

На правах рукописи

陈成豫

Чэнь Чэньюй

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ЖЕНСКИХ ПЛАТЬЕВ
СКЛАДЧАТОЙ ФОРМЫ**

Научная специальность 2.6.16. Технология производства изделий текстильной
и легкой промышленности

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Иваново 2026

Работа выполнена на кафедре конструирования швейных изделий Института текстильной индустрии и моды ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет».

**Научный
руководитель**

Кузьмичев Виктор Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования швейных изделий ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»

**Официальные
оппоненты**

Черунова Ирина Викторовна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Конструирование, технологии и дизайн» Института сферы обслуживания и предпринимательства (филиала) ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» в г. Шахты

Тихонова Наталья Васильевна, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Конструирование одежды и обуви» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Ведущая организация

ФГБОУ ВО
"Владивостокский государственный университет "

Защита состоится 24 сентября 2026 в 10-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.300.02 на базе ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: 153000, г. Иваново, Шереметевский пр., д. 21, ауд. ГШ109.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»: <https://ds.ivgpu.com/dissertations>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.300.02



Е.Н. Никифорова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современная швейная промышленность сталкивается с растущими требованиями к производству новых моделей одежды. В условиях ускорения развития концепции Индустрии 4.0 ключевой задачей становится создание интеллектуальных систем для цифрового прогнозирования результатов художественно-конструкторского проектирования изделий легкой промышленности (ИТЛП).

Создание цифровых двойников (ЦД) женских платьев складчатой формы является серьезной научной проблемой, решение которой зависит от точности математического и геометрического моделирования, основанного на комплексе единичных показателей физико-механических свойств ткани: драпируемости, жесткости при изгибе, анизотропии растяжимости и других. Для их измерения используют специальные измерительные комплексы (т.н. kit в программах Clo3D и Style3D) и единичные приборы и методы (метод Сьюзика, консольный метод ASTM D1388 и др.). Драпируемость ткани является определяющим фактором формообразования женской одежды. Традиционные методы оценки драпируемости имеют существенные ограничения: не учитывают трехмерный характер драпирования одежды на фигуре человека в присутствии ниточных швов.

Существующие методы, обеспечивая достаточную адекватность ЦД, являются трудоемкими, требуют специального измерительного оборудования и, что самое важное, не интегрированы в сквозные цифровые процессы проектирования одежды со сложными складчатыми формами. Такие формы получают путем выполнения приемов конструктивного моделирования чертежей конструкций с учетом показателей свойств текстильных материалов. Это создает разрыв между материальными прототипами одежды и их ЦД. Современные САПР одежды (CLO3D, Style3D и др.) позволяют симулировать поведение ткани, однако для этого необходим набор параметров, измеренных на плоских пробах, форма которых очень далека от деформируемых участков складчатой формы одежды.

Развитие технологий искусственного интеллекта (ИИ) открывает новые возможности использования их потенциалов в качестве измерительных инструментов, способных "считывать" механические свойства тканей непосредственно из их визуальных образов. Однако отсутствие стандартизированных протоколов такого "считывания" и метрологической базы для оценки точности ЦДИТЛП сдерживает развитие этого направления. Поэтому разработка методов и протоколов для быстрого и точного получения ЦДИТЛП и их использования в имитационном моделировании (ИМ) является актуальной научно-технической задачей.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки новых методов и средств оценки драпируемости, интегрированных с технологиями ИИ, компьютерного зрения и 3D-моделирования, для создания систем прогнозирования складчатой формы платьев на этапе конструкторской подготовки производства при разработке чертежей.

Степень разработанности темы. Количественные исследования механики малых напряжений и пространственного формообразования тканей базируются на классических работах Ф.Т. Пирса, Ч.Ч. Чу (C.C. Chu) и концепции коэффициента драпируемости Дж.К. Кьюзика (J.C. Cusick), ставшей долгосрочным ориентиром в этом направлении. В области объективной оценки свойств материалов создание системы KES учеными С. Кавабатой (S. Kawabata), М. Нивой (M. Niwa) и Р. Постлом (R. Postle), а также разработка инженерной системы тестирования FAST/SiroFAST (CSIRO) способствовали установлению интерпретируемой взаимосвязи в цепочке «параметры тканей — внешний вид одежды».

Эволюция методов имитационного моделирования и цифровой оценки свойств тканей в значительной степени опирается на достижения компьютерной графики в области физической симуляции деформируемых тканей в рамках концепций Д. Терзопулоса (D. Terzopoulos), Д. Бараффа и Э. Уиткина (D. Baraff, A. Witkin), Д. Брина (D. Breen). Систематизация ключевых технологий виртуальной одежды, проведенная П. Волино (P. Volino) и Н. Магненат-Тальманн (N. Magnenat-Thalmann), обеспечила важную теоретическую основу для последующего моделирования в САПР одежды, что создало прикладную инженерную основу для реализации цифровых двойников одежды. Проведенный патентный анализ выявил тенденции роста патентной активности в области 3D-моделирования ИТЛП: с 2010 по 2024 год доля патентов в области 3D-моделирования выросла с 4,2% до 42,8% среди всех патентов, связанных с информационными технологиями в текстильной отрасли. Основные направления включают 3D-примерку виртуальной одежды, симуляцию поведения ткани, интерактивное проектирование одежды и автоматизированное распознавание параметров ткани по изображениям.

