

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ивановский государственный политехнический университет»

На правах рукописи

陈成豫

Чэнь Чэнюй

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

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата наук

Научная специальность 2.6.16. Технология производства изделий текстильной
и легкой промышленности

Научный руководитель — проф., д.т.н. В. Е. Кузьмичев

Иваново – 2026

Содержание

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	11
1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОДЕЖДЫ.....	12
1.1 Современное состояние исследований оценки и применения драпировочных свойств текстильных материалов.....	13
1.1.1 Методы характеристики и оценки драпируемости.....	13
1.1.2 Эволюция устройств для испытания драпируемости.....	18
1.1.3 Развитие виртуальных испытаний драпируемости.....	21
1.2 Современное состояние ИИ-измерения параметров ткани.....	26
1.2.1 Визуальное представление свойств ткани.....	26
1.2.2 Смена парадигмы в ИИ-измерении ткани.....	31
1.2.3 Метрологические основы ИИ-измерения.....	35
1.3 Современное состояние исследований цифровых двойников текстиля и одежды на основе 3D-моделирования.....	39
1.3.1 Построение цифрового двойника текстильного материала.....	39
1.3.2 Трёхмерная виртуальная симуляция одежды.....	43
1.3.3 Валидация цифровых двойников текстиля и одежды.....	46
1.4 Исследовательские пробелы и постановка проблемы.....	47
1.4.1 Ограничения традиционных методов испытания драпируемости.....	47
1.4.2 Ключевые проблемы генерации цифровых двойников.....	49
1.4.3 Недостаточность методов прогнозирования формы одежды и коррекции параметров лекал на основе драпируемости.....	52
1.5 Цель и направление данного исследования.....	53
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	56
2.1 Объекты исследования.....	56
2.1.1 Ткани.....	56
2.1.2 Чертежи и модели платьев.....	58
2.2 Программное обеспечение.....	62
2.2.1 Программное обеспечение для трёхмерного моделирования и симуляции.....	62
2.2.2 Модели искусственного интеллекта.....	63
2.2.3 Программное обеспечение для анализа изображений.....	65
2.2.4 Программное обеспечение для статистики и анализа данных.....	68
2.3 Методы исследования.....	70
2.3.1 Испытания физико-механических свойств тканей.....	70
2.3.2 Метод прогнозирования параметров формирования базового платья.....	74
2.4 Методы оценки и валидации.....	76
2.4.1 Метод оценки согласованности прогнозирования параметров и статистической проверки.....	76
2.4.2 Метод проверки геометрической согласованности контура и локальных областей	

.....	77
2.4.3 Метод проверки эквивалентного отклика и структурной схожести	79
ГЛАВА 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ НОВОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ	
ИСПЫТАНИЯ ДРАПИРУЕМОСТИ	82
3.1 Обоснование и моделирование виртуального антропоморфного драпометра	82
3.1.1 Обоснование необходимости нового устройства	82
3.1.2 Моделирование виртуального драпометра и определение геометрических параметров.....	84
3.2 Проектирование и реализация физического прототипа драпометра по новому методу	86
3.3. Пробы для испытаний.....	88
3.4 Формирование алгоритма испытания драпируемости по новому методу	91
3.4.1 Формирование алгоритма в виртуальной среде	91
3.4.2 Результаты коэффициента драпируемости короткого образца и основные влияющие факторы	103
3.5 Валидация нового метода на основе физического прототипа.....	109
3.5.1. Проверка согласованности между виртуальными и физическими результатами	109
3.5.2. Сравнение дискового и нового методов	110
Выводы по главе 3	112
Глава 4. ПОСТРОЕНИЕ И ВАЛИДАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ТКАНЕЙ НА	
ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА.....	114
4.1. Набор изображений и система кодирования параметров для измерений с помощью искусственного интеллекта	114
4.2. Построение и калибровка протокола промпта для ИИ измерений.....	118
4.2.1. Библиотека элементов промпта.....	118
4.2.2 Протокол промпт-инжиниринга	120
4.3 Калибровка и конфигурирование протокола измерений.....	124
4.3.1. Калибровка протокола промпта.....	125
4.3.2 Отбор модели ИИ	129
4.3.3 Определение набора фотодоказательств.....	132
4.3.4 Формирование итогового набора параметров, измеренных с помощью искусственного интеллекта	146
4.4. Построение цифрового двойника ткани с помощью ИИ параметров	148
4.4.1 Рабочий процесс построения цифрового двойника ткани	148
4.4.2 Назначение параметров в редакторе материалов Style3D	149
4.4.3 Сравнение цифровых двойников тканей	150
4.5. Валидация на уровне изделия.....	152
Выводы по главе 4	160
ГЛАВА 5. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФОРМЫ ПЛАТЯ	162
5.1. Измеряемые объекты и система параметров.....	162
5.2. Прогнозирование параметров формообразования базового платья	168
5.2.1.Связь драпируемости проб с параметрами формы базового платья	168

5.2.2 Модель прогнозирования и валидация параметров формообразования базового платья	170
5.3. Исследование драпируемости платьев	171
5.3.1. Выбор светлой области для анализа складок	171
5.3.2 Изменение площади светлой области при увеличении величины складок	174
5.4. Коррекция чертежей складчатого платья на основе реакции в градациях серого и коэффициента драпируемости ткани	178
5.5. Валидация результата коррекции чертежа складчатого платья	180
Выводы по главе 5	184
ИТОГИ ИССЛЕДОВАНИЯ	186
ИТОГИ ВЫПОЛНЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ	186
РЕКОМЕНДАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ	187
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	188
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	201
СПИСОК ТАБЛИЦ	204
СПИСОК РИСУНКОВ	207
ПРИЛОЖЕНИИ А	212
ПРИЛОЖЕНИИ В	214

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.

Уществующие 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 потенциала 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 ЦД ИТЛП сдерживает развитие этого направления. Поэтому разработка методов и протоколов для быстрого и точного получения ЦД ИТЛП 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.

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 и 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 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 рецензируемом научном издании, входящем в перечень ВАК («Известия вузов. Технология текстильной промышленности»), одна статья в издании, индексируемом в базах WoS, и

четырёх материалах конференции.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 175 наименований и приложений. Общий объем работы составляет 211 страниц машинописного текста, 3 страницы приложений, включая 36 рисунков и 25 таблиц. Оригинальность текста диссертации составляет 99,91 %.

ВВЕДЕНИЕ

Современные системы 3D-проектирования одежды позволяют создавать виртуальные ткани и виртуальные изделия, однако сама по себе виртуальная модель не является цифровым двойником. Цифровой двойник должен иметь проверяемую согласованность с реальным объектом на уровне параметров, формы и реакции. Традиционные методы испытаний тканей обеспечивают стандартизированные результаты, но форма проб и условия опоры в таких испытаниях отличаются от условий формообразования одежды на фигуре человека. Поэтому возникает необходимость в разработке метода оценки драпируемости, который учитывает граничные условия, более близкие к конструкции одежды.

В диссертации цифровые двойники тканей и одежды рассмотрены как результат процесса имитационного моделирования, симуляции и валидации. В этом процессе параметры ткани не могут быть изолированы от условий их получения, способа ввода в программную среду и последующей реакции виртуального изделия. Поэтому исследование направлено не только на получение отдельных показателей физико-механических свойств, но и на проверку того, способны ли эти показатели обеспечивать воспроизводимое формообразование одежды в виртуальной среде.

Особое значение в работе имеет драпируемость ткани, поскольку она связывает низконапряженное механическое поведение материала с объемно-силуэтной формой изделия. Для приближения испытания к условиям формирования одежды разработан антропоморфный метод оценки драпируемости, основанный на плечеподобной опорной поверхности. Такой подход позволяет перейти от стандартной оценки драпируемости пробы к новому антропоморфному параметру, который может быть использован для прогнозирования формы платья и корректировки конструктивных решений.

Наряду с этим в работе рассматривается возможность получения параметров ткани с помощью нейронных сетей на основе стандартизированных фотографических доказательств и протокола промпта. Такой подход позволяет сократить зависимость от трудоемких лабораторных процедур, но требует метрологической проверки точности, стабильности и применимости полученных параметров. Поэтому структура исследования объединяет три взаимосвязанных направления в новую методологию имитационного моделирования: разработку антропоморфного метода оценки драпируемости, генерацию цифровых двойников тканей и прогнозирование складчатой формы платья с последующей валидацией результатов.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОДЕЖДЫ

Цифровизация процесса проектирования одежды потребовала качественного пересмотра структуры описания всех его элементов - человеческих фигур, текстильных материалов, одежды, технологий проектирования и изготовления. Эквивалентами материальным процессам и объектам стали цифровые двойники [161]. Их появлению предшествовали многолетние испытания, а пример генерации цифровых двойников текстильных материалов является наиболее убедительным доказательством синтеза сразу нескольких направлений - методологии испытаний, развития инструментальной базы и моделирования процессов.

Исследования свойств текстильных материалов и измерения драпируемости прошли путь от основанных на опыте оценок грифа и внешнего вида ткани к объективной характеристике низконапряженного механического поведения. Физическую основу для интерпретации деформации ткани составляют толщина, поверхностная плотность, изгиб, сдвиг, растяжение и сжатие, а для описания пространственной формы, возникающую под действием силы тяжести и граничных ограничений в одежде, используют драпируемость. Поэтому измерение показателей свойств тканей для одежды и оценка их драпируемости образуют связанную исследовательскую систему, в которой первая группа показателей объясняет материальную основу деформации, а драпируемость характеризует ее видимый формообразующий результат.

С развитием испытательных приборов, компьютерных методов обработки изображений и технологий трехмерного виртуального моделирования методы измерения показателей свойств постоянно совершенствовались в направлении смещения от субъективной эмпирической оценки к результатам объективного количественного анализа. С одной стороны, традиционные испытания показателей физико-механических свойств в низконапряженном состоянии создали основу для понимания драпировочного поведения тканей и одежды. С другой стороны, прямые методы измерения коэффициента драпируемости, проекционного контура пробы, числа фалд позволяют выразить оценку драпируемости более явно. Цифровые технологии позволили проводить такое испытание на этапе виртуального моделирования, на котором результаты используют для виртуальной реконструкции материала, формирования его цифрового двойника и трехмерной симуляции одежды. Единое цифровое пространство для тканей и одежды создает уникальные условия для установления объективно-существующих закономерностей, существующими между показателями свойств текстильных материалов и моделированием цифровых двойников.

Однако существующие исследования демонстрируют пока недостаточную интеграцию

между измерением показателей свойств, в частности оценкой драпируемости, и виртуальным моделированием на уровне одежды. Традиционные испытания материалов и измерения драпируемости дают стандартизированные и воспроизводимые результаты, но формы проб и условия моделирования не соответствуют проектированию и эксплуатации реальной одежды. Поэтому требуется интегрированный исследовательский путь, связывающий измерение материала, характеристику драпируемости, виртуальное моделирование и применение, ориентированное на одежду.

В соответствии с этим в данной главе рассматриваются основные достижения в области измерения показателей свойств текстильных материалов, оценки драпируемости и исследований цифровых двойников текстиля и одежды. Особое внимание уделяется традиционным системам испытаний, реальным и виртуальным устройствам измерения драпируемости, разработке цифровых двойников текстильных материалов, виртуальной симуляции одежды и методам валидации. В главе выявлены основные ограничения существующих исследований с точки зрения реалистичности испытаний и возможности применения параметров на этапах моделирования и конструирования одежды. Эти положения формируют теоретическую основу и проблемную направленность последующих глав.

1.1 Современное состояние исследований оценки и применения драпировочных свойств текстильных материалов

1.1.1 Методы характеристики и оценки драпируемости

Драпируемость ткани означает способность текстильного материала формировать трехмерную свисающую форму под действием собственного веса и граничных ограничений. Она связывает низконапряженное механическое поведение с видимым внешним видом одежды, включая мягкость, устойчивость силуэта, волнообразование складок, локальное расширение и общее формообразование [1,11,13]. Ранние оценки драпируемости в основном опирались на визуальные впечатления, такие как мягкость, жесткость, текучесть и полнота, однако такие опытные оценки существенно зависели от наблюдателя и условий наблюдения. Поэтому развитие оценки драпируемости можно понимать как переход от субъективного визуального суждения к механическому и геометрическому количественному описанию.

В традиционных исследованиях оценка драпируемости проводят по проекционной площади пробы, числу фалд, контурной кривой при заданных условиях опоры. Это означает, что традиционные исследования драпируемости преимущественно характеризуют морфологию драпировки на уровне пробы, а не полный внешний вид одежды, формирующийся в реальных условиях носки на фигуре человека [4–7,19,20]. Драпировочное поведение определяется несколькими низконапряженными физико-механическими свойствами, а не одним фактором. Изгиб влияет на способность материала свисать и формировать фалды; сдвиг воздействует на расширение контура и адаптацию пробы к

опорной поверхности; поверхностная плотность и толщина связаны гравитацией и общей устойчивостью. Ранние исследования заложили теоретическую и экспериментальную основу для описания драпируемости через энергию изгиба, гравитацию и объективные показатели физико-механических свойств, тем самым сформировав традиционную логику «испытание пробы материала - интерпретация драпировочного поведения - оценка результата испытания» [11–17].

Традиционная оценка драпируемости развивалась по двум основным направлениям. Первое направление косвенно оценивает склонность материала к драпировке при изгибе, второе - непосредственно измеряет результат для стандартной пробы при заданных условиях опоры. На рис. 1.1 показаны ранние приборы, использовавшиеся при переходе от оценки на основе изгиба к прямой оценке драпируемости ткани.

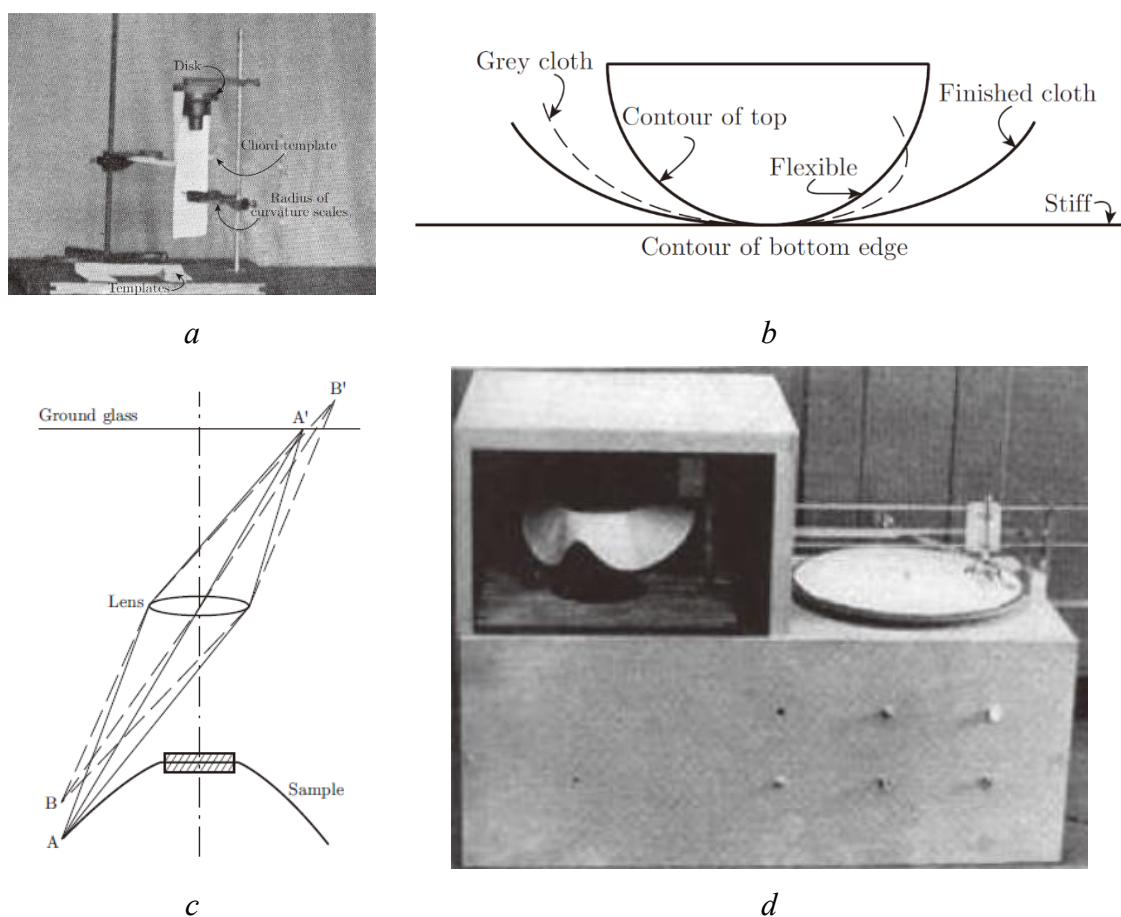


Рисунок 1.1 - Ранние приборы для оценки драпируемости ткани: *a* - драпометр Беллинсона, *b* - сравнение контуров сверху, *c* - оптический драпометр F.R.L., *d* - усовершенствованный драпометр F.R.L. [4, 158, 159]

Как показано на рис. 1.1, ранняя оценка драпируемости развивалась от наблюдения краевого контура к оптической проекции и измерению площади. На рис. 1.1,а показан

драпометр Беллинсона, в котором диск, хордовый шаблон и шкалы радиуса кривизны использовались для сравнения отклонения края подвешенного образца ткани. На рис. 1.1,b показано, что гибкие и жесткие ткани можно было различать по контурам нижнего края, хотя результат все еще в основном отражал двумерную деформацию. На рис. 1.1,c показан оптический драпометр F.R.L., в котором точки *A* и *B* на крае пробы проецировались как *A'* и *B'* на матовое стекло. На рис. 1.1,d показан усовершенствованный драпометр F.R.L. с автоматической записью контура и измерением площади. Эта последовательность показывает, что оценка драпируемости постепенно сместилась от качественного сравнения контуров к прямому геометрическому количественному измерению.

