с учетом заданных ограничений.

Шаг 3 - Первичная проверка конструктивного соответствия. Проводится анализ полученной модели на соответствие исходным геометрическим и функ-

циональным требованиям. При выявлении недопустимых отклонений параметры генерации корректируются, после чего шаг 2 повторяется.

Шаг 4 - Подбор материалов. Рекомендательный модуль подбирает материалы на основе требований к износостойкости, жесткости, гигиеническим характеристикам и стоимости. Одновременно оценивается их влияние на конструктивную форму изделия.

Шаг 5 - Параметрическая коррекция геометрии. При необходимости геометрия конструкции уточняется с учетом физико-механических свойств выбранных материалов и производственных ограничений.

Шаг 6 - Моделирование производственного цикла. На основе цифрового двойника выполняется имитация этапов раскроя, сборки и контроля качества. Рассчитываются показатели материалоемкости  $M$ , прогнозируемого уровня дефектности  $D$  и технологической реализуемости конструкции.

Шаг 7 - Контроль геометрической точности. Оценивается показатель точности воспроизведения формы  $E$ , характеризующий степень соответствия цифровой модели и ожидаемой геометрии готового изделия после формования и снятия с колодки.

Шаг 8 - Расчёт интегральной функции эффективности. На основании рассчитанных показателей T, M, D и E определяется значение интегральной функции:  $F=f(T, M, D, E)$ , что позволяет количественно оценить качество проектного решения.

Шаг 9 - Принятие решения об оптимальности. Если полученное решение удовлетворяет установленным критериям, проект считается завершённым. В противном случае система инициирует итерационную корректировку конструктивных, материаловедческих или технологических параметров с возвратом на соответствующий этап.

Шаг 10 - Формирование выходного решения. Система формирует итоговую цифровую модель изделия, рекомендуемый набор материалов, параметры технологической подготовки производства и прогнозные показатели эффективности.

Таким образом, работа системы организована по принципу замкнутого итерационного цикла, в котором генеративный синтез конструкции, материаловедческий выбор и производственный анализ не являются изолированными операциями, а функционируют как взаимосвязанные контуры многокритериальной оптимизации, интегрированные в архитектуру цифрового проектирования и подготовки производства обуви.

Экспериментальная часть исследования направлена на количественную оценку эффективности разработанной методики интеллектуального проектирования обуви в сравнении с традиционным подходом, основанным на использовании классической САПР и ручных корректировок конструктивных параметров.

В исследование были включены 10 моделей женской и детской обуви массового сегмента, разработанные в сопоставимых производственных условиях. Для обеспечения корректности сравнения каждая модель проектировалась двумя способами: по традиционной схеме (базовая САПР + ручная параметрическая корректировка); по предложенной четырёхконтурной методике с применением генеративного синтеза, материаловедческой оптимизации и предиктивного анализа.

Таким образом, эксперимент имел характер парного сравнительного исследования, что позволило минимизировать влияние внешних факторов.

Сравнительный анализ проводился по установленным ранее количественным критериям: T; M, D, E. Измерения выполнялись в одинаковых производственных условиях с использованием единых технологических регламентов.

Статистическая обработка данных (t-критерий Стьюдента для связанных выборок) показала, что различия по всем четырём показателям являются статистически значимыми ( $p < 0,05$ ), что подтверждает достоверность выявленного эффекта.

Дополнительно проводился корреляционный анализ между изменениями показателей T, M, D и E с целью выявления взаимосвязи между сокращением времени проектирования и уровнем производственной дефектности.

Применение парного статистического анализа позволило исключить влияние вариативности моде-

лей и подтвердить, что выявленные различия обусловлены именно использованием разработанной методики интеллектуального проектирования.

## Обсуждение результатов

Внедрение искусственного интеллекта в процессы проектирования обуви позволяет не только сократить сроки разработки, но и повысить качество готовой продукции. Приведенные ниже результаты подтверждают перспективность предлагаемого подхода и раскрывают направления дальнейшего развития интеллектуальных систем в обувной промышленности (таб.1). Выполненное сравнительное исследование позволило количественно оценить влияние предложенной методики интеллектуального проектирования на ключевые параметры конструкторско-технологического цикла.