Нейронные сети и компьютерное зрение для прямого извлечения (инвертирования) механических параметров тканей из их изображений использованы в работах К. Бхата (K. Bhat), К. Боуман (K. Bouman, ICCV) К. Родригеса-Пардо (C. Rodriguez-Pardo, CGF), что позволило сформировать перспективную концепцию "ИИ как измерительное звено, управляемый строгим протоколом» в целях создания ЦД изделий. Благодаря исследованиям С. Цзэн (X. Zeng, GEMTEX/ENSAIT) и К. Вонг (C. Wong, AiDLab/PolyU) сформирована междисциплинарная исследовательская экосистема применения ИИ для текстиля и одежды. Наибольший потенциал для развития имеют методы, комбинирующие компьютерное зрение с языковыми моделями.

В Российской Федерации научные исследования в области ИМ проводят ИВГПУ и РГУ имени А.Н. Косыгина, Казанский национальный технологический исследовательский университет.

Связь с научными программами. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 25-11-00022 "Технология виртуальных испытаний текстильных материалов для 3D моделирования одежды", <https://rscf.ru/project/25-11-00022/>).

Целью диссертационного исследования является сокращение длительности процесса имитационного моделирования женских платьев складчатой формы.

Для достижения цели были решены следующие **задачи**:

1. Провести критический анализ современных методов определения драпируемости и других показателей физико-механических свойств тканей в реальной и виртуальной средах.
2. Разработать новый метод для оценки антропоморфной драпируемости текстильных материалов, воспроизводящий условия закрепления пробы ткани на плечевом поясе фигуры человека, и реализующее его устройство, одинаково функционирующее в материальной и виртуальной средах.
3. Оценить эффективность применения антропоморфного коэффициента драпируемости по сравнению с существующими методами.
4. Разработать алгоритм применения антропоморфного коэффициента драпируемости, измеренного на коротких и длинных пробах, для прогнозирования показателей внешней формы для изучения влияния параметров чертежей на формообразование женских платьев имитационного моделирования их ЦД.
5. Создать инструменты ИМ ЦД тканей на базе нейросетей для измерения усилий растяжения при малых величинах удлинения, жесткости при изгибе, поверхностной плотности и толщины, для генерации ЦД тканей в 3D программах. Разработать библиотеку фотографических 2D и 3D изображений тканей, необходимую и достаточную для генерации ЦД тканей.
6. Разработать конструкцию женского платья для изучения складчатости поверхности, образуемой под влиянием складок разной величины и имеющих разные направления.
7. Разработать метод оценки складчатости поверхности женского платья на основе компьютерного зрения и алгоритм его применения для выбора условий конструктивного моделирования чертежей и обеспечения визуального подобия драпированных платьев из разных тканей.
8. Провести комплексную валидацию разработанных методов оценки драпируемости, параметризации складчатой поверхности, генерации ЦД тканей путем сравнения ЦД реальных платьев.

Объект исследования – ткани, женские платья и процесс их имитационного моделирования.

Предмет исследования – закономерности формообразования складчатой поверхности женских платьев.

Методы и средства исследования. В работе использованы: метод компьютерного зрения (программа ImageJ); методы физико-механических испытаний тканей (растяжение при малых нагрузках на разрывной машине MetroteksMT110-G, жесткости при изгибе модифицированным консольным методом, определение коэффициента драпируемости по методу Cusick); методы 3D-моделирования и симуляции (программы Style3D, Rhino-7); методы корреляционного и регрессионного анализа (SPSS, Graphpad); методы статистической обработки данных (расчет MAPE, доверительных интервалов, дисперсионный анализ ANOVA); методы машинного обучения нейронных сетей (GPT-5.1, Gemini3Pro, Grok-4.1, Qwen3-Max); виртуальные и физические эксперименты. Для 3D-печати устройства для вычисления антропоморфного коэффициента драпируемости использована технология фотополимерной печати.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в разработке методологии имитационного моделирования цифровых двойников складчатой поверхности платьев.

Впервые получены следующие научные результаты:

1. Разработан метод для оценки драпируемости тканей, моделирующий условия взаимодействия одежды с антропоморфно подобной поверхностью и позволяющий учитывать влияние конструктивных параметров чертежей плечевой одежды (конфигурацию срезов, габаритные размеры) и реализованный в устройстве.

2. Обоснована концепция создания ЦД тканей при использовании нейронной сети в качестве инструмента ИМ, основанная на формализации входных данных и формализации процесса измерения показателей растяжимости, жесткости, толщины, поверхностной плотности и драпируемости в реальных условиях, использовании референсных фотографий ткани в плоском и складчатом состояниях.

3. Получена регрессионная модель, связывающая морфологию складчатой поверхности женского платья, количественно выраженную через процент светлой площади на фронтальных изображениях, и драпируемость ткани с коэффициентом складчатости, закладываемом на этапе конструктивного моделирования чертежей.

Работа соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности:

- 7. Цифровое прогнозирование, математические методы, информационные технологии моделирования технологических процессов первичной обработки сырья, организации производства и изготовления волокон, нитей, материалов и изделий легкой промышленности.

- 8. Технологии имитационного моделирования цифровых двойников волокон, нитей, материалов, изделий легкой промышленности и человеческих фигур.

- 26. Методы системного анализа свойств формы и материалов в проектируемых ИТЛП.

Теоретическая значимость исследования состоит в развитии основ управления складчатостью морфологически подобных поверхностей однослойной одежды с использованием цифровых двойников тканей, сгенерированных на основе антропоморфного коэффициента драпируемости.