До того, как прямое измерение драпируемости стало общепринятым, оценка изгибной способности обеспечивала важный механический путь для интерпретации склонности ткани к драпировке. В консольном методе, предложенном Пирсом, ткань рассматривается как тонкая пластина, изгибающаяся под собственным весом. Измеряя проекционную длину, при которой свободный конец образца достигает заданного угла, можно рассчитать длину изгиба и жесткость при изгибе, тем самым преобразовав перцептивные оценки, такие как «мягкость» и «жесткость», в измеряемые механические величины [1]. Бут систематически описал конструкцию и принцип испытания прибора ShirleyStiffnessTester, что сделало процедуру консольного метода более понятной и стандартизированной [2]. Сравнив несколько методов испытания жесткости тканей, Эбботт показал, что консольный метод Пирса хорошо согласуется с субъективной оценкой жесткости и подтвердил роль измерения изгиба в переходе от чувственного опыта к объективной количественной оценке [3]. Однако этот метод фактически описывает двумерную изгибную реакцию пробы в виде полоски. Поэтому он может лишь косвенно характеризовать склонность ткани к драпируемости и остается недостаточным для описания сложного трехмерного контура драпировки.

Прямое измерение драпируемости было разработано на основе опоры круглого образца и анализа проекционного контура. Драпометр F.R.L. ввел оптическую проекцию пробы, а Cussik (Кьюсик) далее стандартизировал конструкцию прибора, расчет коэффициента драпируемости, метод площади и метод вырезания и взвешивания. Эти разработки сместили оценку драпируемости от вывода на основе жесткости к прямому количественному описанию морфологии [4–10].

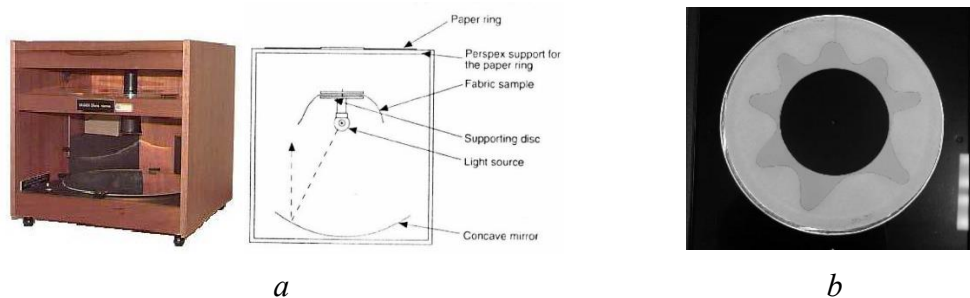


Рисунок 1.2 - Измерение драпируемости по Кьюсику: *a* - прибор, *b* - контур [4]

Как показано на рис. 1.2, метод Кьюсика измеряет драпируемость ткани путем проецирования контура круглого образца, поддерживаемого в центре. На рис. 1.2,а показан стандартизированный измерительный прибор, а на рис. 1.2,б показан типичный проекционный контур неподдерживаемой кольцевой области. На основе этого проекционного контура драпируемость ткани стали оценивать как отношение площадей, что сделало метод пригодным для сравнительных испытаний и стандартизации. Однако по мере развития исследований ученые постепенно пришли к выводу, что одного показателя отношения площади недостаточно для полного описания различий между сложными контурами драпированной пробы. Поэтому на основе системы Кьюсика традиционная оценка драпируемости постепенно была расширена за счет таких параметров, как число фалд, выраженность фалд, округлость и коэффициент расстояния до границы опоры. Вангелуве и Кикенс рассмотрели временную зависимость коэффициента драпируемости, показав, что одно статическое считывание не может полностью представлять драпировочное поведение [18]. Робсон и Лонг ввели число фалд, их выраженность и округлость с помощью системы анализа изображений, тем самым усилив характеристику деталей контура [19]. Коэффициент расстояния драпировки, предложенный Чонгом, дополнил ограничения показателей на основе площади с позиции среднего расстояния до границы [20]. Ян и Мацудайра дополнительно расширили измерение на колебательное движение и предложили динамический коэффициент драпируемости, что продвинуло традиционные исследования драпируемости от статической одночисловой характеристики к многопараметрическому и динамическому анализу на основе изображений [21]. В таблице 1.1 представлены репрезентативные традиционные методы оценки жесткости и драпируемости и их основные расчетные параметры.

Таблица 1.1 - Репрезентативные традиционные методы оценки жесткости и драпируемости тканей

Метод / автор	Основной дескриптор	Типичный метод расчета	Типичный прибор
Пирс (1930) [1]	Длина изгиба C ; жесткость при изгибе G	C рассчитывается по длине консоли и углу изгиба, а G дополнительно пересчитывается с учетом массы ткани	Прибор Shirley Stiffness Tester
Чу и соавт. (1950) [4]	DC	Проекционная покрытая	Оптический драпометр F.R.L.

		площадь кольцевой области / общая площадь кольцевой области	
Кьюсик (1968), метод пло- щади [5–7]	DC	$(A_p - A_s) / (A_o - A_s) \times 100\%$	Драпометр Кьюсика + измеритель площади
Кьюсик (1968), метод вырезания и взвешиван- ия [7]	DC	$(W_p - W_s) / (W_o - W_s) \times 100\%$	Драпометр Кьюсика + бумажное кольцо
Чонг (1998) [20]	DDR	Отношение, основанное на среднем расстоянии до границы и радиусе опоры	Система анализа изображений
Робсон и Лонг (2000) [19]	Округлость; число узлов; выраженность узлов	На основе площади контура, периметра и идентификации узлов	Автоматизированная система анализа изображений
Ян и соавт. (2001) [21]	Динамический коэффициент драпиру- емости	Динамические параметры определяются по изменению проекционной площади в последовательны- х кадрах	Динамический драпометр + система получения изображений

Как показано в таблице 1.1, традиционные методы оценки жесткости и драпируемости в целом развивались от оценки на основе изгиба к измерению проекционной морфологии, от однофакторной оценки к многопараметрической характеристике и от статического измерения к динамическому анализу изображений. Эти методы заложили основу стандартизации, количественного описания и сопоставимости исследований драпируемости. Однако их

результаты формируются при определенных формах проб, режимах опоры и методик измерения. Поэтому оценка драпируемости зависит от испытательных устройств и экспериментальных условий.

1.1.2 Эволюция устройств для испытания драпируемости

Согласно существующей литературе, эволюция устройств для испытания драпируемости в основном происходила в трех направлениях. Первое направление связано с изменением опорной структуры, то есть с переходом от регулярных геометрических опор к формам опоры с более выраженным направляющим воздействием на форму. Второе направление связано с изменением режима наблюдения, то есть с переходом от одиночного проекционного наблюдения к получению изображений, извлечению контура и трехмерной реконструкции. Третье направление связано с изменением объекта испытаний, то есть с расширением от стандартных плоских образцов к юбочным образцам, образцам одежды и объектам одежды, связанным с условиями опоры тела [19–23]. Эти изменения показывают, что устройства для испытания драпируемости развивались не только как измерительное оборудование, но и как экспериментальные системы, отвечающие на ориентированные на одежду исследовательские вопросы. В таблице 1.2 представлена эволюция формы опоры, режима получения данных, объектов испытаний и технических характеристик устройств для испытания драпируемости.

Таблица 1.2 – Эволюция методов оценивания драпируемости

Метод	Репрезентативное устройство или система	Форма опоры	Режим получения данных	Объект испытания
Механические испытания изгиба	Консоль Пирса / прибор Shirley [1,2]	Линейная краевая опора	Ручное считывание	Полосовой образец
Статическая драпируемость	Драпометр F.R.L. [4]	Центральная опора круглым диском	Оптическая проекция	Круглый плоский образец
Стандартизированное измерение DC	Драпометр Кьюсика [5–7]	Центральная опора круглым диском	Измерение площади, обводка или метод вырезания и взвешивания	Круглый плоский образец
Анализ изображений	Система получения изображений с дисковой опорой [19,20]	Центральная опора круглым диском	Сегментация изображения и извлечение контура	Круглый плоский образец
Динамическая	Динамический	Колеблющийся или	Непрерывное поле	Круглый плоский

драпируемость	драпометр [21]	вращающийся опорный диск	учениеизображений	оскийобразец
Трехмерноеизмерение	3D-драпометр / система 3D-сканирования [22]	Модифицированнаяилиавтоматизированнаяопора	3D-сканирование и реконструкция	Образец ткани или драпированный образец
Ориентация на одежду	3D-сканер тела / моделирование на основе манекена [23]	Опора манекеном или телом человека	Извлечение облака точек, сетки и 3D-параметров	Образец юбки или объект одежды

Как показано в таблице 1.2, эволюция устройств для испытания драпируемости включала изменения трех ключевых переменных: формы опоры, режима получения данных и формы пробы. Консоль Пирса и прибор Shirley преобразовывали изгиб полосы в измеряемые механические величины, но реакция была ограничена двумерной деформацией полосового образца. Драпометры F.R.L. и Кьюсика создали стандартизированную систему испытаний на уровне материала на опоре в виде круглого диска и измерения проекционной площади. Эта система повысила сопоставимость, однако объектом испытания оставалась круглая проба, а опорная граница была сильно упрощена. Анализ изображений, динамическая регистрация и 3D-сканирование увеличили объем и размерность информации о драпируемости, но большинство испытательных систем все еще сохраняло упрощенные формы образцов. Следовательно, ключевое ограничение, выявляемое этой эволюцией, заключается не в отсутствии измерительной технологии, а в сохраняющемся разрыве между стандартизированными условиями опоры и граничными условиями, связанными с одеждой. На рис. 1.3 показано сравнение контуров горизонтальных сечений платьев и проекций проб из одних и тех же тканей.

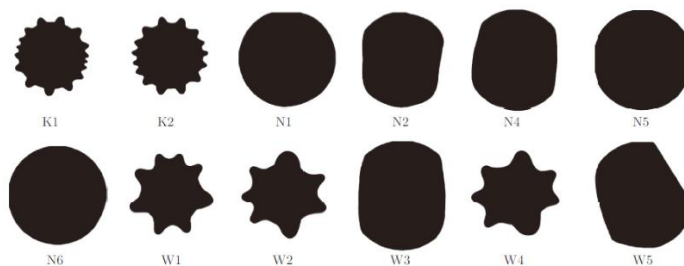
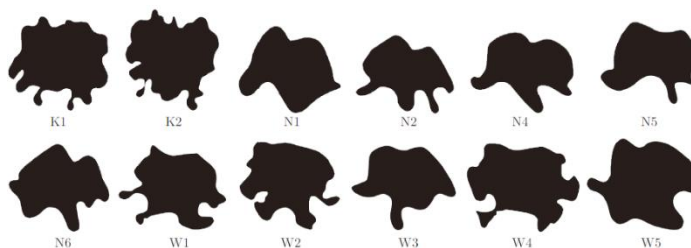
*a**b**c*

Рисунок 1.3 - Драпируемость проб ткани и одежды: *a* - платья на манекене, *b* - изображения драпированных проб (проекций) ткани, *c* – горизонтальные сечения (проекции) платьев на уровне низа [160]

Как показано на рис. 1.3, морфологические реакции пробы одежды не совпадают. Это сравнение показывает, что драпировка тканевого образца и драпировка одежды не являются эквивалентными объектами даже для сравнения. Поэтому исследования драпируемости, ориентированные на одежду, требуют уточнения опоры, которые отражали бы граничные ограничения реальной одежды.

Дальнейшее развитие устройств для испытания драпируемости можно понимать как

процесс параллельного развития стандартизированного сравнения материалов и морфологии одежды. С одной стороны, дисковая опора имеет преимущества по воспроизводимости и сопоставимости результатов и поэтому остается базовой формой для традиционного измерения DC также благодаря и огромной экспериментальной базе, накопленной в интернете в виде отчетов, статей, монографий. Эта база может быть использована в любой момент благодаря искусственному интеллекту. С другой стороны, анализ изображений, динамические испытания и 3D-сканирование расширили состав информации, включая площадь проекций, признаки контуров, временные изменения и пространственную геометрию [19–23]. Эта тенденция показывает, что испытательная система постепенно трансформировалась из простой опорной платформы в интегрированную систему «опора - получение данных - анализ».

1.1.3 Развитие виртуальных испытаний драпируемости

Потребность в виртуальных испытаниях драпируемости возникла из-за развития цифровых технологий проектирования одежды. В таких испытаниях реконструируют поведение тканей в виртуальном пространстве путем задания их параметров, геометрических параметров опоры, регулирования силы тяжести, площади контакта и граничных условий, а затем оценивают полученную морфологию пробы с помощью индексов, измеряемых в двумерном или трехмерном пространстве. Развитие этих методов происходит в мультидисциплинарном пространстве и тесно связано с физической симуляцией тканей, САД одежды, моделированием формы человеческого тела и системами виртуальной симуляции одежды [24,25,31–34]. В отличие от обычного испытания, виртуальные испытания драпируемости учитывают физическую реакцию при заданных материальных, опорных и граничных условиях. Цифровой двойник требует дополнительной проверки соответствия между виртуальным и реальным объектами. Поэтому виртуальные испытания драпируемости, создающие техническую основу для исследований драпируемости, автоматически не равны результату физических испытаний [25,27,39,40].

Исследования виртуальной драпируемости расширились от симуляции отдельной пробы ткани до интегрированной исследовательской схемы, включающей систему «ткань - опорная среда - одежда» [31–34]. По мере развития исследований их основное содержание постепенно расширилось до четырех взаимосвязанных этапов: построение модели материала, цифровая реконструкция опорных сценариев, формирование морфологии драпировки на основе симуляции, а также извлечение, сравнение и валидация результатов симуляции [27,29,30,35–40]. По сравнению с традиционными физическими испытаниями этот исследовательский путь уже не сосредоточен только на одном индексе. Он придает большее значение согласованности между параметрами материала, геометрической структурой, опорными границами и результатом симуляции. Его цель состоит в максимальном

приближении виртуальных результатов к физическим и их использовании для прогнозирования и проектных приложений.

Существующие исследования показали, что виртуальные испытания драпируемости обычно включают получение параметров, построение модели, симуляционный анализ и валидацию результата. Сначала необходимо получить параметры ткани, пригодные для построения виртуальной модели ткани. Затем в цифровой среде должны быть созданы модели проб ткани, изделий, человеческого тела или опорных объектов, а также заданы сила тяжести, контакт, трение и граничные ограничения. После этого в виртуальной среде формируют морфологию драпировки и из нее извлекают измеряемые выходные данные, такие как контур, площадь, число фалд, распределение складок, форма низа и силуэт. Наконец, виртуальные результаты сравнивают с результатами реальных испытаний или реальными образцами одежды для определения их соответствия по морфологии и характеру реакции [27,29,33–40]. На рис. 1.4 показана общая схема виртуальных испытаний драпируемости.

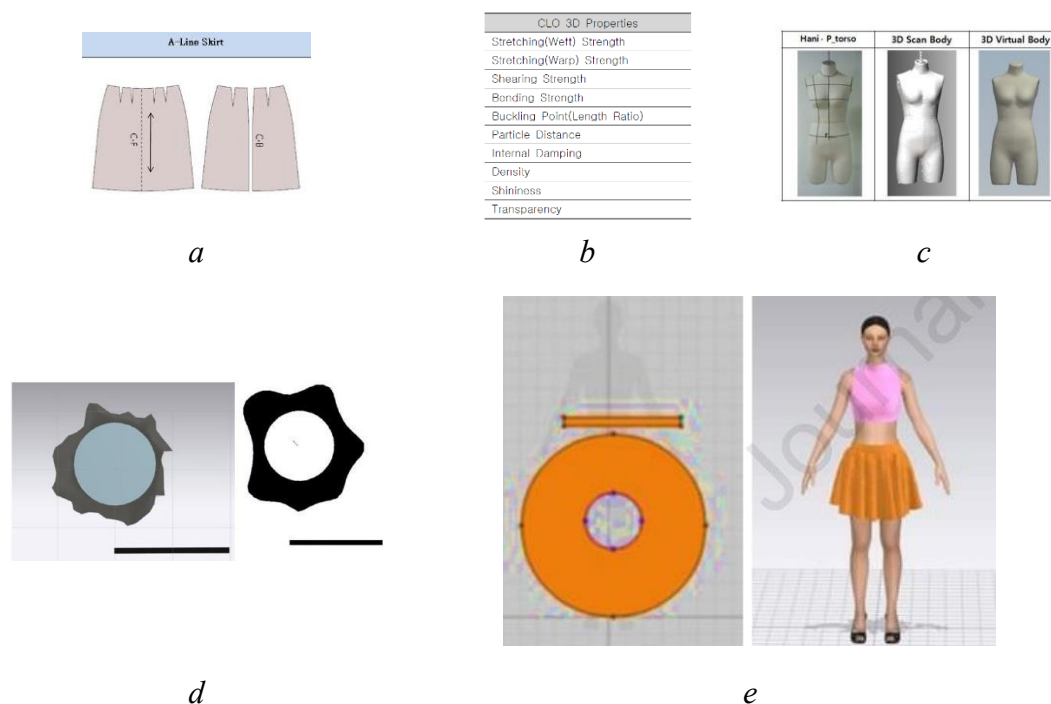


Рисунок 1.4 - Рабочий процесс виртуального испытания драпируемости: *a* - проектирование чертежей, *b* - параметры материала, *c* - создание аватара, *d* - извлечение контура, *e* - симуляция и отображение [151, 98]

Как показано на рис. 1.4, виртуальные испытания драпируемости следует понимать как рабочий процесс, а не как отдельную операцию программного обеспечения. Рис. 1.4,а–с показывает, что симуляция начинается с построения чертежей, ввода параметров материала и созданием аватара: эти этапы задают геометрическую, материальную и опорную основу виртуального испытания. Рис. 1.4,д–е показывает, что итоговый визуальный результат должен быть преобразован в измеряемые контуры или связанные с морфологией выходные данные.