**Таблица 1 - Сравнительный анализ показателей классического и цифрового процессов производства обуви**

**Table 1 - Comparative analysis of indicators for classical and digital shoe manufacturing processes**

| Показатель                              | Классический метод | Цифровой метод | Прирост / снижение (%) |
|---|--------------------|----------------|------------------------|
| Время разработки модели, дней           | 14                 | 7              | -50                    |
| Отходы при раскрое (материалы), %       | 12                 | 9              | -25                    |
| Процент брака, %                        | 8                  | 4              | -50                    |
| Точность воспроизведения формы (IoU), % | 86,4               | 94,1           | +8,9                   |

Статистическая обработка данных (t-критерий Стьюдента для связанных выборок) показала, что различия по всем четырём показателям являются статистически значимыми ( $p < 0,05$ ), что подтверждает достоверность выявленного эффекта.

Сокращение времени проектирования на 50% обусловлено снижением числа итераций при построении конструкции и подборе параметров. Генеративный модуль обеспечивает автоматизированный синтез базовой геометрии колодки и деталей верха с учетом заданных ограничений, что уменьшает объем ручных корректировок. Фактически методика переводит процесс из режима последовательного перебора решений в режим управляемой параметрической оптимизации.

Снижение отходов материалов на 25% связано с применением алгоритмов оптимизационного размещения деталей на цифровых картах натуральных

кож. В отличие от традиционного раскроя, где оптимизация выполняется оператором вручную, предложенная система формирует несколько вариантов размещения и выбирает решение с минимальной материалоемкостью при сохранении технологических допусков.

Сокращение уровня производственного брака на 50% объясняется интеграцией предиктивного анализа и компьютерного зрения. Выявление потенциальных несоответствий конструкции физико-механическим свойствам материалов происходит еще на стадии цифрового моделирования, что снижает вероятность дефектов сборки. Дополнительно алгоритмы компьютерного зрения позволяют фиксировать отклонения геометрии деталей и дефекты поверхности на ранних этапах производственного цикла.

Для оценки геометрической точности воспроизведения цифровой модели в готовом изделии выполнялось сопоставление: внутреннего объема CAD-модели обуви; внутреннего объема готового изделия после формования и снятия с колодки, полученного методом 3D-сканирования. Перед сравнением выполнялись: пространственная регистрация моделей методом ICP (Iterative Closest Point) [16]; приведение сеток к единой системе координат; триангуляция и вокселизация объемов с одинаковым разрешением.

Объемное сходство форм рассчитывалось по критерию IoU (Intersection over Union) [16], рассчитываемому по формуле (1):

$$IoU = \frac{V(CAD \cap Scan)}{V(CAD \cup Scan)} \quad (1)$$

где  $V(CAD \cap Scan)$  – объем пересечения двух моделей,  $V(CAD \cup Scan)$  – объем их объединения.

Результат выражался в процентах, значение 100% соответствует полному совпадению геометрии.

В результате пространственного сопоставления CAD-моделей и 3D-сканов готовой обуви установлено увеличение точности по коэффициенту объемного сходства (IoU) с 86,4% при традиционном проектировании до 94,1% при использовании разработанной методики. Таким образом, прирост точности воспроизведения проектной геометрии составил 8,9 процентного пункта.

Полученные данные свидетельствуют о повышении стабильности формы изделия после производственного цикла и более точном воспроизведении проектной геометрии. Снижение отклонений отражает согласованность конструктивных параметров, свойств применяемых материалов и технологических режимов формования.

Таким образом, разработанная методика обеспечивает не только сокращение временных и материальных затрат, но и повышение точности реализации цифровой модели в физическом изделии, что подтверждает её производственно-технологическую эффективность.

Системная значимость полученных результатов заключается в одновременном улучшении трех независимых показателей: времени, материалоемкости и дефектности. В классической производственной

практике снижение одного параметра часто сопровождается ухудшением другого. В данном случае наблюдается согласованная оптимизация, что подтверждает корректность выбранной интеграционной модели.