Личный вклад автора. На всех этапах выполнения работы автор под руководством научного руководителя принимал личное участие в постановке цели и формулировке основных задач исследования, в планировании и проведении экспериментов, обсуждении полученных результатов, формулировании выводов и проверке гипотез, подготовке материалов публикаций совместно с соавторами. Доля соискателя в опубликованных работах составляет от 63 до 80 %.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1) метод оценки драпируемости, отличающийся антропоморфностью и возможностью воспроизведения условий конструирования и изготовления одежды;

- 2) технология генерации цифровых двойников тканей на бесконтактных неинструментальных измерениях пяти групп показателей;

- 3) модель ИМ складчатой формы платья и коррекции чертежа по признаку морфологической подобности.

Практическая значимость работы состоит в создании инструментария для получения цифровых двойников тканей и женских платьев, доступного предприятиям легкой промышленности, без приобретения дорогостоящего оборудования.

Предложенный алгоритм количественного преобразования складчатой поверхности и драпируемости материала в параметры конструктивного моделирования чертежей позволяет существенно сократить затраты на изготовление физических образцов и развивает параметрическое проектирование в индустрии моды.

Результаты работы могут быть использованы на швейных предприятиях, в дизайн-студиях, в учебном процессе вузов при подготовке специалистов в области цифрового проектирования одежды, а также для создания новых модулей автоматической оцифровки материалов.

Степень достоверности результатов подтверждается использованием поверенного лабораторного оборудования и стандартизированных методик для получения эталонных значений; большим объемом экспериментальных данных (три типа тканей с различными свойствами, множество вариаций проб); применением современных методов статистической обработки (ANOVA, доверительные интервалы); высоким уровнем корреляции и низкими значениями относительных ошибок при сравнении виртуальных и материальных образцов, а также положительной апробацией работы на международных конференциях.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: национальных (с международным участием) молодёжных научно-технических конференциях ПОИСК (Иваново, 2024,2025,2026); международном конгрессе Smart World Congress (Calgary, Canada, 2025); международная конференция IFFTI (London College of fashion, University of the Arts London, 2025).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 3 печатные работы, из них 2 статьи в рецензируемых научных изданиях, одна статья в издании, индексируемом в базах Scopus, и четыре материала конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 175 наименований и двух приложений. Общий объем работы составляет 214 страниц машинописного текста, включая 36 рисунков и 25 таблиц. Оригинальность текста диссертации составляет 99,91 %.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, представлены методы исследования и положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен обзор и анализ современных подходов к оценке коэффициента драпируемости текстильных материалов как основного показателя объемно-пространственного формообразования одежды на человеческой фигуре. Рассмотрена эволюция методов от субъективных к объективно инструментальным, включая классический драпометр Cusick и его модификации. Подробно проанализированы работы по виртуальной оценке драпируемости в программах 3D-симуляции (табл.1), выявлены их достоинства (быстрота, наглядность) и недостатки (зависимость от качества модели ткани). Отмечен вклад исследователей в области цифровых двойников и AI-технологий для прогнозирования свойств тканей. Установлено, что существующие методы виртуальных испытаний используют примитивные геометрические развертываемые стенды (шар, цилиндр, конус), которые не отражают реальных условий деформации ткани на фигуре человека. Обоснована необходимость разработки нового метода и стенда, имитирующего взаимодействие тканей неразвертываемой поверхностью в виде плечевого пояса человеческой фигуры, и создания метрологически обоснованного протокола для использования ИИ в качестве инструмента имитационного моделирования ЦД тканей.

Таблица 1 — Сравнение существующих методов определения коэффициента драпируемости (DC)

Метод испытания	Формула расчета DC	Адекватность результатов виртуальных и реальных испытаний)
FRL оптический драпометр	Площадь проекции / площадь кольца	-
Cusick драпометр	Вырезание и взвешивание	-
Анализ изображения	Image-analysis	0.90
Sylvie 3-D драпометр	Площадь проекции / площадь образца	0.80
Виртуальный драпометр (3D Max)	Площадь проекции / площадь образца	0.52

Во второй главе представлены методы и средства исследований натуральных тканей и женских платьев и их цифровых двойников. Дана характеристика тканей, различающихся по показателям физико-механических свойств и использованных для изготовления проб.

Выбранные ткани испытывали в реальных, виртуальных условиях и с помощью нейронных сетей. Первая группа методов включала натурные измерения с использованием стандартизированных методов испытаний и измерений выбранных показателей: поверхностная плотность (ГОСТ ASTM D3776), толщина (ГОСТ ASTM D1777), растяжимость по основе, утку и под углом 45 градусов при малых нагрузках (1-5 мм) на разрывной машине MetroteksMT 110-G, жесткость при изгибе по основе, утку и под углом 45 градусов модифицированным консольным методом, коэффициент драпируемости по методу Cusick. Статистическая обработка результатов включала расчет средних значений, стандартных отклонений, а для сравнения точности использовали среднюю абсолютную процентную ошибку (MAPE).

$$MARE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_{gen,i} - X_{RC,i}}{X_{RC,i}} \right| \times 100\% \quad (1)$$

Вторая группа аналогичных испытаний была выполнена в нейронных сетях GPT-5.1, Gemini 3 Pro, Grok-4.1, Qwen3-Max путем составления специальных многомодальных промптов, детализирующих процессы описанных выше натурных испытаний, содержащих требования к их проведению и презентации результатов. В качестве референсов использовали фотографии, демонстрирующие внешний вид тканей в плоском недеформированном и деформированном складчатом состояниях. Складки формировали методом кручения и под действием гравитации. На рис.1 приведены фотографии тканей, которые использовали в составе промптов для проведения имитационных измерений. Во время предварительной калибровки фотографического протокола установлены следующие правила его составления: минимальное количество фотографий - 2, угол спиральной деформации кручения 360° (рис.1,г), направление нити основы в пробах, деформирующихся под действием гравитации (рис.1, д,е).