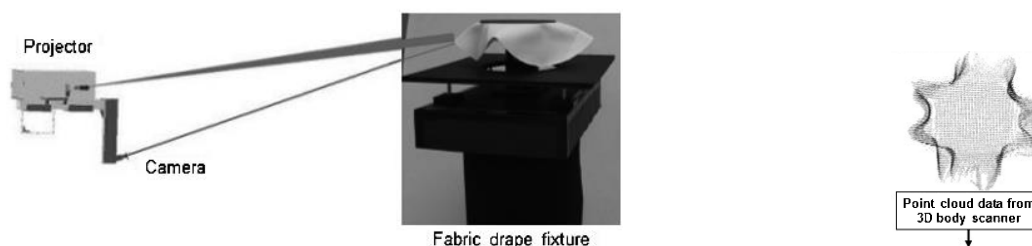
Следовательно, эффективность виртуального испытания драпируемости зависит не только от качества визуализации, но и от того, может ли быть установлена согласованная техническая цепочка между вводом параметров, условиями опоры, результатом симуляции и оценкой результата.

Таблица 1.3 - Структура и содержание разработанных процессов виртуального испытания драпируемости

Категория	Опорная среда	Объект исследования	Исследовательская функция	Оценочный выход
Платформенная основа [31,32]	Ранняя CAD-среда одежды	2D-чертеж и виртуальная одежда	Реализация функций одевания и драпировки	3D-отображение одежды
Платформенная основа [32]	Среда 3D-проектирования одежды	Виртуальная одежда	Построение среды 3D-проектирования одежды	Проектный рабочий процесс и внешний вид
Реально-виртуальное сравнение [35,37]	Виртуальная среда юбки	Юбка	Сравнение форм виртуальной и реальной юбки	Сравнение контура и формы низа
Реально-виртуальное сравнение одежды [37]	Система виртуального тела / юбки	Расклеванная юбка	Оценка драпировки в 3D-симуляции одежды	Сравнение контура, внешнего вида и формы драпировки
Параметрически ориентированное исследование виртуальной драпировки [38]	Модель тела + OptiTex	Виртуальная одежда	Влияние механических свойств на драпировку виртуальной одежды	Анализ контура, складок и реакции драпировки
Параметрически ориентированное реально-виртуальное сравнение [39]	Среда реально-виртуального соответствия	Проба ткани	Сравнение реальных и виртуальных результатов драпировки	Сравнение площади, узлов и формы складок
Ввод параметров и валидация силуэта [40]	Виртуальный аватар + CLO 3D	Виртуальная одежда	Влияние ввода материала на точность	Сравнение силуэта и драпируемости

			виртуального контура	сти
Валидация точности [29]	3D-сканирование + сравнение симуляции	Морфология одежды / драпировки	Точность симуляции и геометрическая согласованность	Реально-виртуальное сравнение на основе 3D-сканирования

Как показано в таблице 1.3, виртуальные испытания драпируемости развивались по нескольким методологическим маршрутам. Платформенно ориентированные исследования создали базовую среду для построения виртуальной одежды, примерки на аватаре и симуляции одевания [31–34]. Исследования реального-виртуального сравнения сместили внимание от визуальной генерации к согласованности контура, формы низа и морфологии драпировки [35–37]. Параметрически ориентированные исследования дополнительно изучали, как механические свойства материала и входные параметры программного обеспечения влияют на виртуальную драпировку и точность силуэта [38–40]. Исследования, ориентированные на точность, ввели 3D-сканирование и геометрическое сравнение для оценки согласованности между смоделированной и реальной морфологией драпировки [29]. Эта последовательность показывает, что виртуальные испытания драпируемости постепенно переходили от программного отображения к параметрически управляемым и валидационно ориентированным исследованиям. На рис. 1.5 показаны репрезентативные методы валидации, используемые для оценки согласованности между реальными и виртуальными результатами драпировки.



a

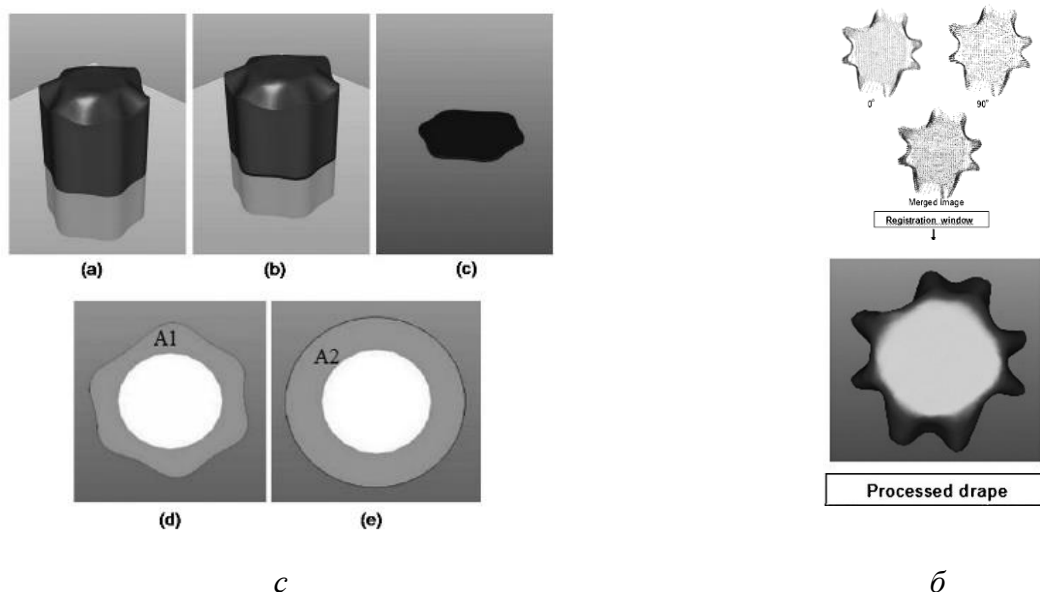


Рисунок 1.5 - 3D-валидация морфологии виртуальной драпируемости: *a* - оснастка для сканирования драпируемой пробы, *b* - обработка облака точек, *c* - извлечение коэффициента драпируемости [29]

Как показано на рис. 1.5, валидация на основе 3D-сканирования обеспечивает геометрический эталон для оценки того, согласуются ли виртуальные результаты драпировки с реальной морфологией драпировки. Рис. 1.5,а показывает, что физическое получение данных уже не ограничивается проекционной тенью или контуром сверху: вместо этого проектор, камера и драпировочная оснастка объединяются для регистрации реальной трехмерной формы круглого драпированного образца. Рис. 1.5,б показывает, что полученные данные должны быть зарегистрированы, объединены и обработаны, прежде чем они станут пригодной геометрической моделью. Это означает, что валидация зависит не только от съемки изображений, но и от качества реконструкции модели облака точек. Рис. 1.5,с показывает, что реконструированная драпированная поверхность может затем быть спроецирована и преобразована в измеряемые области для извлечения коэффициента драпируемости (DC). Поэтому валидация на основе 3D-сканирования формирует полную цепочку от физического получения драпировки, реконструкции облака точек и геометрической обработки до количественного извлечения параметров.

Эта логика валидации показывает, что виртуальные испытания драпируемости должны оцениваться с помощью реальных геометрических эталонов и измеряемых индексов, а не только визуального сходства. Однако рис. 1.5 все еще представляет круглый образец на стандартизированной опоре. Хотя 3D-сканирование повышает точность реального-виртуального геометрического сравнения, оно не полностью решает вопросы опоры на уровне одежды, контакта с телом, ограничений для швов или сложных конструкций

легал. Поэтому виртуальные испытания драпируемости должны переходить от валидации тканевых проб к валидации их морфологии, ориентированной на одежду.

Хотя существующие виртуальные исследования драпируемости расширились до объектов уровня одежды, репрезентативные случаи все еще в основном ограничены простыми юбками, особенно круглыми и расклешенными. Систематических исследований одежды с более сложными структурами и граничными взаимосвязями, например платьев, по-прежнему недостаточно [35–37].

Таким образом, виртуальные испытания драпируемости развиваются от генерации трехмерного внешнего вида к проверяемой симуляции физической реакции, от виртуальных испытаний тканевых проб к анализу морфологии на уровне одежды и от одного геометрического сравнения к многоиндексной оценке согласованности. Существующие исследования показали, что ввод механических параметров влияет на контур виртуальной одежды, формирование складок и точность силуэта, а 3D-сканирование и геометрическое сравнение обеспечивают более надежную основу для реального-виртуальной валидации [26,28,29,35–40]. Однако объекты валидации все еще часто ограничены стандартными образцами или простыми структурами юбок, а количественная система индексов для сложной морфологии на уровне одежды остается недостаточной.

Получение параметров материала является критическим предварительным условием виртуальных испытаний драпируемости, поскольку как симуляции тканевых образцов, так и симуляции на уровне одежды зависят от надежных физических входных данных. Существующие исследования обычно используют KES, FAST или поддерживаемые программным обеспечением инструменты для получения параметров материала, причем разные пути получения могут влиять на итоговый виртуальный контур и результат драпировки [27,38,40]. Поэтому получение параметров следует рассматривать как часть системы виртуальных испытаний драпируемости, которая должна включать ИИ-измерения параметров ткани и построения цифровых двойников текстильных материалов.

1.2 Современное состояние ИИ-измерения параметров ткани

1.2.1 Визуальное представление свойств ткани

Визуальное представление является исходной основой, через которую ИИ входит в исследования параметров ткани. Прежде чем свойства ткани могут быть оценены, интерпретированы или преобразованы, визуальные признаки тканей должны быть представлены в вычислимой форме. Текстура поверхности, поверхностная волнистость, состояние складок и контур драпировки являются наблюдаемыми признаками для суждения о характеристиках ткани. С развитием компьютерного зрения и анализа изображений

результаты такого наблюдения постепенно преобразуются в вычислимые признаки изображения и закономерности, что создает базу для интеллектуального распознавания на основе визуального представления.

Визуальное представление свойств ткани означает процесс описания, идентификации и вывода состояния поверхности, структурной организации, морфологической реакции и связанных свойств тканей посредством изображений, видео или многовидовых визуальных доказательств. Его следует понимать как промежуточный слой доказательств, соединяющий информацию об изображении и показатели свойств материала, а не как окончательный результат измерения параметров в строгом метрологическом смысле.

С точки зрения объектов исследования визуальное представление свойств ткани можно разделить на три уровня. *Первый уровень* касается непосредственно видимых структурных и поверхностных признаков, включая цвет, рисунок, текстуру, переплетение, направление нитей, шероховатость поверхности и блеск. *Второй уровень* касается интегральных свойств, где визуальные признаки объединяются с тактильными, драпировочными или другими описательными индексами для формирования более высокоуровневых результатов классификации и группировки. *Третий уровень* касается косвенных признаков, связанных с физико-механическими характеристиками, такими как воспринимаемая толщина, мягкость или плотность, жесткость, эластичность, ригидность и склонность к драпировке. Эти три уровня отражают, что видимость свойств ткани неодинакова. Такие признаки, как переплетение и поверхностная текстура, могут распознаваться по прямым визуальным сигналам, тогда как жесткость при изгибе, гриф и склонность к драпировке часто требуют вывода на основе морфологической реакции, динамической деформации или модельного рассуждения. Приведенные различия определяют границу визуального представления: оно может предоставлять доказательства для восприятия свойств, но его валидность зависит от типа визуальных доказательств и используемого механизма вывода.

Существующие исследования показывают, что визуальное представление стало важной основой интеллектуального распознавания и восприятия свойств ткани. Методы исследования продвинулись от анализа признаков отдельного изображения к интеграции многоканальных доказательств, интерпретации динамической реакции и ИИ-выводу свойств. База данных распознавания материалов, разработанная Беллом и соавторами, а также работа Шварца и Нишино о локальных визуальных атрибутах материалов показывают, что свойства материалов могут распознаваться визуальными системами, поскольку в изображениях существуют устойчивые и обучаемые поверхностные признаки [41,42]. В текстильной области такая исследовательская логика была конкретизирована в задачах распознавания переплетения, геометрической реконструкции, оценки динамических свойств, обнаружения дефектов и прогнозирования, связанного с грифом [43–55].

Визуально-языковые модели могут связывать доказательства изображения с

инструкциями на естественном языке и поддерживать zero-shot рассуждение о структурных признаках, относительных различиях и видимых атрибутах. Однако при отсутствии контролируемого получения данных, калибровки и валидации эти возможности все еще представляют визуальную интерпретацию, а не строгое измерение параметров [56–60]. Пример такого подхода приведен на рис.1.6.

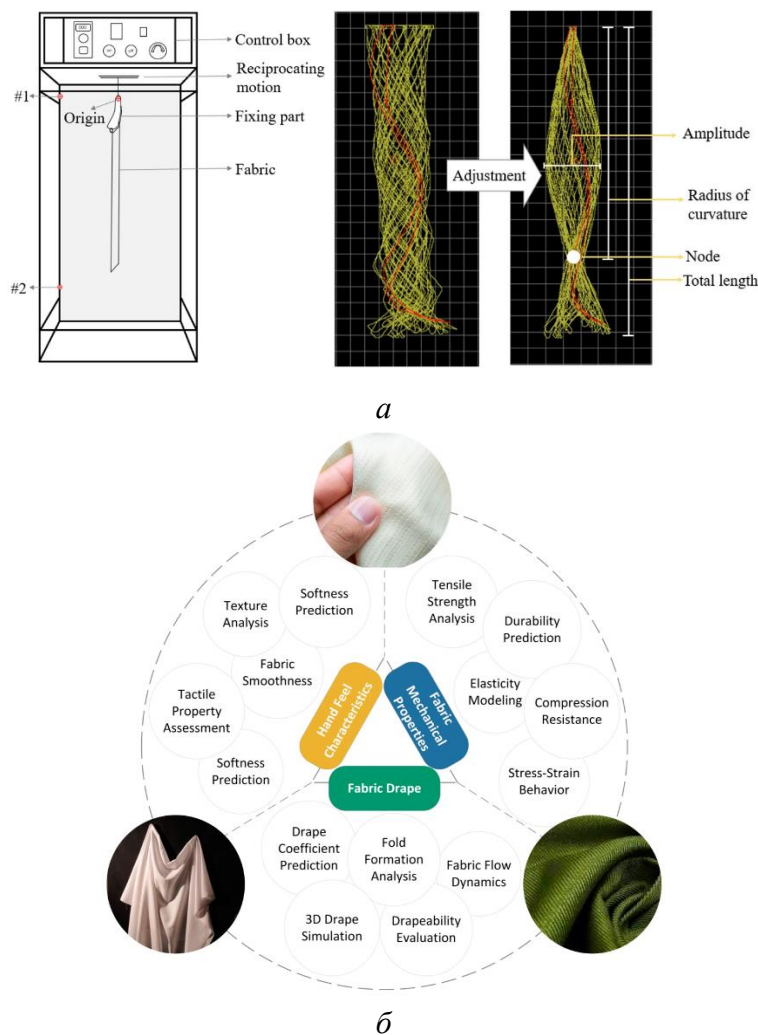


Рисунок 1.6 - Динамические визуальные доказательства и ИИ-вывод: *а* - динамическое измерение драпируемости, *б* - рамка ИИ-прогнозирования грифа [154, 54]

Как показано на рис. 1.6, визуальное представление свойств ткани расширилось от распознавания статической текстуры к динамической морфологической реакции и ИИ-выводу свойств. Рис. 1.6,а показывает, что свойства, связанные с драпировкой, могут быть представлены через изменение контура, реакцию на движение и морфологическую устойчивость во время динамического испытания, а не только через конечный статический контур. Такой тип доказательств особенно важен для свойств, таких как драпируемость,

гибкость и устойчивость при движении. Рис. 1.6,б показывает, что ИИ-вывод пытается связать визуальные доказательства с тактильным восприятием, механическим поведением, драпировочными характеристиками и приложениями, связанными с симуляцией. Поэтому динамические визуальные доказательства расширяют представление свойств ткани от видимых поверхностных признаков к интерпретации свойств на основе реакции. Однако такой тип вывода все еще зависит от выбора доказательств, структуры модели, калибровки и валидации и сам по себе не должен рассматриваться как строгое измерение параметров.

Первый тип визуальных доказательств - микроскопические и структурные доказательства. В изображениях ткани повторяющиеся текстурные узоры, ориентация нитей, геометрия переплетения, правила переплетения и локальная поверхностная волнистость могут давать прямые признаки для распознавания структуры ткани. Исследования Ванга и соавторов показали, что изображения ткани можно использовать для распознавания переплетения и оценки линейной плотности пряжи, раппорта переплетения и шероховатости поверхности. У и соавторы дополнительно продемонстрировали, что даже одно микроскопическое изображение может поддерживать реконструкцию геометрии на уровне нитей [46,47]. Эти исследования показывают, что объект визуального представления расширяется от плоской идентификации текстуры к структурной интерпретации.

Второй тип визуального представления - интегрированное моделирование атрибутивного пространства. По сравнению с распознаванием переплетения этот тип исследований объединяет несколько дескрипторов, связанных с внешним видом, драпируемостью, тактильным восприятием и физической реакцией. В этом исследовательском маршруте свойства ткани представлены не только текстурой или переплетением, но и взаимосвязью нескольких атрибутов.