Интеграция результатов работы системы Gemini в отечественную систему конструкторской подготовки АСКО-2D рассматривается как инструмент практической реализации разработанной методики. Добавление модуля генеративного проектирования позволяет расширить функционал существующего программного обеспечения без кардинальной перестройки производственной инфраструктуры, что снижает барьер внедрения.

Экономическая оценка выполнена исходя из сокращения трудоемкости подготовки одной модели на 15%. При средней трудоемкости проектирования 40–45 человеко-часов на модель экономия составляет 6–7 человеко-часов. Для сезонной коллекции из 200 моделей суммарное сокращение трудозатрат достигает 1200–1400 человеко-часов, что при средней расчетной ставке соответствует экономическому эффекту порядка 280–320 тыс. рублей. Таким образом, полученные технологические преимущества имеют прямое экономическое подтверждение.

В отличие от существующих исследований, где ИИ применяется изолированно, либо на этапе генеративного дизайна, либо в системе контроля качества, предложенная методика объединяет генеративный синтез, рекомендательный подбор материалов и предиктивный контроль в единую оптимизационную схему. Это позволяет рассматривать разработку не как отдельный цифровой инструмент, а как интегрированный производственный контур.

Полученные данные подтверждают выдвинутую гипотезу о целесообразности интеграции ИИ в конструкторско-технологическую подготовку производства обуви. Дальнейшие исследования целесообразно направить на расширение выборки моделей, верификацию методики на предприятиях различного уровня автоматизации, а также разработку гибридных архитектур, обеспечивающих адаптивную настройку параметров проектирования в зависимости от типа обуви и условий эксплуатации.

## Заключение

В работе представлена и экспериментально апробирована четырёхконтурная методика интеллектуального проектирования обуви, основанная на интеграции генеративных нейросетевых моделей, материаловедческой оптимизации и предиктивного производственного анализа в единую систему многокритериальной оптимизации.

В отличие от существующих решений, ориентированных преимущественно на отдельные этапы генеративного дизайна или автоматизированного контроля качества, предложенный подход объединяет конструктивный синтез, подбор материалов, оптимизацию раскроя и прогноз дефектности в рамках интегральной функции эффективности ( $F(T, M, D, E)$ ).

Экспериментальная апробация на парной выборке моделей показала статистически значимое

улучшение ключевых производственных показателей: сокращение времени проектирования на 50%; снижение материальных отходов при раскрое на 25%; уменьшение уровня производственного брака на 50%; повышение точности формы готовой обуви на 8,9 процентного пункта.

Полученные результаты подтверждают корректность выдвинутой гипотезы и демонстрируют возможность одновременной оптимизации временных, материальных и качественных характеристик без взаимного ухудшения показателей.

Научная новизна исследования заключается в разработке структурной модели многоконтурной оптимизации в системе интеллектуального проектирования обуви; формализации проектного процесса через интегральную функцию эффективности, учитывающую время проектирования, материалоемкость, уровень дефектности и точность воспроизведения формы изделия; экспериментальном подтверждении системного эффекта внедрения ИИ в условиях отечественного производства.

Практическая значимость работы определяется возможностью интеграции разработанной методики в существующие САД-системы и производственные линии без радикальной перестройки инфраструктуры, что снижает барьер внедрения цифровых технологий на предприятиях массового сегмента.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением объема экспериментальных данных, разработкой гибридных нейросетевых архитектур для адаптивного проектирования различных типов обуви, а также созданием цифровых двойников полного жизненного цикла изделия, включая этапы эксплуатации и вторичной переработки материалов.

Таким образом, полученные результаты формируют основу для перехода от фрагментарного использования инструментов искусственного интеллекта к созданию интегрированной интеллектуальной экосистемы проектирования и производства обуви.