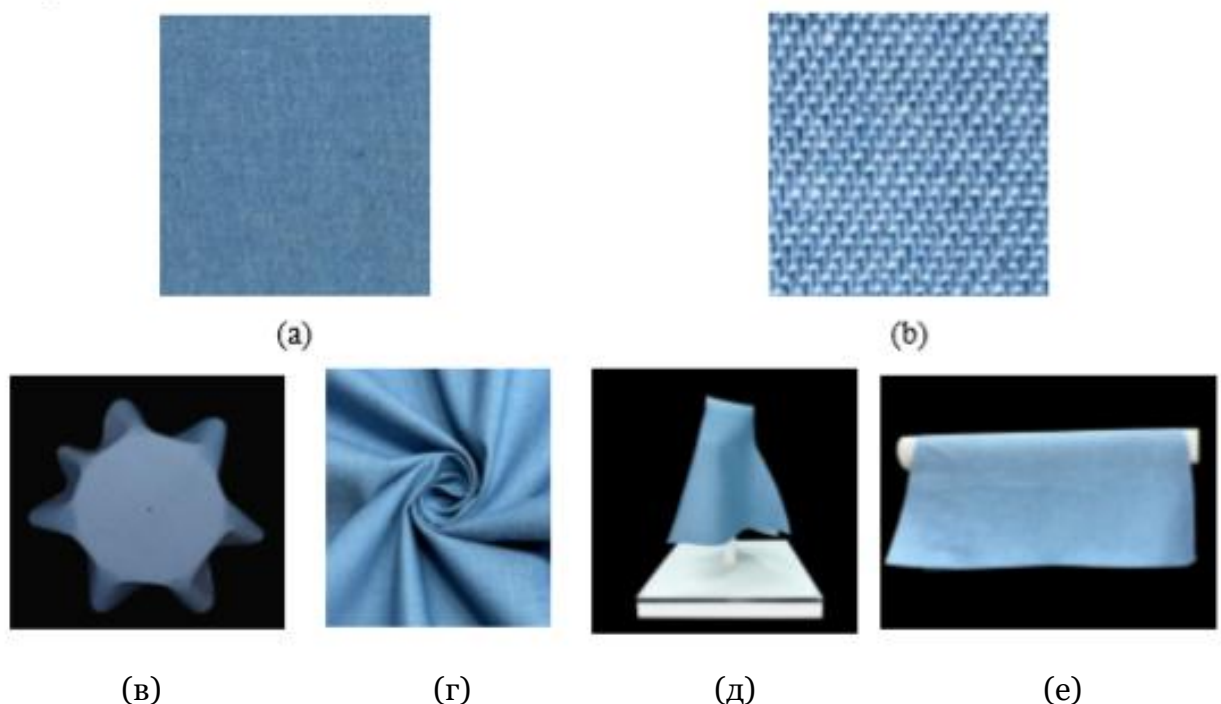


Рис. 1 - Фотографии ткани F1 в плоском (а - без увеличения, в - с 50-кратным увеличением) и складчатом (в-е) состояниях, использованные в составе промптов вместе с протоколами, описывающими алгоритмы измерения усилия растяжения по основе, утку и диагонали на 1...5 мм, жесткости по основе, утку и диагонали, толщины, поверхностной плотности и коэффициента драпируемости

Экспериментальную проверку результатов измерения драпируемости и других показателей проводили путем (1) генерации цифровых двойников тканей, (2) изготовления физических изделий (юбки и женских платьев с разной формой поверхности - гладкой и складчатой) и (3) генерации ЦД платьев. В первой модели платья моделировали процесс образования вертикальных фалд под

действием гравитации. Во второй модели платья моделировали складчатую поверхность после конструктивного моделирования (коническое разведение), принудительного закрепления складок в ниточном шве и их свободного распространения в виде драпировок (по основе, утку и под углом). На рис. 2 показаны чертежи конструкций для изготовления платьев.

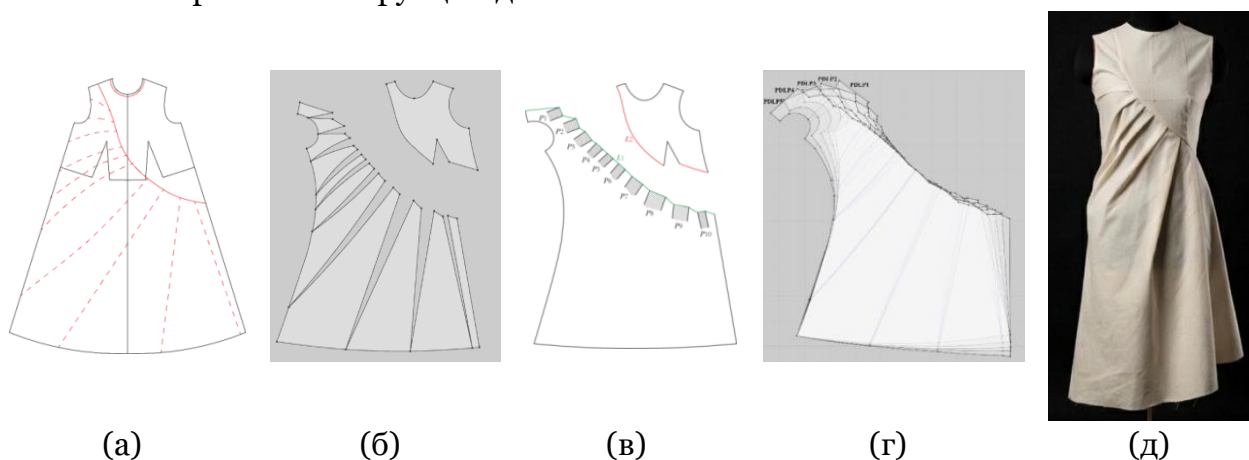


Рис.2. Схемы чертежей конструкций для изготовления двух видов платьев: а - со свободным образованием фалд под действием гравитации, б,в - с принудительным складкообразованием под действием шва и свободного формообразования, г - совмещенные схемы чертежей с разными показателями складчатости, д - внешний вид складчатого платья