Третий тип визуальных доказательств - морфологические и динамические доказательства реакции. Некоторые свойства ткани трудно считать непосредственно с одного статического изображения. Например, жесткость, поверхностная плотность, мягкость и склонность к драпировке обычно отражаются в том, как ткань деформируется, движется, мнется или стабилизируется при внешних условиях. Исследование Боумана и соавторов, оценивавшее жесткость и поверхностную плотность по видео ткани, вместе с работой Мамуна и соавторов по распознаванию переплетения ткани по видео показывает, что источник визуальных доказательств расширился от статических изображений к динамической пространственно-временной информации [48,49]. В этом направлении изображение больше не является только записью поверхностной текстуры, а становится доказательством реакции ткани при движении или граничных ограничениях (таблица 1.4).

Таблица 1.4 - Содержание направлений исследования и получаемые результаты

Типнаправления	Формавходныхданных	Основнаязада	Типичныйвы
----------------	--------------------	--------------	------------

		ча	ход
Общие исследования визуального распознавания материалов	Естественные изображения; локальные фрагменты изображений	Распознавание материалов; выявление локальных атрибутов материала	Категория материала; локальные визуальные атрибуты [41, 42]
Традиционный анализ изображений	Микроскопические изображения; изображения поверхности	Распознавание переплетения; подсчет нитей; анализ шероховатости	Раппорт переплетения; число нитей; шероховатость [43,47]
Глубокое визуальное распознавание	Стандартизированные изображения ткани	Классификация переплетений; обнаружение дефектов; распознавание тканей ручного ткачества; инспекция и аутентификация в реальном времени	Класс переплетения; класс дефекта; идентичность ткани [44,45,50–52, 55]
Реконструкция структурной геометрии и восприятие динамических свойств	Микроскопические изображения; видеоткани	Реконструкция структурной геометрии; оценка динамических свойств; распознавание узора по видео	Геометрия на уровне нитей; жесткость; поверхностная плотность; класс узора [46,48,49]
Обзоры и обобщения трендов	Синтез литературы и наборов данных	Обзор исследований прогнозирования свойств	Объекты исследования, типы методов и

		ткани и грифа	ограничения [54]
--	--	---------------	------------------

Как показано в таблице 1.4, визуальное представление свойств ткани развивалось от распознавания внешнего вида поверхности к реконструкции структурной геометрии, восприятию динамических свойств, обнаружению дефектов, прогнозированию, связанному с грифом, и открытой кросс-модальной перцепции. Это развитие показывает, что визуальные доказательства могут поддерживать не только распознавание категории ткани, а могут предоставлять косвенную информацию о структурной организации, деформационном поведении и воспринимаемых свойствах материала. Однако видимость разных свойств неодинакова. Такие признаки, как цвет, текстура, переплетение и локальные дефекты, обычно могут быть представлены непосредственно через визуальную информацию, тогда как толщина, мягкость, жесткость при изгибе и склонность к драпировке часто требуют вывода из косвенных или динамических визуальных доказательств. Поэтому визуальное представление может обеспечивать фундаментальную поддержку распознавания свойств ткани и восприятия параметров, но оно не может напрямую заменить процесс получения параметров, необходимый для приложений, ориентированных на симуляцию.

В целом существующие исследования демонстрируют важную роль визуального представления в распознавании и восприятии свойств ткани. Однако их результаты все еще в основном обслуживают задачи распознавания, классификации и косвенного вывода. Когда исследовательская цель смещается к получению параметров и вводу данных для симуляции, необходимо рассмотреть возможности ИИ для структурированного измерения параметров ткани. Этот вопрос ведет к обсуждению смены парадигмы в ИИ-измерении ткани.

1.2.2 Смена парадигмы в ИИ-измерении ткани

На основе исследований визуального представления ИИ широко применяют для распознавания свойств ткани, классификации и прогнозирования параметров. Однако с развитием исследований цифровых двойников и симуляционно-ориентированных исследований одежды цель ИИ в получении свойств ткани начала изменяться. Визуальное распознавание в основном отвечает на вопросы, что представляет собой ткань или как она выглядит, а получение параметров должно ответить на вопрос, какие параметры можно измерить и могут ли эти параметры поддерживать последующую симуляцию, валидацию и анализ, связанный с одеждой. Поэтому при переходе исследовательской цели от распознавания к получению параметров меняется и роль ИИ: он уже не является только инструментом визуальной классификации или регрессионного прогнозирования, а все чаще должен поддерживать интерпретацию параметров, структурированный вывод и проверку результата.

Ранние приложения ИИ в исследованиях текстильных материалов в основном были сосредоточены на классификации, распознавании и прогнозировании параметров. Типичные задачи включали распознавание типа ткани, классификацию структуры переплетения, обнаружение поверхностных дефектов, оценку класса грифа и регрессионную оценку некоторых механических параметров или показателей эксплуатационных свойств [44,45,48,50,53–55]. Например, Боуман и соавторы оценивали жесткость при изгибе и поверхностную плотность по видео ткани [48], Домингес-Эльвира и соавторы оценивали механику ткани по метаданным производителя для снижения стоимости получения параметров при цифровом моделировании одежды [53]. Систематический обзор Ту и соавторов также показывает, что с помощью ИИ можно сформировать четкую исследовательскую траекторию в прогнозировании свойств ткани и грифа в зависимости от сопоставления входа и выхода на основе существующих образцов и размеченных данных [54]. Поэтому такой маршрут правильнее понимать как классификационный data-driven или регрессионный проху подход а не как измерительный процесс в строгом смысле. На рис. 1.7 показаны data-driven регрессионные маршруты оценки свойств ткани.

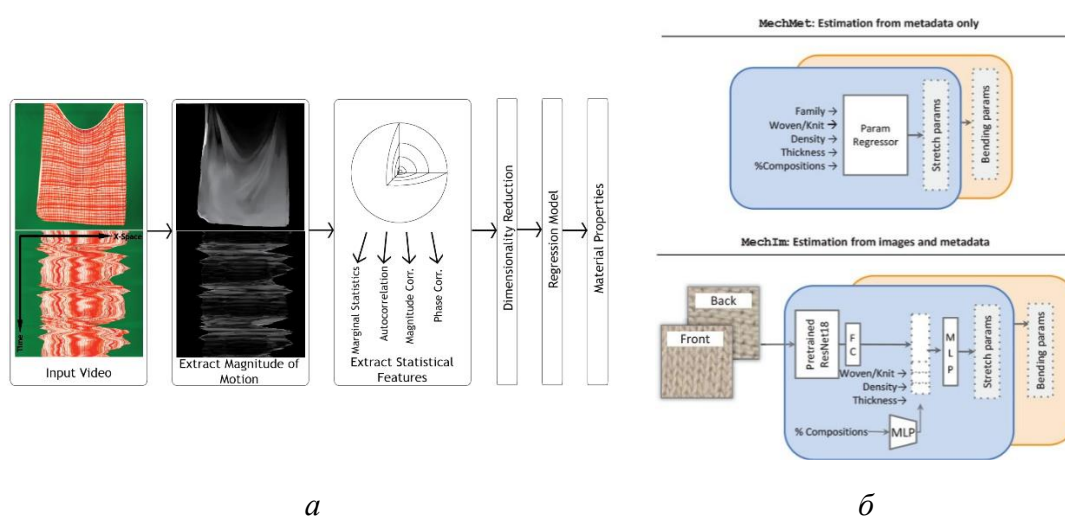


Рисунок 1.7 - Регрессионная оценка свойств ткани: *a* - регрессия на основе видео, *б* - вывод на основе метаданных [48, 53]

Как показано на рис. 1.7, ИИ-получение свойств ткани в основном следует data-driven регрессионному маршруту. Рис. 1.7,а показывает, что такие свойства ткани, как жесткость и поверхностная плотность, могут оцениваться по видео-доказательствам путем обучения связи между наблюдаемым движением ткани и ранее измеренными физическими значениями. Рис. 1.7,б показывает, что метаданные и описательная информация можно использовать для вывода относительно механики ткани. В обоих случаях ИИ следует применять после того, как сформирована экспериментальная референтная [44,45,48,53–55].

Когда исследовательская цель смещается к вводу данных для симуляции и построению цифрового двойника, ограничения прогнозно-ориентированной парадигмы становятся более

очевидными. Во-первых, выходные результаты таких методов обычно зависят от распределения обучающих данных и по сути являются результатами статистического соответствия, а не считыванием на основе явной измерительной логики. Во-вторых, их надежность обычно оценивают через ошибку обучения, тестовую ошибку или точность прогнозирования, а не через контролируемые входные условия, процессные ограничения и согласованность выхода. В-третьих, стабильность выходных данных может различаться между моделями ИИ, наборами данных и сценариями применения, что затрудняет прямое удовлетворение такими методами требований согласованности и проверяемости параметров в виртуальных испытаниях драпируемости, построении цифровых двойников и прогнозировании формы одежды [53,54]. Поэтому прогнозно-ориентированные методы являются полезными инструментами оценки, но пока не полностью эквивалентными измерительно-ориентированным методам получения параметров.

Этот сдвиг не ограничивается текстильной областью. В мультимодальных визуально-языковых моделях BLIP-2, LLaVA, InstructBLIP, GPT-4V и GPT4Vis продемонстрировали, что модели способны выполнять более открытые суждения и объяснения структурных признаков, относительных различий и проявлений атрибутов на изображениях при ограничениях задач на естественном языке [56–60]. В более широкой области материаловедения большие языковые модели также применяют для прогнозирования свойств, генерации гипотез и рассуждений о связи "структура-свойство" [61–65]. Эти исследования показывают, что роль ИИ расширяется от прогнозирования фиксированных меток к интерпретации и рассуждению об атрибутах в условиях заданной задачи (рис.1.8).

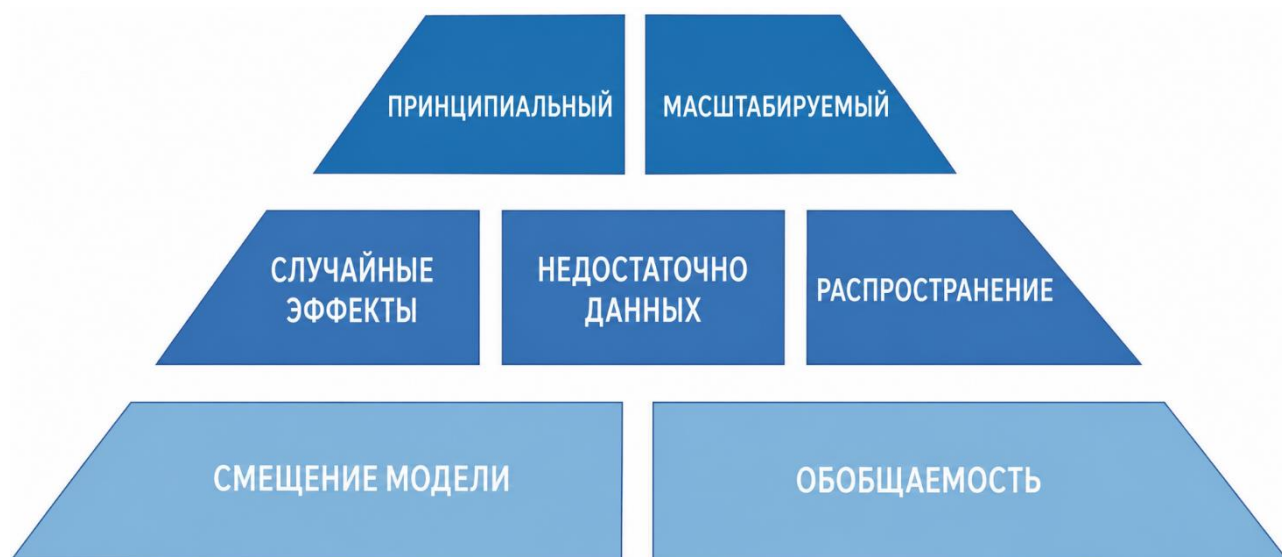


Рисунок 1.8 - Требования к ИИ-измерению на основе протокола [80]

Как показано на рис. 1.8, когда ИИ позиционируется как измерительно-ориентированная система, центральный вопрос не ограничивается только точностью прогнозирования,

требует контролируемых входных условий, учета смещений модели ИИ, достаточных и адекватных данных, обобщаемости между образцами и сценариями, а также оценки неопределенности и распространения ошибок. Перечисленные требования показывают, что ИИ-измерение следует рассматривать как контролируемый процесс, а не как изолированный выход модели. Для получения параметров ткани это означает, что стандартизированные визуальные доказательства, фиксированный протокол задачи, структурированные поля параметров, сравнение с физическими испытаниями и проверяемые выходы являются необходимыми условиями. Поэтому перспективное ИИ-измерение на основе протокола отличается от прежнего регрессионного прогнозирования не тем, что использует другой источник изображений, а тем, что встраивает ИИ в контролируемый и проверяемый рабочий процесс получения параметров.

Совокупность рис. 1.7 и 1.8 показывает, что различие между маршрутами ИИ-получения свойств ткани состоит в позиции, которую ИИ занимает в рабочем процессе получения параметров. Первый регрессионно-суррогатный маршрут в основном оценивает параметры после установления экспериментальной референтной системы: маршрут мультимодального рассуждения усиливает способность ИИ интерпретировать визуальные доказательства при ограничениях задачи. Второй маршрут, основанный на протоколе, дополнительно требует контролируемого входа, фиксированной структуры выхода, сравнения с физическим эталоном и оценки с учетом неопределенности. Следовательно, смена парадигмы в ИИ-измерении ткани по существу является переходом от *posthoc* статистической оценки к протоколно ограниченному и метрологически осознанному получению параметров. В таблице 1.5 показаны различия между регрессионной оценкой и ИИ-измерением на основе протокола.

Таблица 1.5 - Основные различия между регрессионной оценкой и ИИ-измерением

Аспекты	Data-driven регрессионная оценка	ИИ-измерение на основе протокола
Позиция ИИ в рабочем процессе	Завершающая часть эксперимента	Внутри рабочего процесса получения параметров
Основной вход	Числовые признаки, исторические базы данных, размеченные образцы	Контролируемые изображения, метаданные, фиксированный протокол задачи
Основная цель	Повысить эффективность аппроксимации и точность прогнозирования	Получать повторяемые, сопоставимые и проверяемые параметрические выходы
Форма выхода	Одночисловой прогноз или метка класса	Структурированные параметры, идентификация аномалий, подсказки для

		проверки
Требование к контролю входа	Относительно низкое	Высокое; требуется единый протокол съемки и аннотирования
Основной фокус оценки	Ошибка аппроксимации; точность классификации	Стабильный выход при контролируемых условиях и возможность последующей калибровки
Сценарий применения	Posthoc анализ; прогнозирование трендов; оптимизация процесса	Цифровое измерение; считывание параметров; ввод данных для цифровых двойников

Как показано в таблице 1.5, регрессионная оценка и ИИ-измерение на основе протокола различаются по позиции в рабочем процессе, требованиям к контролю входных данных, форме выхода и логике оценки. Регрессионная оценка в основном обучает связи вход-выход на существующих данных и поэтому подходит для posthoc анализа, прогнозирования трендов и оптимизации процесса. ИИ-измерение на основе протокола помещает ИИ внутрь рабочего процесса получения параметров и требует контролируемых визуальных доказательств, фиксированных определений задачи, структурированных выходных полей и проверяемых результатов. Этот сдвиг означает, что традиционные методы прогнозирования утратили ценность. Напротив, он показывает, что когда исследовательская задача входит в область построения цифровых двойников, симуляционно-ориентированного проектирования и прогнозирования формы одежды, ИИ должен перейти от общей оценки к контролируемому получению параметров.

Следовательно, роль ИИ в получении параметров ткани больше не ограничивается общим прогнозированием. При контролируемом протоколе, структурированном выводе и сравнении с физическим эталоном она начинает приближаться к функциональной логике измерительно-ориентированной системы. Как только такая роль установлена, метрологические вопросы точности, стабильности, прослеживаемости и неопределенности должны рассматриваться далее.

1.2.3 Метрологические основы ИИ-измерения

Когда ИИ используют для вывода параметров, то они начинают функционировать как измерительно-ориентированные параметрические инструменты. Поэтому ИИ-измерение ткани должно рассматриваться в более строгой рамке оценки достоверности. Согласно базовой логике метрологии, результат измерения должен быть связан с четко определенной

измеряемой величиной, контролируемым измерительным процессом и интерпретируемым выражением результата. Это означает, что оценка ИИ-системы не может оставаться только на уровне точности прогнозирования, функций потерь или общей производительности модели. Необходимо дополнительно рассмотреть, обладают ли выходные значения точностью, стабильностью, прослеживаемостью и выражением неопределенности.

Для измерительной системы ключевые вопросы обычно включают точность, повторяемость, воспроизводимость или стабильность, прослеживаемость и неопределенность. При передаче этих функций ИИ их базовый смысл сохраняется, но источники и формы проявления меняются. В традиционных приборах ошибки могут главным образом возникать из-за датчиков, настроек нагружения, условий калибровки и процедур оператора. В ИИ-измерении ткани ошибки могут одновременно возникать из входных изображений, состояния образца, освещения, расстояния съемки, протокола промпта, версии модели ИИ, стратегии интеграции выходов и механизма интерпретации. Поэтому, хотя ИИ-измерение не выглядит как обычный аппаратный инструмент, а является **бесконтактным неинструментальным средством**, его следует оценивать согласно требованиям достоверности, связанным с измерением. На рис. 1.9 показаны основные измерения для проверки достоверности ИИ-измерения ткани.

Ключевые аспекты достоверности ИИ-измерения ткани



Рисунок 1.9 - Оценка достоверности ИИ-измерения ткани

Как показано на рис. 1.9, достоверность ИИ-измерения ткани зависит от четырех взаимосвязанных измерений:

1) точность определяет, насколько ИИ-выходы близки к физическим референтным значениям;

2) стабильность определяет, может ли система производить согласованные результаты при повторных запусках, контролируемых входных условиях или изменениях версии модели;

3) прослеживаемость определяет, может ли выход быть связан с определенными измеряемыми величинами, физическими испытаниями, входными доказательствами, версиями модели и проверяемыми записями;

4) неопределенность определяет, могут ли быть идентифицированы источники, диапазоны и последующее распространение ошибок. Эти измерения должны оцениваться совместно, потому что численно точный выход все же может быть нестабильным, непрослеживаемым или непригодным для симуляции и прогнозирования формы одежды.