## Литература

- Rodrigues I. *Lumen et virtus*, 15. **41**, 116-121 (2024). DOI: 10.56238/levv15n41-116.
- Yüksel B., Çavdar E. *PressAcademia Procedia (PAP)*, **15**, 138-139 (2022). DOI: 10.17261/Pressacademia. 2022.1597.
- Klarák, J., Kuric, I., Zajačko, I., Bulej, V., Tlach, V., Józwiak, J. *Sensors*, 21. **22**, 7531 (2021). DOI: 10.3390/s2122753.1.
- SenGupta K. *Emerging Trends in Leather Science and Technology*. Springer Nature, Singapore, 2024, P. 251-273.
- Suessmuth J., Fick F., Van Der Vossen S. *ACM SIGGRAPH 2023 Talks* (Los Angeles, August 6-10). ACM Press, NY, 2024. P. 11-12. DOI: 10.1145/3587421.3595416.
- Minaoglou, P., Tzotzis, A., Efkolidis, N., Kyratsis, P. *Engineering Proceedings*, 72. **1**, 7 (2024). DOI: 10.3390/engproc2024072007.
- Giri, C., Jain, S., Zeng, X., & Bruniaux, P. *IEEE Access*, **7**, 95376-95396 (2019). DOI: 10.1109/ACCESS. 2019.2928979.
- Han X., Sururi L., Luming Y. *Journal of the American Leather Chemists Association*, 120. **7**, 332-344 (2025). DOI: 10.34314/wx9xeq36.

- Rumyantsev, E.V., Rumyantseva, V.E., Konovalova, V.S., Mi-roshnichenko, D.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*, **5** (413), 5-13 (2024). DOI: 10.47367/0021-3497\_2024\_5\_5.
- Kopylova I.L., Kiselev S.Yu., Volkova G.Yu. *Tekhnologii, dizajn, nauka, obrazovanie v kontekste inkluzii* (Москва, 17-19 апреля). РГУ им. А.Н. Косыгина, Москва, 2018. С. 77-80.
- Суровцева О.А. Современные тенденции развития науки и технологий (Белгород, 31 октября). Ткачева, Белгород, 2015. Часть III. С. 120-122.
- Суровцева О.А., Тернавская Т.В. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severokavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki*, **1** (176), 135-138 (2014).
- Голубева О.А., Димитров В.П., Швецов К.А., Доний А.С. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, **10**, 103-107 (2024). DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-103-104.
- Karasev D.D., Razin I.B., Karaseva A.I. Kostyleva V.V. *Industrial processes and technologies*, 4. **2** (12), 32-40 (2024). DOI: 10.37816/2713-0789-2024-4-2(12)-32-40.
- Beshley M., Hordiichuk-Bublivska O., Beshley H., Ivanochko I. *Electronics*, 12. **1**, 33 (2022). DOI: 10.3390/electronics12010033.
- Xu J., Zhou Z., Wang Z. *Sensors*, 19. **21**, 4708 (2019). DOI: 10.3390/s19214708.