Платье состоит из верхней и нижней части и правой части с драпировками, соединенных наклонным швом. Складчатость поверхности оценивали с помощью компьютерного зрения в специальной программе по площади белого цвета при предварительно выбранных условиях освещения, чтобы обеспечить сопоставимость результатов для всех тканей. Для этого на изображениях платьев оценивали складчатую поверхность полностью и в отдельности два ее участка: верхний (выше линии груди), на котором складки не испытывали действие гравитационных сил, и нижний, на котором складки получали возможность свободного распространения.

В третьей главе изложен метод оценки драпируемости тканей в условиях, максимально приближенных к условиям реального формообразования и изготовления одежды, и описана конструкция реализующего его устройства.

Для расширения возможностей был разработан новый стенд, рабочая поверхность которого - зона контакта с пробой - моделирует морфологию плечевого пояса женских фигур (рис. 2).

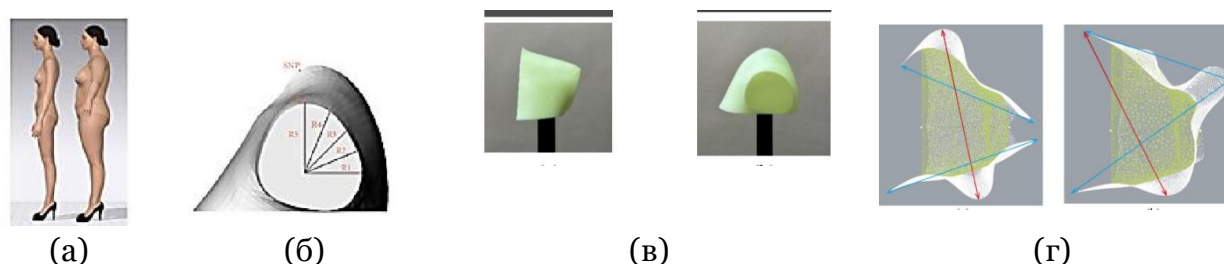


Рис. 3 - Процесс разработки устройства для измерения коэффициента драпируемости: а -исходные аватары с обхватами груди 84-126 см; б -парасагиттальные сечениязоны сочления руки с торсом (длина проймы); в -3D-модель, г - схема измерения показателей пробы для вычисления коэффициента драпируемости

Рабочая поверхность устройства была построена путем реконструкции опорной поверхности аватаров женских фигур. Для создания 3D поверхности в программе Rhino-7 использовали средние значения радиусов кривизны парасагиттальных сечений типовых фигур. Устройство включает квадратное основание, регулируемую по высоте стойку, сверху которой закреплена антропоморфная поверхность. Устройство снабжено средствами измерения - металлическими линейками и источником лазерного излучения - и позволяет графически фиксировать конфигурацию нижнего среза пробы.

Была разработана форма двухкомпонентной пробы трапециевидной формы, приближенная к конструкции плечевого участка полочки и спинки. Для количественной оценки использован новый коэффициент драпируемости DC, который вычисляли после измерений контура пробы (рис.3, г) до и после симуляции:

$$DC = \Delta 2 / \Delta 1 \quad (2)$$

где $\Delta 1$ — изменение максимальной ширины пробы в парасагиттальной плоскости, $\Delta 2$ — изменение средней ширины пробы во фронтальной плоскости.

После проведения многофакторного эксперимента с разными типами тканей установлены рациональные параметры двухкомпонентной пробы, обеспечивающие высокую вариативность коэффициента драпируемости: угол плечевого среза (40°), длина плеча (12 см), длина пробы (41 см), ширина низа (24 см). Виртуальная симуляция драпируемости проводили в программе Style3D.

Было проведено сравнение известных методов оценки драпируемости проб тканей, применяемых в технологиях 3D симуляции (геометрические стенды - сфера, конус, цилиндр). Установлено, что существующие геометрические стенды не позволяют выявить существенные различия в драпируемости исследуемых тканей. Сравнение нового метода с классическим (Cusick) и методом конуса (табл.2) показало, что новый метод обеспечивает большую дифференциацию коэффициента драпируемости, что подтверждает возможность его дальнейшего применения.

Таблица 2 — Сравнение коэффициентов драпируемости, полученных разными методами

Ткань	Значения коэффициентов драпируемости, измеренные на разных поверхностях		
	антропоморфная поверхность (новый)	диск (Cusick)	конус (Style 3D)
Джинсовая, саржевое переплетение 3/1, 97% хлопок + 3% спандекс	0.95	0.34	0.23
Плательная, атласное переплетение, 97% полиэстер + 3% спандекс	0.92	0.30	0.26
поплин, полотняное переплетение, 100 % хлопок	0.89	0.27	0.26
Среднее значение коэффициента вариации V	0.85	0.77	0.19

Корреляция между результатами виртуальных и реальных испытаний по новому методу составила 0,85, что подтвердило возможность его применения в физическом и виртуальном моделировании.

В четвертой главе представлена разработка метода получения цифрового двойника ткани с использованием нейронных сетей и программ 3D-симуляции. Метод основан на технологии ИМ, где мультимодальная языковая модель, следуя строгому протоколу, преобразует набор стандартизированных фотографий (рис.1) в набор физических параметров.