Точность и стабильность образуют первые два требования к ИИ-измерения ткани. Точность оценивает отклонение между ИИ-выходами и физическими референтными значениями с помощью таких индексов, как абсолютная ошибка, относительная ошибка, RMSE, MAE или MAPE. Однако точность не следует интерпретировать только как одноразовую численную близость, поскольку необходимо учитывать систематическое смещение и последующие эффекты в симуляции. Стабильность оценивает, остаются ли выходы согласованными при повторной итерации, контролируемых комбинациях изображений, разных партиях проб и изменениях версии модели ИИ. Поэтому ИИ-измерение нельзя оценивать только по одному точному результату.

Прослеживаемость и неопределенность далее определяют, могут ли ИИ-выходы войти в достоверный измерительный процесс. Прослеживаемость требует связи результата с входными доказательствами, определениями параметров, физическими эталонными испытаниями, версиями модели и записями протокола. Неопределенность касается источников ошибок, связанных с получением изображений, состоянием образца, ошибкой референтного значения, чувствительностью prompt, дрейфом версии модели и постобработкой. Эти факторы показывают, что ИИ-измерение должно оцениваться как контролируемая система, а не как изолированный ответ модели.

Калибровка и валидация являются механизмами, связывающими измерения достоверности с физическими референтными значениями. Калибровка уменьшает систематическое отклонение между ИИ-выходами и реально измеренными значениями, устанавливает корректирующие связи между группами параметров и повышает применимость ИИ-выходов для симуляции или построения цифрового двойника. Валидация определяет, могут ли откалиброванные или некалиброванные выходы поддерживать решение последующих задач моделирования, таких как построение виртуальной ткани, симуляция

драпируемости, генерация контура одежды и прогнозирование формы одежды. Это означает, что ИИ-измерение следует оценивать не только на уровне параметров, но и на уровне результатов симуляции и прикладных результатов.

Таблица 1.6 - Метрологические элементы ИИ-измерения текстиля

Элемент	Основное содержание	Типичное проявление в текстильных сценариях
Оценивание измеряемой величины	Четкая спецификация объекта измерения и формы выхода	Интервал жесткости при изгибе, уровень анизотропии, параметры тренда драпировки
Контролируемый вход	Стандартизация образца, освещения, фона, вида и расстояния	Стандартизированные фотографии ткани, единая ROI, фиксированный протокол съемки
Калибровочная цепочка	Соответствие между ИИ-выходом и физическим эталоном	Согласование с данными KES, FAST, Кьюсика, толщиномера и GSM
Прослеживаемость	Прослеживаемость данных, модели и рабочего процесса	Полные записи исходных изображений, шаблонов протокола, версий модели и скриптов постобработки
Оценка неопределенности	Идентификация и количественная оценка источников ошибок	Флуктуации повторного inference, межпартийный дрейф, риск вне выборки
Метрики валидации	Точность, стабильность и согласованность	MAPE, MAE, RMSE, корреляционный анализ, сравнение согласованности
Механизм проверки	Сотрудничество человека и ИИ, логика отказа от вывода	Выходы с низкой уверенностью передаются на ручное повторное испытание
Граница применимости	Условия применения и условия отказа	Ограниченное применение для сильно отражающих, прозрачных или сильно смятых тканей

Как показано в таблице 1.6, ИИ-измерение текстиля требует точного результата бесконтактного неинструментального оценивания, его определенного вида, контролируемого входа, калибровочной цепочки, прослеживаемых записей, оценки неопределенности, метрик валидации, механизма проверки и границ применимости. Эти элементы определяют, что ИИ-системе разрешено делать заключение о сопоставимости входных доказательств, их связи с физическими референтными значениями и условиях валидности. Без этих элементов результаты ИИ-измерения будут ближе к эмпирическим прогнозам, чем к строгим результатам измерения.

В совокупности рис. 1.9 и таблица 1.6 описывают базовую метрологическую логику ИИ-измерения ткани. Рис. 1.9 определяет измерения достоверности, которым должно соответствовать ИИ-измерение. Таблица 1.6 организует необходимые элементы в измерительно-ориентированную структуру контролируемого цифрового измерительного процесса, включающего получение доказательств, определение протокола, структурирование выхода, калибровку, прослеживаемость, оценку неопределенности и валидацию.

Следовательно, ИИ-измерение следует понимать как системный метод, а метрологическая основа ИИ-измерения ткани заключается в преобразовании неограниченных возможностей модели к контролируемому получению параметров.

1.3 Современное состояние исследований цифровых двойников текстиля и одежды на основе 3D-моделирования

1.3.1 Построение цифрового двойника текстильного материала

Суть цифрового двойника заключается в преобразовании реального поведения ткани при низконапряженных механических условиях в параметризованную виртуальную материальную систему, которую можно вызывать, рассчитывать и проверять в трехмерной среде [85–89]. В отличие от обычного трехмерного моделирования поверхности, цифровой двойник представляет деформируемое материальное тело, морфология которого изменяется под действием силы тяжести, граничных ограничений, контакта и наложенных на него ограничений. Оценка цифрового двойника ткани, помимо визуальной реалистичности отрендеренной ткани как таковой, должна включать оценку поведенческих реакций, сопоставимых с реакциями реальной ткани при соответствующих физических и граничных условиях [90–98].

Существующие исследования показывают, что виртуальное построение двойника ткани зависит от физически осмысленного набора параметров. Толщина и поверхностная плотность задают геометрический масштаб и вес; параметры растяжения описывают направленное удлинение; изгибные и сдвиговые параметры влияют на складки, мягкость контура и адаптацию поверхности; сжатие и трение влияют на контакт, устойчивость складок и посадку одежды на тело. Без этих входов виртуальная одежда может выглядеть визуально правдоподобной, но будет слабой с точки зрения инженерной достоверности и переносимости [85–98]. На рис. 1.10 показана роль механических параметров ткани и проблемы их реализации в 3D-симуляции одежды.

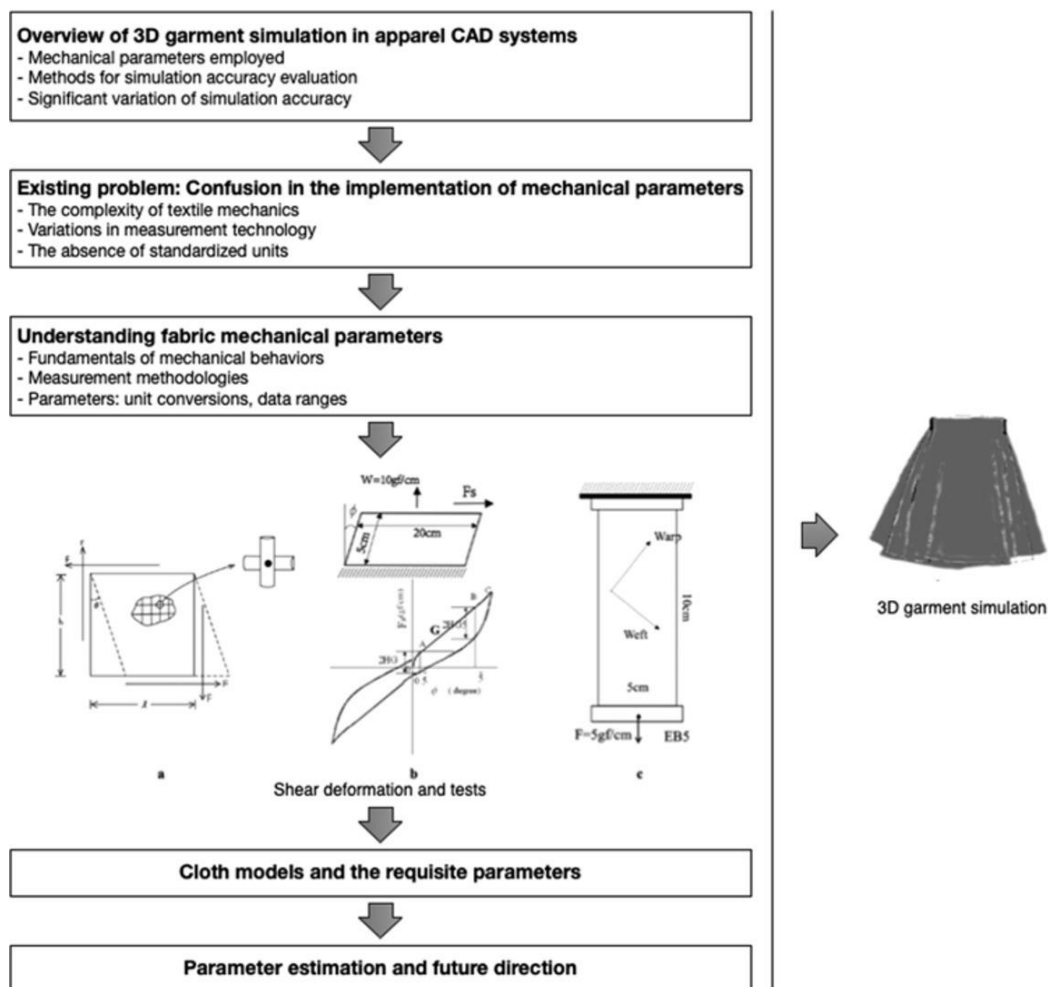


Рисунок 1.10 - Параметры ткани в 3D-симуляции одежды [97]

Как показано на рис. 1.10, механические параметры ткани составляют основу 3D-симуляции одежды. На точность симуляции влияют вид ткани, сложность механики, используемая технология измерения и наличие единых единиц или правил преобразования. Нижняя часть рис. 1.10 дополнительно показывает, что каждый параметр должен интерпретироваться через его поведенческий смысл, метод измерения, преобразование единиц и пригодный диапазон данных, прежде чем он может быть введен в модель цифрового двойника ткани. Поэтому построение цифрового двойника является параметрически опосредованным процессом, включающим измерение, стандартизацию, преобразование, виртуальное назначение и валидацию [97]. В таблице 1.7 представлены основные категории параметров, методы получения и роли моделирования при построении цифровых двойников. Таблица 1.7 - Применение показателей свойств тканей в виртуальном моделировании

Категория параметров	Типичный метод получения	Основная роль в виртуальном моделировании
Толщина;	Толщиномер; испытание GSM	Определяют собственный

поверхностная плотность		вес, объемное впечатление и базовые инерционные характеристики
Показатели растяжения	KES, FAST, одноосные / двухосные испытания растяжения	Определяют растяжимость по основе, утку и косому направлению, локальную деформацию и склонность прилегать к телу
Показатели изгиба	KES, испытание длины изгиба, консольный метод	Определяют жесткость складок, мягкость низа и склонность к драпировке
Показатели сдвига	KES, FAST	Определяют угловую деформацию и торсионную адаптацию на сложных криволинейных поверхностях
Показатели сжатия и поверхностного трения	KES, испытание трения	Влияют на межслойный контакт, состояние складывания и устойчивость при носке
Драпируемость	Дисковое / цилиндрическое испытание драпировки, анализ изображений, 3D-сканирование	Связывают параметры материала с результатами внешнего вида, такими как внешний контур, число узлов и проекционная площадь

Как показано в таблице 1.7, входные данные для цифрового двойника ткани представляет собой многоуровневую систему параметров. Эти параметры не имеют одинаковых функций в моделировании и не могут рассматриваться как взаимозаменяемые индикаторы. Поэтому построение цифрового двойника требует проверки того, могут ли эти параметры быть выражены в совместимой с программным обеспечением и физически интерпретируемой форме [85,90–98]. Это также объясняет, почему одна и та же ткань может давать разные результаты симуляции на разных трехмерных платформах: различия могут возникать из-за способа определения параметров, масштаба ввода, преобразования единиц и интерпретации модели материала, а не только из-за геометрии изделия [91–97].

Первый шаг от реальной ткани к цифровому двойнику - стандартизированное получение физических параметров. Системы измерения ткани, представленные KESKawabata, обеспечивают относительно полный маршрут измерения изгибных, сдвиговых, растяжимых, поверхностных и компрессионных свойств и поэтому широко используются в исследованиях

виртуальной одежды и построении материальных баз данных [85,90–92,97]. Системы FAST, коммерческие системы измерений, однофакторные испытания изгиба и драпируемости, а также методы измерения с помощью изображений также используют для получения параметров виртуальной симуляции [93–98]. Однако существующие исследования показывают, что разные испытательные системы не являются непосредственно взаимозаменяемыми. Они различаются по способу определения измеряемой величины, размеру проб, состоянию нагружения, единице выхода и формату данных. Следовательно, получение численного параметра не обязательно означает, что его можно напрямую ввести в трехмерную 3D платформу, и не гарантирует, что полученный виртуальный материал будет иметь реалистичное драпировочное поведение [91–97].

Второй ключевой вопрос - сопоставление между экспериментальными параметрами и виртуальными параметрами материала. Во время физических испытаний можно получить кривые "нагрузка - удлинение", "сдвиговое усилие - угол" или прямые значения, такие как толщина и поверхностная плотность. Напротив, для симуляционных платформ необходимы конкретные численные значения, такие как жесткость при изгибе, жесткость при сдвиге, сопротивление растяжению, плотность, трение и демпфирование. Эти две группы представления данных изначально не эквивалентны, поэтому часто требуется аппроксимация, преобразование, нормализация, настройка диапазона или эмпирическая калибровка. Данная проблема особенно важна для тканей, потому что анизотропия по основе, утку и диагонали влияет на результаты. По этой причине существующие исследования сосредоточены на более полной характеристике материала и тех параметров, которые специфичны для интерфейсов платформ [86–98].

Помимо сопоставления параметров, построение цифрового двойника также включает решение проблемы масштабирования и представление результата. При испытаниях реальных и виртуальных проб они могут быть сравнены по DC, проекционной площади, числу складок, внешнему контуру или трехмерной геометрии. В готовом изделии поведение материала дополнительно опосредуется конструкцией лекал, шовными связями, опорой тела и граничными условиями [90,96–98]. Это различие означает, что цифровой двойник может рассматриваться и как независимый уровень ткани, и как материальная основа цифрового двойника одежды: первый фокусируется на получении, сопоставлении и представлении параметров в виртуальной среде, а второй требует рассмотрения взаимодействия этих параметров с лекалами, швами, фигурой и сценариями носки для формирования внешнего вида готового изделия.

В целом исследования цифрового двойника сформировали относительно ясную методологическую цепочку: физические испытания задают параметры материала; сопоставление параметров и виртуальное назначение преобразуют измеренные данные в вычислимую модель материала; численная симуляция генерирует реакции драпировки и

внешнего вида; реальное-виртуальное сравнение оценивает, соответствует ли виртуальный материал реальному текстилю [85–98]. Однако это направление исследований все еще имеет три ограничения. Во-первых, механизмы сопоставления параметров между различными испытательными системами и программными платформами остаются недостаточно унифицированными [91–97]. Во-вторых, существующие исследования часто акцентируют связь между вводом параметров и визуальным выходом, тогда как прозрачность и интерпретируемость промежуточной модели материала обсуждаются недостаточно [86,87,95]. В-третьих, цифровой двойник на уровне пробы ткани не автоматически образует цифровой двойник на уровне одежды. Поэтому конструкционная основа цифровых двойников тканей должна быть далее связана с технологией трехмерной виртуальной симуляции в швейной инженерии и методами валидации цифровых двойников одежды.

1.3.2 Трехмерная виртуальная симуляция одежды

Традиционные двумерные САД-системы одежды эффективны при построении лекал, градации и раскладках, но окончательная посадка, силуэт, распределение припусков и состояние внешнего вида изделия надо оценивать в трехмерном пространстве. Поэтому по мере смещения фокуса швейной инженерии от вопроса правильности построения лекал к вопросу поведения изделия на теле возникли необходимые компоненты цифровизации одежды: трехмерное моделирование фигур, генерация одежды, виртуальное стачивание и симуляция материала [81–84,99–107].

В швейной инженерии платформа 3D-виртуальной симуляции обычно выполняет несколько ключевых функций. Во-первых, она создает цифровой объект человеческого тела, как измеряемой и параметризуемой пространственной опорой для загрузки одежды и оценки посадки. Во-вторых, она поддерживает преобразование двумерных деталей лекал в трехмерную одежду посредством размещения лекал, виртуального стачивания, симуляции одевания и динамического решения. В-третьих, она связывает параметры материала с силой тяжести, так что одежда становится не статической геометрической оболочкой, а деформируемым объектом с физической реакцией. В-четвертых, она позволяет извлекать, сравнивать и использовать результаты симуляции для структурной коррекции или оптимизации лекал. На рис. 1.11 показано преобразование двумерных деталей лекал в трехмерную одежду в процессе виртуального прототипирования.



Рисунок 1.11 - Преобразование одежды из 2D в 3D: *а* - 3D-виртуальная одежда, *б* - вид 2D-лекал [106]

Как показано на рис. 1.11, трехмерная одежда формируется через организацию двумерных деталей лекал, виртуальное стачивание, размещение аватара, назначение материала и динамическую симуляцию. Эта связь объясняет, почему 3D-виртуальная симуляция одежды принципиально отличается от обычного рендеринга: смоделированное изделие должно сохранять структурную связь со своими деталями лекала. Если такая связь отсутствует, виртуальная одежда может выглядеть визуально правдоподобной, но не может поддерживать корректировку лекал, инженерную обратную связь или валидацию цифрового двойника.