## References

- Rodrigues I. *Lumen et virtus*, 15. **41**, 116-121 (2024). DOI: 10.56238/levv15n41-116.
- Yüksel B., Çavdar E. *PressAcademia Procedia (PAP)*, **15**, 138-139 (2022). DOI: 10.17261/Pressacademia. 2022.1597.
- Klarák, J., Kuric, I., Zajačko, I., Bulej, V., Tlach, V., Józwiak, J. *Sensors*, 21. **22**, 7531 (2021). DOI: 10.3390/s2122753.1.
- SenGupta K. *Emerging Trends in Leather Science and Technology*. Springer Nature, Singapore, 2024, P. 251-273.
- Suessmuth J., Fick F., Van Der Vossen S. *ACM SIGGRAPH 2023 Talks* (Los Angeles, August 6-10). ACM Press, NY, 2024. P. 11-12. DOI: 10.1145/3587421.3595416.
- Minaoglou, P., Tzotzis, A., Efkolidis, N., Kyratsis, P. *Engineering Proceedings*, 72. **1**, 7 (2024). DOI: 10.3390/engproc2024072007.
- Giri, C., Jain, S., Zeng, X., & Bruniaux, P. *IEEE Access*, **7**, 95376-95396 (2019). DOI: 10.1109/ACCESS. 2019.2928979.
- Han X., Sururi L., Luming Y. *Journal of the American Leather Chemists Association*, 120. **7**, 332-344 (2025). DOI: 10.34314/wx9xeq36.
- Rumyantsev, E.V., Rumyantseva, V.E., Konovalova, V.S., Mi-roshnichenko, D.A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnologiya tekstil'noy promyshlennosti*, **5** (413), 5-13 (2024). DOI: 10.47367/0021-3497\_2024\_5\_5.
- Kopylova I.L., Kiselev S.Yu., Volkova G.Yu. *Tekhnologii, dizajn, nauka, obrazovanie v kontekste inkluzii* (Moscow, April 17-19). A.N. Kosygin Russian State University, Moscow, 2018. P. 77-80.
- Surovtseva O.A. *Sovremennye tendencii razvitiya nauki i tekhnologii* (Belgorod, October 31). Tkacheva, Belgorod, 2015. Part III. P. 120-122.
- Surovtseva O.A., Ternavskaya T.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severokavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki*, **1** (176), 135-138 (2014).
- Golubeva O.A., Dimitrov V.P., Shvetsov K.A., Doniy A.S. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, **10**, 103-107 (2024). DOI: 10.24412/2071-6168-2024-10-103-104.
- Karasev D.D., Razin I.B., Karaseva A.I. Kostyleva V.V. *Industrial processes and technologies*, 4. **2** (12), 32-40 (2024). DOI: 10.37816/2713-0789-2024-4-2(12)-32-40.

15. Beshley M., Hordiichuk-Bublivska O., Beshley H., Ivanochko I. *Electronics*, 12. **1**, 33 (2022). DOI: 10.3390/electronics12010033.

16. Xu J., Zhou Z., Wang Z. *Sensors*, 19. **21**, 4708 (2019). DOI: 10.3390/s19214708.

---

© **С. Ш. Керимова** – Инженер конструктор, специалист в области искусственного интеллекта, музыкальный продюсер ceo clan54 (при поддержке MTS Music), ex co-founder/gen.prod. RockFam/Rocket Records, ex PR Dir. ZHARA Music & ZHARA FM, Москва, Россия; **И. Р. Татарчук** – доктор технических наук, доцент, академик Российской инженерной академии, лауреат премии правительства России в области науки и техники, заместитель генерального директора по управлению производственным комплексом ЗАО МОФ "Парижская коммуна", Москва, Россия, I\_Tatarchuk@parcom.ru. ORCID: 0000-0002-1959-7367; **Е. В. Литвин** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Художественного моделирования, конструирования и технологии изделий из кожи, Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия, litvin-ev@rguk.ru. ORCID: 0000-0002-8383-8284; **Н. В. Тихонова** – доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой «Конструирование одежды и обуви», Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия, TikhonovaNV@corp.knrtu.ru. ORCID: 0000-0002-2241-869X.

© **S. Sh. Kerimova** – Engineer designer, specialist in the field of artificial intelligence, music producer ceo clan54 (supported by MTS Music), ex co-founder/gen.prod. RockFam/Rocket Records, ex PR Dir. ZHARA Music & ZHARA FM, Mscow, Russia; **I. R. Tatarchuk** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Associate Professor, Academician of the Russian Academy of Engineering, Winner of the Russian Government Prize in Science and Technology, Deputy General Director for Production Complex Management at ZAO MOF "Parizhskaya Kommuna", Moscow, Russia, I\_Tatarchuk@parcom.ru. ORCID: 0000-0002-1959-7367; **E. V. Litvin** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, Docent of the Department of Modeling, Design and Technology of Leather Goods, Kosygin State University of Russia (Technology. Design. Art), Moscow, Russia, litvin-ev@rguk.ru. ORCID: 0000-0002-8383-8284; **N. V. Tikhonova** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Associate Professor, Head of the Department of Clothing and Footwear Design, Kazan National Research Technical University, Kazan, Russia, TikhonovaNV@corp.knrtu.ru. ORCID: 0000-0002-2241-869X.

Дата поступления рукописи в редакцию – 14.02.26.

Дата принятия рукописи в печать – 13.03.26.