Ключевым элементом метода ИМ является протокол промпта, который формализован как набор базовых и вариативных модулей. Установлено, что итеративное уточнение промпта путем введения физических ограничений, правил снижения неопределенности, механизмов обратной связи позволило снизить MAPE с 377% до минимально возможного 37%. Сравнение четырех нейронных сетей (GPT-5.1, Gemini 3 Pro, Grok-4.1, Qwen3-Max) показало, что лучшую точность и стабильность продемонстрировала модель GPT-5.1, которая была выбрана в качестве базовой.

ЦД тканей были сгенерированы в программе Style3D по двум наборам показателей жесткости, растяжимости, толщины, поверхностной плотности и драпируемости, измеренным инструментальными способами и с помощью разработанного метода на базе ИМ. После генерации виртуальных женских юбок с вертикальными фалдами оценивали совпадение двух силуэтов в программе компьютерного зрения с помощью трех метрик: IoU по отношению площади пересечения силуэтов к площади их объединения, индексу визуального подобия SSIM и коэффициенту Dice (для всех трех метрик - интервал от 0 до 1, где абсолютно точному совпадению соответствует 1). Валидация показала высокую степень совпадения силуэтов, полученных по двум наборам параметров: IoU = 0,88-0,91, SSIM = 0,92-0,94, Dice = 0,93-0,95. Высокое совпадение силуэтов юбок подтверждает, что полученные с помощью ИИ цифровые двойники тканей адекватно воспроизводят поведение реальных материалов в виртуальной среде.

Для преодоления ограничений нейронных сетей была разработана гибридная стратегия маршрутизации, при которой разные группы параметров назначались в промптах разным моделям, показавшим наилучшие результаты в своей области. Эта стратегия позволила снизить среднюю ошибку MAPE до 19,1%.

Пятая глава посвящена разработке метода прогнозирования морфологии складчатого платья и коррекции чертежа на основе данных о драпируемости ткани. Для эксперимента была выбрана модель женского платья (рис.2,д). Для оценки морфологии складчатой поверхности использовали программу компьютерного зрения ImageJ путем преобразования полутоновой поверхности в оттенки серого, пороговой сегментации и расчёта соотношения светлой и темной областей.

Изображения платья преобразовывали в 256-градационную шкалу серого и рассчитывали индекс контрастности складок. Из двух кандидатных зон для оценки складчатости - светлой области, формируемой вершинами складок и освещенными поверхностями, и темной области, в которой располагались тени между складками и участки их перекрытий, - была выбрана светлая область, которая продемонстрировала значительно меньшие значения вариации, а

региональная морфология складок была более выражена. Исследовали способность тканей образовывать складки в разных условиях: под действием гравитации, вблизи ниточных швов и в условиях свободного распространения на лимитированной площади.

Установлена тесная связь величиной конического разведения среза (складчатостью поверхности) и разработанным антропоморфным коэффициентом драпируемости и долями светлых областей складчатых поверхностей в виде следующих регрессионных уравнений

$$\Delta 1 = 1.5 + 1.3DC - 0.02A_{overall} \quad (1)$$

$$\Delta 2 = 4.6 - 1.5DC - 0.04A_{ROI1} \quad (2)$$

$$\Delta 3 = 1.7 + 1.7DC - 0.03A_{ROI2} \quad (3)$$

где $\Delta 1, \Delta 2, \Delta 3$ - коэффициенты складчатости, равные величинам конического разведения чертежей, для всей площади и участков с короткими и длинными складками соответственно; DC - антропоморфный коэффициент драпируемости ткани; $A_{overall}$ - доля светлой области в общей области складок, %; A_{ROI1} - доля светлой области в зоне с короткими плотными складками, %; A_{ROI2} - доля светлой области в зоне с длинными складками, формирующимися под влиянием гравитационно-обусловленной деформации и краевых эффектов.

На рис. 4 показаны морфологически подобные участки складчатых поверхностей для платьев из двух тканей с разными коэффициентами драпируемости и конического разведения чертежей.

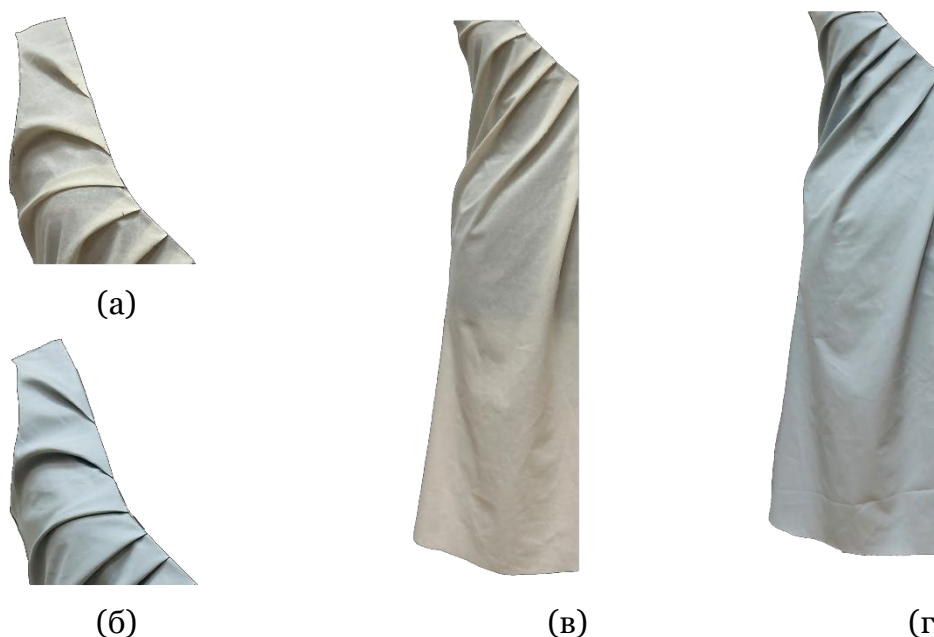


Рис. 4 Внешний складчатых поверхностей в области коротких (а,б) и длинных (в,г) складок в платьях из разных тканей: прототип (а,в) и контрольное (б,г)