После создания одежды достоверность его виртуальной формы зависит от точности симуляции материала. Существующие исследования обычно классифицируют методы виртуальной драпируемости и анимации одежды на геометрические, физически основанные и гибридные методы [83,84]. *Геометрические методы* акцентируют визуальный результат и вычислительную эффективность; *физически основанные методы* рассматривают одежду как деформируемое тело с массой, упругостью, изгибом, сдвигом и контактными реакциями; *гибридные методы* пытаются сбалансировать скорость вычислений и физическую правдоподобность [85–89]. Растущее внимание к этим механизмам показывает, что достоверность виртуальной одежды определяется не одной визуальной реалистичностью, а тем, воспроизводит ли она разумные эффекты формообразования при заданных параметрах материала, силе тяжести, контакте и граничных условиях.

В последних исследованиях симуляция материала также была связана с оптимизацией чертежей, потому что симуляция одежды должна поддерживать обратный анализ формы одежды, генерацию двумерных деталей лекала из трехмерной геометрии и корректировку

чертежей согласно параметрам, связанным с тканью. Это развитие изменяет функцию 3D-симуляции одежды от визуального прототипирования к инженерной обратной связи. На рис. 1.12 показано развитие от 3D-симуляции одежды к разворачиванию поверхности и обратной связи для оптимизации лекал.

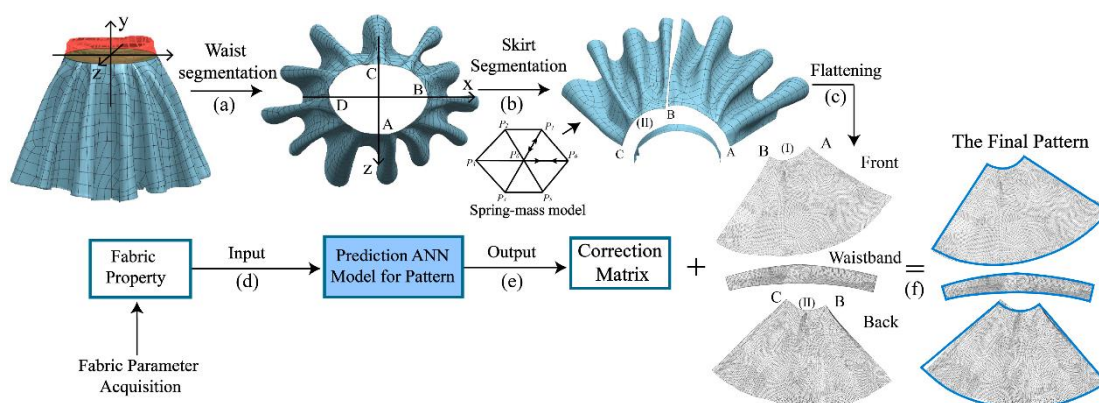


Рисунок 1.12 - Разворачивание поверхности и оптимизация лекал [157]

Как показано на рис. 1.12, 3D-симуляция одежды может быть дополнительно связана с изменением исходных чертежей через сегментацию поверхности, ее разворачивание на плоскости, ввод параметров ткани и коррекционное моделирование. Рис. 1.12,а–с показывает, что смоделированная трехмерная поверхность изделия может быть преобразована в форму, связанную с двумерным чертежом, что обеспечивает путь от пространственной морфологии обратно к плоской конструкции. Рис. 1.12,д–ф показывает, что параметры ткани могут быть введены в процедуры прогнозирования и коррекции для получения оптимизированного итогового лекала. Схема показывает, что 3D-симуляция одежды может поддерживать обратную инженерию от смоделированной геометрии одежды к корректировке чертежей, что важно для цифровых двойников одежды, поскольку этот процесс связывает свойства материала, морфологию виртуальной одежды и коррекцию параметров чертежей в одной технической цепочке.

В целом технология 3D-виртуальной симуляции обеспечивает платформенную основу для цифровых двойников одежды. Она позволяет интегрировать человеческое тело, детали лекал, текстильные материалы, виртуальное стачивание, силу тяжести, контакт и выходы симуляции в единую цифровую среду. Эффективное использование 3D-симуляционной платформы требует согласованности параметров, структурной прослеживаемости, валидности реакции материала и реальной-виртуальной проверки. Установление статуса цифрового двойника далее зависит от полноты ввода параметров, структурного соответствия, реакции симуляции и рамки валидации.

1.3.3 Валидация цифровых двойников текстиля и одежды

Ключевой вопрос генерации цифрового двойника заключается в том, может ли он обеспечить проверяемое соответствие с реальным объектом по параметрам, морфологии и реакции. Без валидации трехмерная модель может рассматриваться только как цифровое представление или результат симуляции, а не как цифровой двойник в строгом смысле. Поэтому валидация и оценка являются необходимыми условиями для определения исследовательской валидности виртуального объекта [111–113].

Для исследований текстиля и одежды согласованность реального и виртуального объектов включает как минимум три уровня:

1) первый уровень включает проверку параметрической согласованности, то есть соответствуют ли параметры виртуального материала, размерные параметры и структурные параметры реальному объекту;

2) второй уровень включает проверку морфологической согласованности, то есть демонстрируют ли контур, площадь, число узлов, складки, локальные области и общий силуэт сопоставимое геометрическое сходство;

3) третий уровень включает проверку согласованности реакции, то есть проявляют ли реальные и виртуальные объекты сходные тренды и паттерны реакции при изменении материала, лекала или условий опоры.

Следовательно, валидация цифрового двойника представляет собой многоуровневый процесс оценки, включающий входные параметры, видимую морфологию и поведенческую реакцию [114–120]. В таблице 1.8 представлены основные уровни валидации и индексы для цифровых двойников текстиля и одежды.

Таблица 1.8 - Основные уровни и индексы валидации цифровых двойников текстиля и одежды

Уровень валидации	Типичный объект сравнения	Распространенный подход или индекс оценки
Параметрическая согласованность	Параметры материала, размерные параметры, структурные параметры, связи сборки	Ошибка параметров, отклонение, корреляция, калибровочное сравнение
Морфологическая согласованность	Контур, площадь, число узлов, складки, силуэт, ROI	IoU, Dice, отклонение границы, различие площади, различие узлов, SSIM, наложение heat-map
Согласованность реакции	Тренды результата, вызванные изменением материала, структуры и	Согласованность трендов, сопоставление кривых реакции, оценка

	условий опоры	эквивалентной реакции, ошибка прогнозирования параметров формы
--	---------------	--

Как показано в таблице 1.8, разные уровни валидации требуют разных объектов сравнения и индексов. Параметрическая согласованность оценивается через ошибку, отклонение, корреляцию и калибровочное сравнение. Морфологическая согласованность оценивается с помощью индексов, основанных на контуре, площади, складках, силуэте и ROI. Согласованность реакции оценивается через сопоставление трендов, сравнение кривых реакции, оценку эквивалентной реакции и ошибку прогнозирования.

1.4 Исследовательские пробелы и постановка проблемы

1.4.1 Ограничения традиционных методов испытания драпируемости

Традиционные методы испытания драпируемости задают стандартизированные формы проб, условия опоры (стенда) и правила расчета для сравнения жесткости ткани, коэффициента драпируемости DC, количества складок, характеристик контура и низконапряженных реакций. Их ценность заключается в воспроизводимости и сопоставимости на уровне материала, однако, когда объект исследования смещается от оценки на уровне ткани к анализу формообразования на уровне одежды, их применимость становится ограниченной [123–127].

Первое ограничение заключается в несоответствии между стандартными пробами и реальными структурами одежды. Традиционные испытания обычно используют полосовые, круглые или другие регулярные плоские пробы, тогда как форма одежды зависит от швов, способов соединения, направления нитей, ориентации кроя и локальных конструктивных ограничений. Ху, Чунг и Ло показали, что параметры шва могут изменять драпировочное поведение ткани, а Демир и Балджи Килич дополнительно продемонстрировали влияние типа стежка и направления шва в условиях динамической драпировки [121,130]. Орзада, Мур и Коллиер установили, что крой с отклонением от долевой влияет как на драпировку ткани, так и на драпировку одежды, а метод крестообразного образца Суна был предложен для отражения различий основы и утка, которые невозможно уловить испытанием проб, раскроенных в одном направлении [122,127]. Эти исследования показывают, что результаты драпируемости тканевой пробы нельзя напрямую переносить на многодетальные виды одежды, если структурные факторы исключены.

Второе ограничение связано с условиями опоры. Классические испытания драпируемости в основном используют регулярные опоры, такие как консоль или диск. Эти опоры подходят для стандартизированного сравнения, но они упрощают границы, связанные с фигурой,

которые определяют формообразование одежды. В реальной одежде морфология одежды зависит от плеч, груди, талии, бедер, их взаимоотношений, положения швов и локального контакта с телом. Исса и соавторы использовали 3D-печатные манекены для измерения статической и динамической драпируемости тканей и одежды, показав, что условия опоры с телом или манекеном могут формировать драпировочные реакции, отличающиеся от реакций, полученных на регулярных опорных устройствах [128]. Поэтому стандартизированная граница традиционного испытания драпируемости одновременно является его главным ограничением при рассмотрении морфологии, связанной с одеждой.

Третье ограничение связано с размерностью оценочных индексов. Традиционная характеристика драпируемости обычно основана на длине, DC, проекционной площади, числе складок, расстоянии до границы или двумерных контурных параметрах. Эти индексы эффективны для ранжирования материалов и сравнения тканевых проб, но они сжимают сложную трехмерную морфологию в упрощенные скалярные или планарные дескрипторы. Чен и Говиндарадж подчеркнули, что драпируемость по сути является трехмерной оболочечной задачей, а Парк и соавторы и Квон и соавторы показали, что положение складок, кривизна контура и волнистость границы раскрывают морфологические различия, выходящие за пределы одного значения DC [123–126]. Хуссейн и соавторы дополнительно ввели параметры трехмерного облака точек, поскольку двумерных индексов недостаточно для описания пространственной морфологии драпировки [129]. Это показывает, что традиционные индексы ограничены, когда необходимо анализировать глубину складок, локальную пространственную деформацию и контурную реакцию на уровне одежды. В таблице 1.9 представлены основные ограничения традиционных методов испытания драпируемости и их последствия для швейной инженерии.

Таблица 1.9 - Ограничения традиционных методов испытаний

Типограничения	Конкретное проявление	Влияние на швейную инженерию
Исключение структуры одежды	Стандартные образцы обычно исключают швы, типы стежков, способы соединения и ориентацию кроя	Трудно представить драпировочное поведение собранных изделий [121,122,127,130]
Упрощенные условия опоры	Опоры испытаний в основном являются линейными краями, круглыми дисками или регулярными границами	Слабое соответствие состояниям одежды с опорой плечами, телом или манекеном [128]
Сжатие пространственной информации	Результаты часто	Недостаточное представление

ии	выражаются через DC, проекционную площадь, число узлов или двумерные контурные параметры	глубины складок, пространственного контура и трехмерной морфологии [123–126,129]
Ограниченная переносимость на уровень одежды	Результаты уровня материала не могут напрямую объяснить формообразование одежды при структурных и граничных ограничениях	Трудно поддерживать прогнозирование формы одежды и коррекцию лекал [121–130]

Как показано в таблице 1.9, ограничение традиционных методов испытаний драпируемости заключается в несоответствии между стандартизированной логикой испытаний и условиями формообразования на уровне одежды. Традиционные методы могут эффективно сравнивать драпируемость ткани при контролируемых условиях образца. Однако они остаются недостаточными для представления влияния швов, комбинаций направления нитей, границ, связанных с телом, и трехмерной морфологии одежды. Поэтому исследования драпируемости, ориентированные на одежду, требуют методов испытаний, которые сохраняют экспериментальную сопоставимость и одновременно вводят условия опоры и структурные ограничения, более близкие к реальным состояниям одежды.

1.4.2 Ключевые проблемы генерации цифровых двойников

С развитием трехмерного моделирования, виртуальной примерки и технологий симуляции одежды исследования текстиля и одежды постепенно перешли от геометрической визуализации к построению цифровых двойников. Однако генерация цифрового двойника не равна созданию трехмерного объекта. Достоверный цифровой двойник требует соответствия между физическими параметрами, виртуальными моделями материала, опорными сценариями и реакциями симуляции. Поэтому главная проблема современной генерации цифровых двойников уже заключается не в том, может ли быть отображена виртуальная ткань или одежда, а в том, может ли сгенерированный объект сохранять проверяемую согласованность с реальным объектом по вводу параметров, реконструкции сценария и поведенческой реакции [135–140].

Первая проблема заключается в сложности получения параметров ткани. Существующие рабочие процессы генерации цифрового двойника ткани все еще в значительной степени зависят от физических испытательных цепочек, включающих несколько стандартов, устройств и операций. Такие стандарты, как ASTM D1388, ASTM D1777, ASTM D5034 и

ASTMD4032, соответственно связаны с измерениями изгиба, толщины, растяжения или прочности и жесткости при круговом изгибе [131–134]. Эти испытания дают важные физические данные, но не образуют единого интегрированного пути получения параметров. В практическом построении цифровой ткани образцы в направлениях основы, утка и косоугольного направления часто должны подготавливаться отдельно, для разных свойств используются разные устройства, а полученные значения дополнительно обрабатываются перед вводом в программное обеспечение симуляции. Таким образом, получение параметров является главным узким местом, определяющим стоимость, эффективность и достоверность генерации цифрового двойника.

Вторая проблема связана с разрывом между результатами физических испытаний и входными параметрами программного обеспечения. Коммерческие системы симуляции одежды обычно генерируют виртуальные ткани через библиотеки тканей, FabricKits, fabricsimulators или materialcards [135–140]. Эти инструменты делают генерацию цифрового двойника ткани операционно осуществимым, но одновременно вводят зависимость от платформы. Выходы физических испытаний не всегда имеют прямое взаимно-однозначное соответствие с внутренними параметрами, требуемыми программным обеспечением. Различия в единицах измерения, диапазонах данных, входных полях, механизмах решателя и моделях материала могут приводить к разным результатам симуляции для одной и той же ткани. Следовательно, ключевая трудность состоит не только в том, как измерить свойства ткани, но в том, как преобразовать измеренные данные в совместимые с программным обеспечением и физически интерпретируемые параметры виртуального материала.

Третья проблема - согласованность сценария и формы испытательных стендов. Генерация цифрового двойника требует реконструкции не только свойств материала, но и опорных объектов, граничных условий, состояний контакта и сценариев симуляции. В исследованиях, связанных с драпируемостью тканей, поддерживаемых диском, манекеном, телом человека или конструкцией одежды, может формировать разные морфологические реакции. Если виртуальный сценарий не соответствует реальному испытательному сценарию, точные параметры материала сами по себе не могут гарантировать достоверный результат симуляции. Эта проблема переносит ограничение традиционного испытания драпируемости с этапа физических испытаний на этап цифрового построения.

Четвертая проблема - недостаточная стабильность платформ. Разные программные системы используют разные модели, интерфейсы параметров, правила столкновений и численные решатели. Поэтому цифровой двойник ткани, созданный на одной платформе, может не воспроизводить такую же драпируемость или морфологию одежды на другой платформе. Это показывает, что генерация цифрового двойника определяется взаимодействием между измеренными данными, представлением виртуального материала и специфичными для программного обеспечения механизмами симуляции. Без стабильного

отношения сопоставления между этими компонентами сгенерированный виртуальный объект остается ближе к платформенно зависимому результату симуляции, чем к переносимому цифровому двойнику. В таблице 1.10 представлены основные узкие места в традиционном рабочем процессе генерации цифрового двойника текстиля.

Таблица 1.10 - Узкие места в генерации цифровых двойников тканей

Этап рабочего процесса	Основная операция	Главное узкое место
Подготовка образцов	Вырезание образцов по основе, утку и косому направлению	Трудоемкая предварительная обработка; чувствительность к согласованности операций[131, 137]
Измерение изгиба и толщины	Проведение ASTM D1388, ASTM D1777, ASTM D4032 или связанных испытаний	Требуются несколько методов и устройств[131,132,134]
Измерение растяжения или прочности	Проведение grabtests или измерений растяжения, связанных с программным обеспечением	Выходы испытаний не всегда прямо эквивалентны программным параметрам[133,137]
Ввод в программное обеспечение	Ввод измеренных значений в fabricemulators или materialcards	Ручной ввод повышает риск ошибок и зависит от полей конкретной платформы[136,138]
Генерация на основе библиотеки тканей или сканирования	Использование библиотек тканей, FabricKits или модулей цифрового сканирования ткани	Сильная зависимость от платформы; ограниченная переносимость между программами[135,139,140]
Валидация и настройка симуляции	Наблюдение драпировки, растяжения, текстуры или реакции одежды и корректировка параметров	Корректировка зависит от опыта; рабочий процесс валидации часто фрагментирован[135,140]

В целом ключевая проблема генерации цифрового двойника - достоверность построения. Виртуальная ткань или одежда может быть создана существующими программными

инструментами, но ее статус цифрового двойника зависит от того, насколько последовательно связаны физические параметры, виртуальные модели материала, опорные сценарии и реакции симуляции. Если эта связь остается нестабильной, полученный виртуальный объект не может надежно поддерживать прогнозирование формы одежды, коррекцию лекал или реальную-виртуальную валидацию.

1.4.3 Недостаточность методов прогнозирования формы одежды и коррекции параметров лекал на основе драпируемости

Современная цифровая разработка одежды все еще в основном опирается на итерационную логику генерации пробы, её оценку и коррекцию. Системы цифрового построения лекал, виртуальное прототипирование и технологии 3D-примерки могут ускорить этот процесс [141–150]. Поэтому центральное ограничение заключается в отсутствии механизма прямого прогнозирования, который мог бы прогнозировать параметры формы одежды по параметрам драпируемости ткани в условиях, максимально приближенным к реальной одежде.

Первый пробел заключается в отсутствии количественного моста между драпируемостью ткани и формой одежды. Исследования цифрового построения лекал, индивидуализированных лекал одежды, оптимизированной градации, параметрических изделий и автоматической генерации лекал повысили эффективность разработки лекал и размерной адаптации [141–144,150]. Однако данные исследования в основном отвечают на вопрос, как лекала могут быть сгенерированы, изменены или градуированы более эффективно. Они не устанавливают прямой количественный механизм, посредством которого параметры, связанные с драпируемостью ткани, могут помочь прогнозировать морфологию одежды. Существующие исследования в целом подтверждают, что свойства ткани влияют на внешний вид одежды, но это влияние чаще обсуждается как наблюдаемый тренд, а не как эффективность операционной модели прогнозирования параметров формы одежды.

Второй пробел касается коррекции параметров чертежей. В швейной инженерии ценность аудита формы заключается в возможности преобразовании установленных различий в правила структурной корректировки. Существующие исследования посадки, оптимизации размерных таблиц и связей "фигура - чертежи" показывают, что связи все еще содержат несогласованности между системами построения [143,149]. Когда в эту связь вводятся драпируемость ткани и морфология одежды, проблема становится более сложной. В настоящее время отсутствуют методы, которые могли бы начинаться с измерений драпируемости и заканчиваться выводом величин коррекции чертежей.

Ограничение виртуального прототипирования также проявляется в этой проблеме. Оценка сходства между виртуальной и реальной одеждой, геометрическое сравнение виртуальных и

реальных изделий, а также виртуальные e-bespokegarmentsystems улучшили способность выявлять проблемы внешнего вида или посадки одежды до физического производства [145–148]. Однако эти методы в основном поддерживают posthoc сравнение, валидацию и оптимизацию. Они могут помочь дизайнерам определить, где виртуальное или реальное изделия отличаются, но не определяют, как параметры чертежей должны быть заранее скорректированы в соответствии с драпировочным поведением ткани. В результате виртуальное прототипирование снижает часть затрат на trial-and-error, но пока не формирует устойчивый feed-forward механизм проектирования. В таблице 1.11 представлены основные ограничения в прогнозировании формы одежды и коррекции параметров лекал на основе драпируемости.

Таблица 1.11 - Ограничения в прогнозировании формы одежды

Направлениеисследования	Существующийпрогресс	Основноеограничение
Разработкацифровыхлекал	Повышает эффективность генерации персонализированных лекал	В основном решает генерацию лекал, но не имеет механизма сопоставления ткань-форма[141,150]
Оптимизацияразмеров и градации	Улучшает посадку для конкретных групп пользователей или размерных систем	Фокусируется на адаптации размеров тела, а не на прогнозировании формы, обусловленном тканью[142,143]
Параметрическое и автоматическое построение лекал	Сокращает часть ручной работы по построению лекал	Ограничено в выражении реакции ткани и физических ограничений[144,150]
Виртуальное прототипирование и оценка сходства	Позволяет раньше выявлять различия внешнего вида и посадки	В основном используется для posthoc сравнения; не имеет feed-forward прогностической способности[145–148]
Исследованиясвязейтело-лекало	Выявляют несогласованность правил преобразования от тела к лекалу	Трудно сформировать стабильные правила коррекции при введении драпируемости ткани[149]

В целом главное ограничение современных исследований заключается в разрыве между оценкой материала, реакцией формообразования одежды и коррекцией лекал.

1.5 Цель и направление данного исследования

На основе выявленных выше исследовательских пробелов центральная проблема данной

диссертации состоит в том, чтобы установить непрерывный методологический путь, связывающий измерение текстильного материала и построение цифрового двойника, с ориентированным на одежду испытание драпируемости, прогнозирование формы одежды и коррекцию параметров чертежей.

Цель данной диссертации - разработать интегрированную методологическую основу для проектирования цифровых двойников текстильных материалов и одежды на основе трехмерной технологии.

Конкретными задачами данной диссертации являются следующие.

1. Сформировать единую методологическую основу, включающую текстильные и швейные образцы, программные платформы, процедуры испытаний, условия получения изображений и индексы валидации.

2. Разработать методы построения цифрового двойника тканей на основе физических испытаний и ИИ-измерений по протоколу и оценить их применимость в трехмерной симуляции.

3. Разработать и валидировать ориентированный на одежду антропоморфный метод и прибор для испытания драпируемости с физико-виртуальной реализацией, при проектировании одежды.

4. Разработать методы прогнозирования формы женского платья и коррекции параметров чертежей.

5. Интегрировать предложенные методы в полный рабочий процесс проектирования цифровых двойников текстильных материалов и одежды.

На рис. 1.13 показана общая исследовательская рамка данной диссертации.

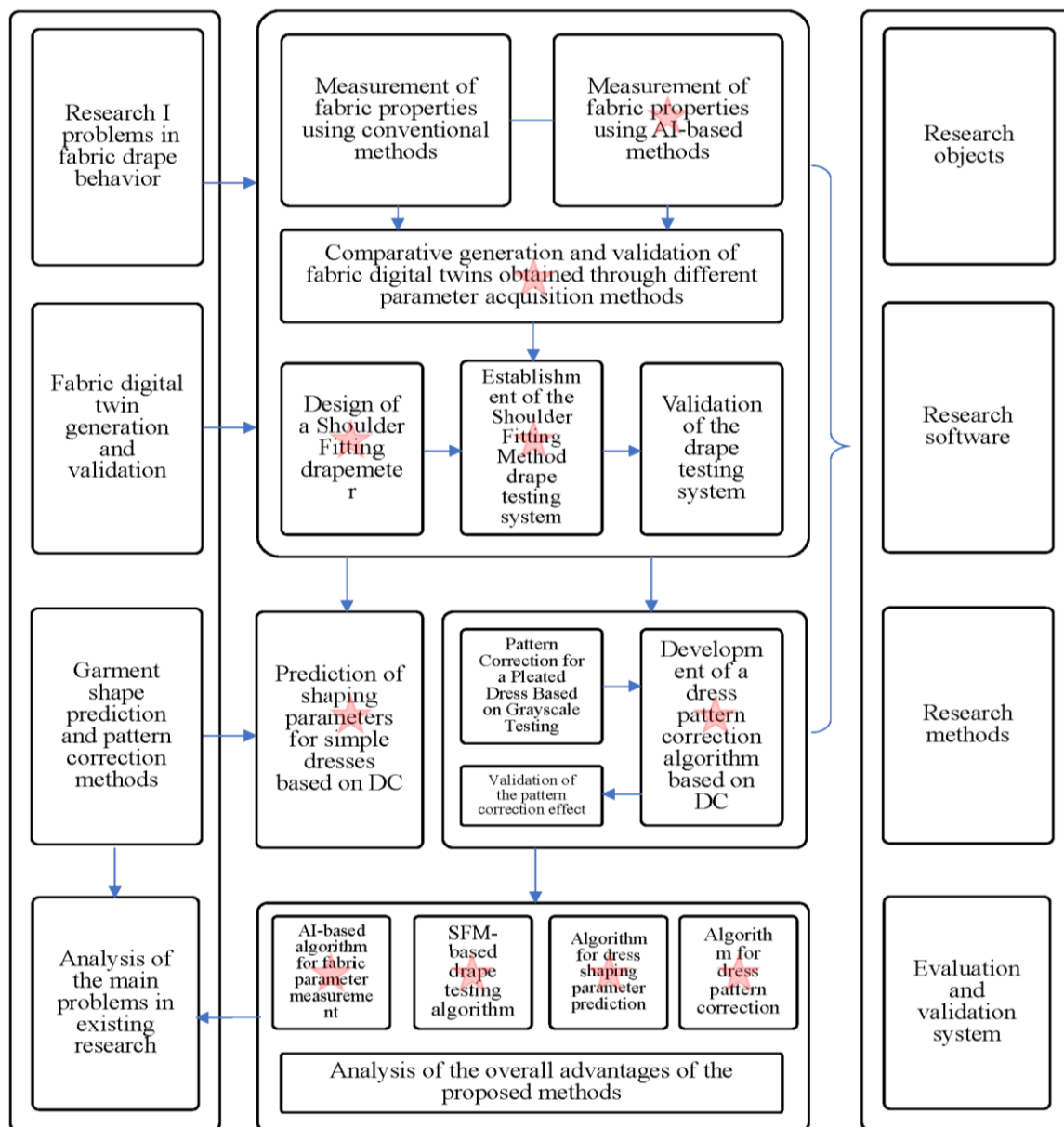


Рисунок 1.13 - Общая исследовательская рамка

Как показано на рис. 1.13, данная диссертация следует последовательному исследовательскому маршруту от методологической основы к построению цифрового двойника текстильного материала, ориентированному на одежду испытанию драпируемости, прогнозированию формы одежды, коррекции параметров лекал и развитию интегрированного рабочего процесса.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Объекты исследования

2.1.1 Ткани

Ткани исследовали как материальные и виртуальные объекты. Реальные ткани использовали для определения показателей физико-механических свойств, для презентации внешнего вида и оценивания тех же показателей с помощью искусственного интеллекта (ИИ), генерации цифровых двойников тканей, тестирования драпируемости и валидации объемно-силуэтной формы женских платьев. Виртуальные ткани применяли для виртуальных экспериментов для тестирования нового метода оценки драпируемости, включая выбор параметров антропоморфного стенда, обоснования размеров проб и анализа различий в драпируемости. Следовательно, реальные и виртуальные ткани использовали на разных экспериментальных уровнях.

В качестве реальных объектов использовали пять видов тканей для одежды, обозначенных как F1–F5. Ткани F1–F3 презентовали основную группу материалов для полной характеристики всех разработанных методов измерений, построения цифровых двойников и прогнозирования параметров формы платья. Ткани F4 и F5 формировали группу для проверки применимости полученных результатов при конструировании одежды. Таблица 2.1 показывает основную информацию о реальных тканях.

Таблица 2.1 – Основная информация о реальных тканях

Код	Название	Структура переплетения	Состав, %
F1	Джинсовая ткань	Саржевое переплетение 3/1	97% хлопок, 3% спандекс
F2	Ткань с имитацией ацетата	Атласное переплетение	97% полиэстер, 3% спандекс
F3	Тенсел-поплин	Плотняное переплетение	100% хлопок
F4	Суровая ткань	Плотняное переплетение	100% хлопок
F5	Валидационная ткань	Саржевое переплетение 3/1	100% хлопок

Выбор таких материалов обеспечил разнообразие волокнистого состава, видов переплетения. На рис. 2.1 показан вид тканей.

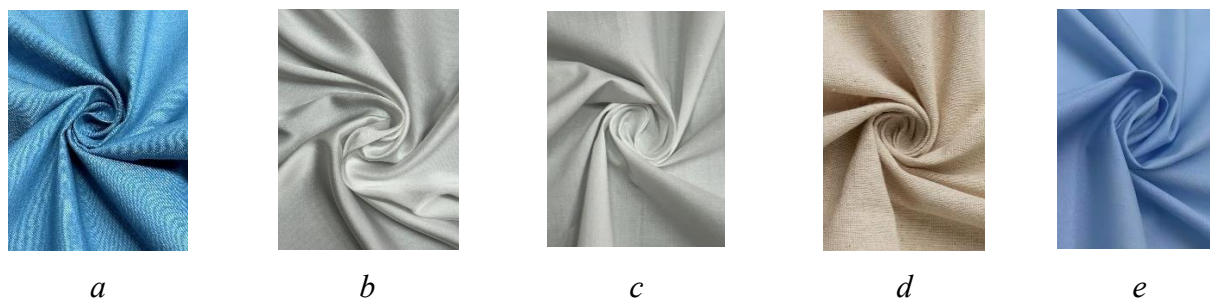










Рисунок 2.1 – Внешний вид тканей: *a* – F1, *b* – F2, *c* – F3, *d* – F4, *e* – F5

Как показано на рис. 2.1, реальные ткани различаются по текстуре поверхности, гладкости и внешнему виду. Их изображения дополняют структурную и составную информацию в таблице 2.1 и содержат визуальную информацию для последующих процедур измерений на основе изображений и валидации готовых изделий.

Виртуальные ткани были выбраны из библиотеки тканей Style3D и обозначены как VF1–VF5, C1-C3. Их использовали для разработки метода тестирования драпируемости, а не как цифровые двойники реальных тканей F1–F5. Таблица 2.2 показывает параметры виртуальных тканей, определенные в программном обеспечении.

Таблица 2.2 – Виртуальные ткани из библиотеки тканей Style3D, использованные для разработки метода тестирования драпируемости

Код	Виртуальная ткань	Изображение	Поверхностная плотность (GSM), г/м ²	Толщина, мм	Жесткость при изгибе, сН·мм ² ·с ⁻² ·рад ⁻¹		
					Основной	Угловой	Диагональный
VF1	Эластичная ткань купального типа		130	0.47	100	50	60
VF2	Хлопково-льняная ткань полотняного типа		123	0.21	250	100	200
VF3	Полиэстер Паракорд Креп		102	0.29	350	250	300
VF4	Шёлковый креп-атлас		52	0.13	650	100	200

VF 5	Плотная ткань полотняного типа		90	0.43	850	800	850
C1	Полиэстерово-хлопковая саржевая ткань		115	0.26	590	300	460
C2	Полиэстеровый вельвет		103	0.19	290	110	116
C3	чистая хлопчатобумажная простая ткань		56	0.17	250	100	150

Как показано в таблице 2.2, VF1–VF5, C1–C3 имеют характеристики, определённые программным обеспечением из библиотеки Style3D, и не интерпретируются как лабораторно измеренные показатели.

2.1.2 Чертежи и модели платьев

Объекты исследования включали базовое платье (BD) и драпированное платье (PLD). BD использовали для установления зависимости между коэффициентом драпируемости ткани, измеренным новым методом имитации плеча (Shoulder Fitting Method, SFM), и параметрами формы изделия. В данной работе коэффициент драпируемости ткани, рассчитанный методом SFM, обозначали как DC_{SFM} и использовали как входной показатель для прогнозирования параметров формы платья. PLD применяли для установления зависимости между количеством складок, DC_{SFM} ткани и исследования формирования складок. Оба типа платьев имели безрукавную конструкцию, чтобы снизить влияние рукавов и линии проймы на морфологию платья и напрямую исследовать влияние драпируемости ткани. На рис. 2.2 показана схема измерения параметров формы платья BD.



Рисунок 2.2 – Схема чертежа базового платья BD и параметры его объёмно-силуэтной формы:

а – схема чертежа, б – схема измерения параметров P_{d1} , P_{d2} , P_{d3} и P_{d4}

На рис. 2.2,б показаны схемы измерения четырех параметров:

- P_{d1} - вертикальная длина от основания шеи сбоку до низа,
- P_{d2} - фронтальная проекционная ширина платья в низу,
- P_{d3} - угол наклона бокового контура от нижней точки проймы до низа,
- P_{d4} - показатель драпируемости базового платья (BD), характеризующий степень изменения формы платья после надевания на манекен.

Эти четыре параметра использовали для описания форм базового платья BD разной длины. Таблица 2.3 показывает параметры чертежей базовых платьев разной длины, начиная с минимальной формы BD1 и заканчивая максимальной формой BD5.

Таблица 2.3 – Параметры чертежей BD

Символ	L_{BD} , см	W_{BD} , см
BD1	45	27
BD2	65	31
BD3	85	35
BD4	105	39
BD5	125	43

Как показано в таблице 2.3, разные формы платьев BD1–BD5 были получены за счёт согласованного увеличения длины чертежа L_{BD} и его ширины W_{BD} .

Драпированное платье (PLD) создавали путём конструктивного моделирования базового платья ВД. Складки располагали от плеча до груди вдоль шва соединения верхней и нижней частей. Уровни складчатости генерировали разными, при этом положение складок оставалось неизменным, изменяли только глубины складок. Такая настройка исключала влияние вариации положения складок на характер складчатости поверхности, позволяя анализировать взаимосвязь между складчатостью детали, DC_{SFM} ткани и морфологией складок. Чтобы исключить влияние изменения положения складок (P) на морфологию складчатой поверхности PLD, пять вариантов чертежей платья со складками (PLDP1–PLDP5) сохраняли одинаковые положения складок, а изменяли только величину разведения складок на чертеже. Рис. 2.3 показывает чертёж базового платья ВД, процесс разведения чертежа PLD, фиксированные положения складок и наложение друг на друга пяти вариантов чертежей PLD.