Валидация на рис.4 продемонстрировала высокую морфологическую идентичность протитипа и контрольного платья и локальное структурное сходство ($IoU = 0.9336$, Dice коэффициент = 0.9657).

В выполненном исследовании предложена новая схема ИМ ЦД складчатой формы "свойство ткани → визуальная морфология → количественный показатель изображения → параметр чертежа модельной конструкции", что формирует новое направление для морфологически-ориентированного конструирования чертежей.

На рис. 7 показана концептуальная схема морфологически-ориентированной коррекции чертежей модельных конструкций.

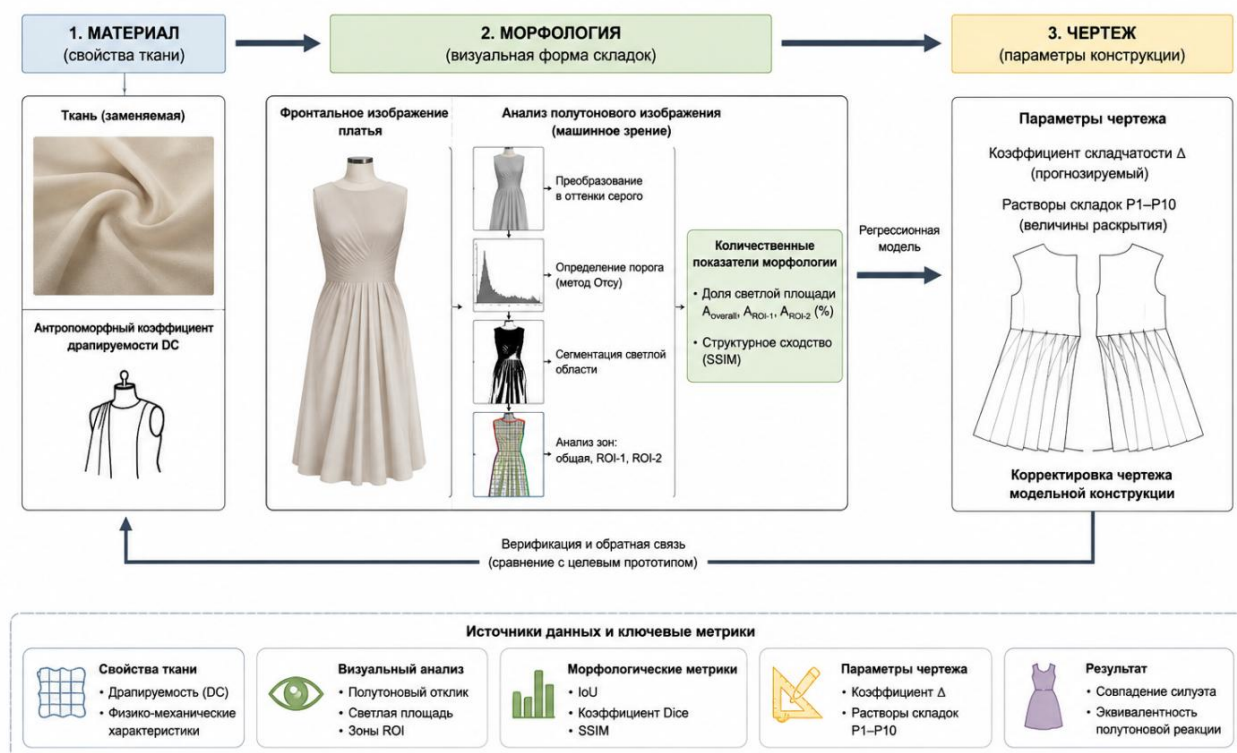


Рис. 7 - Концептуальная схема морфологически-ориентированной коррекции чертежей модельных конструкций путем ИМ

Таким образом, результаты, полученные путем формообразования разных видов проб и женской одежды, демонстрируют высокую сходимость теоретических и экспериментальных данных, что подтверждает целесообразность использования нового метода оценки драпируемости для генерации цифровых двойников женских платьев со складчатой поверхностью.

ИТОГИ ВЫПОЛНЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Разработан новый антропоморфный метод оценки драпируемости тканей, воспроизводящий условия формообразования плечевой одежды и позволяющий прогнозировать параметры объемно-силуэтной формы и складчатость поверхности женских платьев. Метод продемонстрировал высокую дифференцирующую способность измерения драпируемости тканей по сравнению с существующими методами.

2. Определены геометрические параметры двухкомпонентной пробы и степень их влияния на значение антропоморфного коэффициента драпируемости за счет изменения типосоединительного шва (33,2%), направление раскроя (27,8%), ширины (21,5%) и конфигурации соединяемых срезов (17,5%). Виртуально-физическая валидация нового метода показала отсутствие статистически значимых различий между виртуальными и физическими измерениями ($p > 0,05$, коэффициент корреляции $r = 0,96$) и возможность параллельного применения в физической и виртуальных средах.

3. Разработан метод количественного анализа складчатости поверхности платьев с помощью компьютерного зрения в градациях серого цвета, количественно связывающего выраженность складочного рельефа с драпируемостью ткани ($r = -0,78$).

4. Разработан метод коррекции чертежей модельных конструкций женских платьев, впервые объединяющий показатель полутонного отклика складчатой поверхности, антропоморфный коэффициент драпируемости ткани и коэффициент складчатости и обеспечивающий визуальное подобие складчатых поверхностей из разных тканей. Разработанный метод реализует параметрический алгоритм конструктивного моделирования чертежей платьев "антропоморфный коэффициент драпируемости → визуальная морфология складчатой поверхности → количественный показатель складчатости → параметр чертежа модельной конструкции".

5. Разработана методология ИМ показателей физико-механических свойств тканей (растяжимости, изгиба, толщины, поверхностной плотности и драпируемости) ЦД тканей с использованием нейронных сетей в качестве бесконтактного неинструментального средства для измерения.

6. Разработан алгоритм генерации ЦД тканей на основе использования результатов бесконтактного неинструментального измерения их показателей, полученных после анализа фотографических изображений, содержащих информацию о внешнем виде складчатой поверхности тканей, возникающей под влиянием различных видов деформаций (гравитации, драпируемости и кручения), выполнения процедур протокол измерения и валидации. Показано, что отличие между цифровыми двойниками тканей и женских платьев, сгенерированных в программах трехмерной симуляции по результатам лабораторных контактных испытаний и бесконтактных неинструментальных, составляет от 26 до 35,8% по показателю MARE при схожести трехмерной формы, драпируемости, внешнего контура и распределения складок.

6. Сформирован сквозной процесс получения ЦД женских платьев со складчатой поверхностью, который может быть полностью реализован в цифровом пространстве с применением компьютерных программ и включающий использование новой количественной и визуальной базы данных, измерение показателей физико-механических свойств тканей инструментальными и неинструментальными методами, складчатости поверхности, генерацию адекватных цифровых двойников тканей и платьев и прогнозно-коррекционное моделирование чертежей.

РЕКОМЕНДАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Результаты работы рекомендуются к внедрению в учебный процесс подготовки бакалавров и магистров, обучающихся в рамках укрупненной группы 29 по направлению «Технология изделий легкой промышленности», а также на швейных предприятиях для цифровизации разработки изделий.

2. Перспективным направлением является расширение базы исследуемых материалов и включение трикотажных полотен и высокоэластичных тканей.

3. Развитие технологии виртуального проектирования может быть реализовано в динамических 4D-двойниках системы «фигура-одежда», учитывающих изменение свойств материала и формы изделия в движении.

ПУБЛИКАЦИИ, ОТРАЖАЮЩИЕ ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ:

в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий:

1. Чэнь, Ч. Совершенствование испытания тканей для одежды в виртуальной среде/ Ч. Чэнь, Ч. В.Е. Кузьмичев // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2024, 5(413). С. 83-95. DOI [10.47367/0021-3497_2024_5_83](https://doi.org/10.47367/0021-3497_2024_5_83). – 0,8 п.л./0,6 п.л.

2. Чэнь, Ч. Количественное управление формообразованием платьев: подход на базе машинного зрения и антропоморфного коэффициента драпируемости / Ч. Чэнь, В.Е. Кузьмичев // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2026, 3(423). С.218-233. -1 п.л./0,8 п.л. DOI [10.47367/0021-3497_2026_3_218](https://doi.org/10.47367/0021-3497_2026_3_218)

в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Scopus:

3. Chen Chengyu, Kuzmichev Victor. Digital Twin of Textile Fabric in Draping Test 2025 IEEE Smart World Congress (SWC). 18-22 Aug 2025, Calgary, Canada. 2025. С.1591-1598. - DOI [10.1109/SWC65939.2025.00250](https://doi.org/10.1109/SWC65939.2025.00250). – 0,5 п.л./0,4 п.л.

в материалах конференций

4. Чэнь Чэнъюй, Кузьмичев В.Е. Совершенствование тестирования текстильных материалов в виртуальной среде // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК – 2024): сб. материалов национальной (с международным участием) молодёжной научно-технической конференции. – Иваново: ИВГПУ, 2024/ С.770-775. – 0,38 п.л./0,3 п.л.

5. Чэнь Чэнъюй, Кузьмичев В.Е. Прогнозирование параметров формы женского платья с использованием нового коэффициента драпируемости // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК – 2025): сб. материалов Национальной (с международным участием) молодёжной научно-технической конференции. – Иваново: ИВГПУ, 2025. С.501-505. – 0,31 п.л./0,25 п.л.

6. Chen Chengyu, Kuzmichev Victor. Virtual simulation of Apparel Draping: IFFTI Annual Proceedings, London, 2025, Vol. 4, March 2025. С.1406-1424 <https://iffiti.org/downloads/iffiti-publication/annual-proceedings/lcf-2025/1406-1424%20394.%20Virtual%20Simulation%20of%20Apparel%20Draping.pdf> – 1,1 п.л./0,7 п.л.

7. Чэнь Чэнъюй, Кузьмичев В.Е. Cross-Version Robustness of an AI Fabric Measurement Protocol for Digital Garment Twins // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК – 2026): сб. материалов Национальной (с международным участием) молодёжной научно-технической конференции. – Иваново: ИВГПУ, 2026. С.660-665. – 0,375 п.л./0,25 п.л.

Подписано в печать 03.07.2026.
Формат 1/16 60х84. Плоская печать. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 80 экз.
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»
Редакционно-издательский отдел УИРиК
153000, г. Иваново, Шереметевский пр., 21