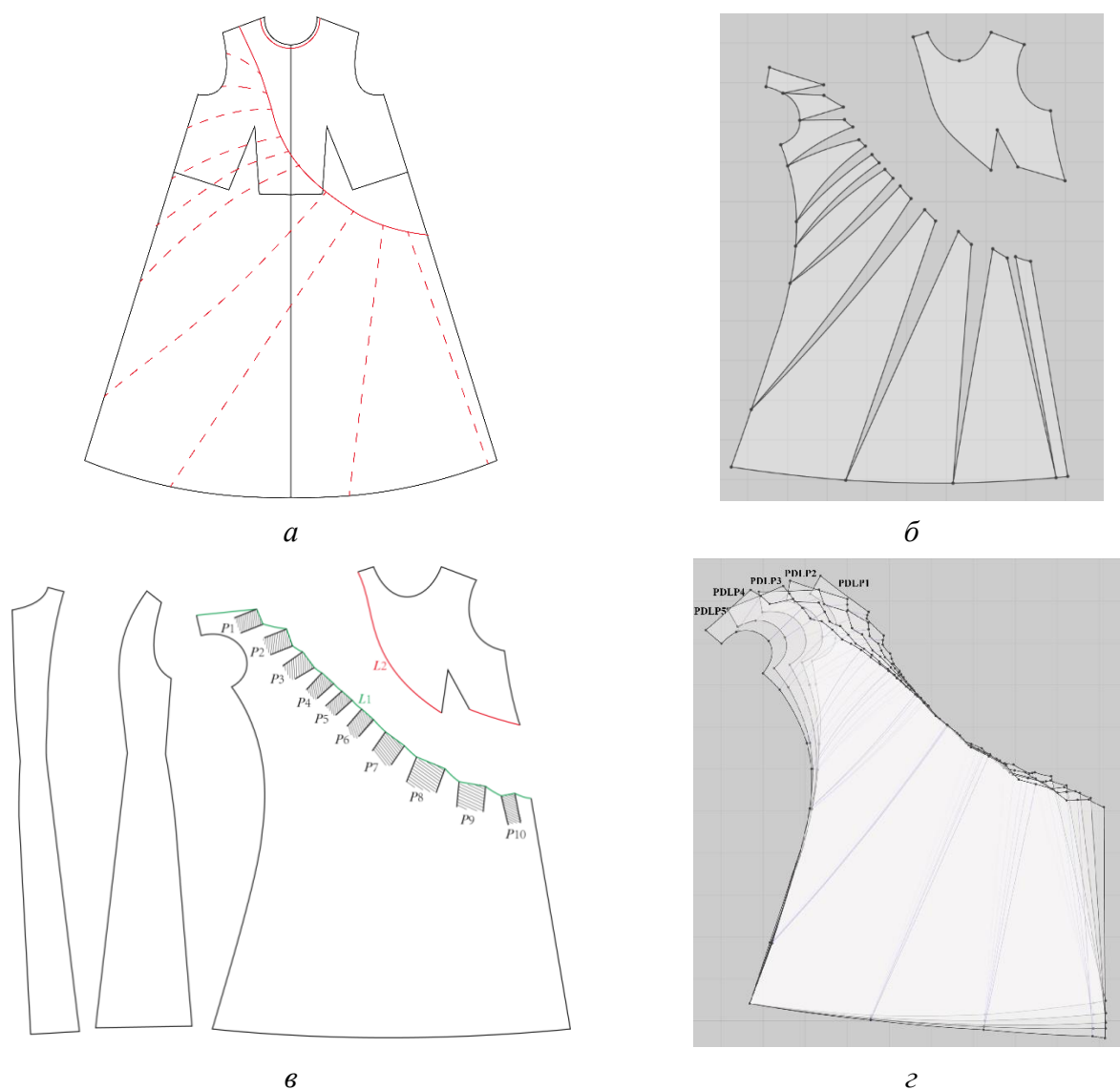


Рисунок 2.3 – Схема построения чертежа платья со складками PLD и задания уровней складчатости: а – чертёж базового платья ВД и линии разреза; б – чертёж PLD после

1	0.48	1.66	2.19	2.59	1.69	1.21	1.67	3.45	5.35	4.30	1.30
2	0.67	2.66	3.19	3.59	2.69	2.21	2.67	4.45	6.35	5.30	2.30
3	0.86	3.66	4.19	4.59	3.69	3.21	3.67	5.45	7.35	6.30	3.30
4	1.05	4.66	5.19	5.59	4.69	4.21	4.67	6.45	8.35	7.30	4.30
5	1.24	5.66	6.19	6.59	5.69	5.21	5.67	7.45	9.35	8.30	5.30

Как показано в таблице 2.4, конструкция PLDP1 имеет начальный уровень количества складок. От PLDP2 до PLDP5 количество складок в каждой позиции увеличивалось на 1 см по сравнению с предыдущим уровнем. В целом, коэффициент складчатости Δ увеличился с 0,48 до 1,24. С помощью этого метода градации было получено пять уровней интенсивности складок при одинаковой структуре их положения складок.

BD и PLD выполняли разные функции как объекты исследования. Для описания объемно-пространственной формы BD использовали параметры L_{BD} , W_{BD} и $P_{d1}-P_{d4}$ в качестве ключевых для прогнозирования общей формы платья. Для описания состояния поверхности платьев PLD использовали фиксированное положение складок P_1-P_{10} , уровни PLDP1–PLDP5 и коэффициент складчатости.

2.2 Программное обеспечение

2.2.1 Программное обеспечение для трёхмерного моделирования и симуляции

Программное обеспечение для трёхмерного моделирования и симуляции включало Style3DStudioV9.2.880 и Rhinoceros 7. Style3DStudioV9.2.880 является программным обеспечением для трёхмерного проектирования и симуляции одежды, разработанным компанией Style3D. Rhinoceros 7 — это программное обеспечение для трёхмерного геометрического моделирования, разработанное RobertMcNeel&Associates. Эти два пакета программ использовали соответственно для виртуальной симуляции одежды и моделирования и измерения геометрических объектов.

Style3DStudioV9.2.880 использовали для редактирования тканей, выбора виртуальных тканей, построения чертежей, сшивания деталей, динамической симуляции одежды и вывода изображений стандартного вида. Style3D был выбран в качестве основной платформы для выполнения симуляций потому, что возможен одной программной среде генерировать цифровые двойники тканей, проводить симуляцию драпируемости проб на новом стенде (Глава 3), симуляция базового и драпированного платьев. Такая платформа уменьшала влияние различий на интерпретацию ткани, поведение решателя и экспорт цифровых двойников ткани и формирования одежды.

Rhinoceros 7 использовали для моделирования нового антропоморфного драпетра

SFM, для измерения кривых, контуров, расстояний и локальных геометрических параметров.

2.2.2 Модели искусственного интеллекта

Модели ИИ использовали для получения бесконтактным неинструментальным методом показателей геометрических и физико-механических свойств тканей, необходимых для построения цифрового двойника ткани, на основе стандартизированных фотографий. В каждом тесте применяли входные данные в формате «изображение + текстовый промпт»: изображение представляло собой фотографию ткани, полученную по фиксированной схеме съёмки, а текстовая часть соответствовала определённой версии протокола промпта. Выходные данные модели представляли собой структурированный набор параметров, включающий толщину, поверхностную плотность, усилия растяжения при малых удлинениях, параметры изгиба и коэффициент драпируемости DC . В данной работе модели ИИ рассматривались не как инструменты генерации текста, а как бесконтактные средства получения параметров на основе визуальных данных и текстовых ограничений.

Для обеспечения сопоставимости результатов модели ИИ вызывали в официальной онлайн-среде без тонкой настройки, дополнительного обучения, локального развёртывания, изменения весов модели и внешних измерительных плагинов. Для каждой группы тестов сохраняли одинаковую комбинацию входных изображений, версию промпта и формат вывода. Поскольку использованные платформы относятся к закрытым или полужакрытым онлайн-системам, веса моделей, полный процесс рассуждения, сэмплер и низкоуровневый процесс декодирования были недоступны. Параметры `seed`, `temperature` и `top-p` не фиксировали и не настраивали как экспериментальные переменные. Повторные тесты выполняли путём независимых запусков, а каждый выходной результат рассматривали как отдельный результат измерения.

В качестве инструментов получения параметров были выбраны четыре мультимодальные модели искусственного интеллекта со следующими техническими условиями.

1. GPT-5.1 Thinking (OpenAI).

GPT-5.1 Thinking вызывали через ChatGPT Plus или официальную среду OpenAI. Модель поддерживает совместный ввод текста и изображений, а результаты выводит в текстовой форме в виде структурированной таблицы параметров. Модель обладает возможностью обработки длинного контекста: согласно официальному техническому описанию, контекстное окно составляет 400 000 tokens, а максимальная длина выходных данных — 128 000 tokens; также поддерживаются разные уровни `reasoning effort`. В эксперименте использовали способность модели к визуальному пониманию и рассуждению для считывания морфологических, текстурных и драпировочных признаков на фотографиях

ткани и последующего вывода численных параметров в соответствии с протоколом промпта.

2. Gemini 3 Pro (Google DeepMind).

Gemini 3 Pro вызывали через официальную среду Gemini или Google AI Studio. Модель поддерживает мультимодальный ввод, включая текст, изображения, видео, аудио и PDF, а выходные данные формирует в текстовом виде. Согласно официальному техническому описанию, модели серии Gemini Pro имеют входное контекстное окно 1 048 576 tokens и максимальную длину выходных данных 65 536 tokens, а также поддерживают Thinking и структурированный вывод. В эксперименте использовали только изображения и текстовый промпт для получения параметров ткани по единому протоколу.

3. Grok 4.1 (xAI).

Grok 4.1 вызывали через официальную среду xAI. Модель поддерживает текстовый и графический ввод, а выходные данные формирует в текстовом виде. Модели серии Grok 4.x обладают возможностью обработки длинного контекста и поддерживают режимы рассуждения. В эксперименте Grok 4.1 использовали для распознавания макроконтур, формы складок, локальной текстуры и признаков гравитационной деформации на стандартизированных фотографиях ткани с последующим выводом вектора параметров по фиксированному протоколу промпта. При вызове через веб-среду низкоуровневые уровни рассуждения и параметры сэмпирования не использовались как регулируемые экспериментальные переменные.

4. Qwen3-Max (Alibaba Cloud).

Qwen3-Max вызывали через официальную среду Tongyi Qianwen. В экспериментальной записи название модели фиксировали в соответствии с интерфейсом, отображённым во время тестирования. Модель использовали для обработки изображений ткани и текстового промпта с последующим выводом параметров ткани. Модели, связанные с Qwen3-Max, обладают возможностью обработки длинного контекста: согласно официальному описанию, контекстное окно составляет 262 144 tokens, а максимальная длина выходных данных может достигать 65 536 tokens.

Функция указанных моделей в данной работе была ограничена этапом получения параметров. Модель извлекала из стандартизированных изображений визуальную информацию, пригодную для параметрического вывода; протокол промпта задавал наименования параметров, единицы измерения, допустимые физические диапазоны, ограничения и формат вывода; метод оценки ошибки использовали для сравнения выходных значений модели с экспериментальными эталонными значениями. При такой организации сравнивали не открытые алгоритмические структуры моделей, а параметрические результаты, полученные при одинаковых визуальных данных и одинаковых текстовых ограничениях. Различия между выходными данными моделей в основном отражали их способность к визуальному пониманию, численную стабильность и физическую согласованность.

2.2.3 Программное обеспечение для анализа изображений

Предварительная обработка изображений и извлечение показателей градационной реакции выполнялись с использованием Adobe Photoshop и ImageJ. Adobe Photoshop использовали для стандартизированной предварительной обработки исходных изображений, включая удаление фона, кадрирование, очистку границ, сегментацию панелей изделия и выделение локальных структурных областей. Adobe Photoshop не использовали для количественных измерений. Его функция заключалась в преобразовании исходных изображений в стандартизированные входные изображения с чёткими границами, однородным фоном и распознаваемыми областями для последующего анализа в ImageJ.

ImageJ использовали для количественного анализа изображений. После импорта обработанных изображений в ImageJ последовательно выполняли калибровку областей анализа, преобразование в 8-битное изображение в градациях серого, пороговую сегментацию, сканирование порогов и извлечение показателей градационной реакции. Анализ PLD не был основан на внешнем контуре всего изделия: объектами анализа служили структурные области, которые выделяли на фронтальном изображении и на которых были сконцентрированы складки. Эти области включали общую область складок и две области интереса (region of interest, ROI): ROI-1 и ROI-2. Для изображений PLD основными показателями градационной реакции при изменении коэффициента складчатости являлись:

1) процент светлой области в общей области складок $A_{overall}$. Общую область складок использовали для характеристики общей реакции платья на регулирование складчатости в основной складчатой зоне PLD на фронтальном изображении.

2) процент светлой области в области интереса (region of interest, ROI) ROI-1 A_{ROI1} . ROI-1 использовали для характеристики локальной градационной реакции верхней зоны концентрации складок вдоль шва соединения верхней и нижней частей.

3) процент светлой области в выбранной ROI-2 A_{ROI2} . ROI-2 использовали для характеристики локальной градационной реакции зоны диагонального распространения складок к низу и вбок.

4) среднее значение серого в соответствующей области светлой реакции. Среднее значение серого получали из статистических результатов ImageJ и использовали для вспомогательной оценки стабильности серого уровня в области светлой реакции.

Для трёх областей применяли одинаковые правила предварительной обработки изображений, сканирования порогов и извлечения показателей, что обеспечивало сопоставимость результатов между разными тканями, уровнями чертежа и областями анализа. Рис. 2.4 показывает изображение, использованное для определения объекта анализа

градационной реакции PLD, общей области складок и положения локальных ROI.



Рисунок 2.4 – Объекты и области анализа для характеристики отклика PLD по градициям серого:

a – складки у шва соединения верхней и нижней частей платья как ROI-1, *b* – складки в зоне диагонального распространения к низу и вбок как ROI-2, *c* – общая плиссированная область целевого PLD, объединяющая зоны ROI-1 и ROI-1, *d* – оригинальное изображение целевого PLD до кадрирования, *e* – платье PLD из ткани F1, *f* – платье PLD из ткани F2, *g* – платье PLD из ткани F3

Как показано на рис. 2.4, области ROI-1, ROI-2 и общую область складок выделяли на

одном и том же фронтальном изображении PLD. ROI-1 расположена в верхней зоне концентрации складок и отражает локальную градационную реакцию, формируемую короткими складками и плотными краями складок в области от плеча до груди. ROI-2 расположена в зоне диагонального распространения складок и отражает градационную реакцию, связанную с более длинными диагональными складками, изменением локальной кривизны и деформацией ткани при драпировании. Общая область складок охватывает основную структурную зону фронтального изображения PLD, на которую влияет формирование складок, и используется для извлечения общей градационной реакции.

Выбор таких вариантов форм складок был обусловлен необходимостью проверки возможности применения вновь разработанного метода оценки драпируемости (Глава 3) для прогнозирования способности тканей образовывать складки на поверхности платьев в разных условиях:

- 1) под действием гравитации (рис.2.2, б),
- 2) под действием ниточного шва (рис.2.4,а)
- 3) в условиях свободного распространения на лимитированной площади (рис.2.4,б).

Фронтальное изображение PLD сначала обрабатывали в AdobePhotoshop для удаления фона, очистки границ и сегментации структурных областей, затем импортировали в ImageJ и преобразовывали в 8-битное изображение в градациях серого. Диапазон серого уровня составлял 0–255, где 0 соответствует чёрному цвету, а 255 — белому. В процессе пороговой сегментации пиксели со значением серого, равным или превышающим заданный порог, относили к области светлой реакции, а пиксели со значением серого ниже заданного порога — к области без светлой реакции. Область светлой реакции в основном соответствовала гребням складок, линиям сгиба и непрерывно освещённым поверхностям. По сравнению с тёмными областями светлая область в меньшей степени зависела от глубины тени, светопроницаемости ткани и влияния чёрного манекена. Поэтому градационную реакцию формы складок PLD характеризовали преимущественно через процент площади светлой области.

После задания порога серого ImageJ автоматически рассчитывал процент площади светлой области на основе результата пороговой сегментации. Процент площади светлой области в общей области складок обозначали как $A_{overall}$; этот показатель характеризует долю площади светлой реакции в общей области складок. Процент площади светлой области в ROI-1 обозначали как A_{ROI1} ; этот показатель характеризует долю площади светлой реакции внутри ROI-1. Процент площади светлой области в ROI-2 обозначали как A_{ROI2} ; этот показатель характеризует долю площади светлой реакции внутри ROI-2. Все три показателя выражали в процентах и использовали для описания градационной реакции формы складок PLD на общем и локальном уровнях.

Поскольку ткани различались по цветовой глубине, отражательной способности

поверхности, яркости текстуры и распределению теней в складках, единый фиксированный порог не мог быть напрямую применён ко всем изображениям PLD. Поэтому в ImageJ использовали сканирование порогов, позволяющее получить непрерывную зависимость процента площади светлой области от изменения порога. Нормированную кривую сканирования порогов использовали для определения основного интервала реакции и исключения участков плато на обоих концах кривой. Порог Otsu применяли как объективный опорный порог, основанный на гистограмме серого уровня; его алгоритмический принцип приведён в источнике [165]. Однако порог Otsu не использовали как единый фиксированный порог для всех тканей и всех областей анализа. Окончательный порог определяли с учётом эффективного интервала реакции кривой сканирования, опорного порога Otsu и стабильности области светлой реакции.

В соответствии с указанными правилами предварительной обработки изображений, разделения областей, сканирования порогов и извлечения показателей изображения PLD формировали структуру данных градационной реакции, включающую тип ткани, уровень чертежа, область анализа и порог.

2.2.4 Программное обеспечение для статистики и анализа данных

Обработка экспериментальных данных, статистический анализ и представление результатов выполнялись с использованием IBM SPSS Statistics и Microsoft Excel. Excel выполнял функции ввода данных, кодирования переменных, базовой статистической обработки и оформления таблиц, а SPSS - статистическую проверку, построение моделей и оценку статистической значимости.

IBM SPSS Statistics применяли для статистического анализа данных, корреляционного анализа, регрессионного моделирования и проверки значимости результатов испытаний драпируемости SFM, прогнозирования параметров формы BD, оценки измерений ИИ и корректировки чертежей PLD. В зависимости от типа данных и цели анализа использовали корреляционный анализ Pearson, линейный регрессионный анализ, t-критерий для сравнения средних значений, критерий знаковых рангов Wilcoxon и дисперсионный анализ (analysis of variance, ANOVA). Корреляционный анализ Pearson использовали для оценки линейных связей между DC_{SFM} , параметрами формы BD, показателями градационной реакции PLD и параметрами чертежей. Линейный регрессионный анализ применяли для построения прогнозных моделей между входными переменными и выходными параметрами. t-критерий и критерий Wilcoxon использовали для сравнения распределений ошибок при разных условиях испытаний или в разные временные точки. ANOVA применяли для оценки влияния типа ткани, схемы графических доказательств и конфигурации модели на уровень ошибки.

Microsoft Excel использовали для систематизации исходных данных, группировки данных, базовых расчётов, обобщения результатов и подготовки графиков. Microsoft Excel использовали для организации экспериментальных данных и базовых расчётов. Коды тканей, номера образцов, уровни чертежей, DC_{SFM} , параметры формы BD, показатели градиционной реакции PLD, результаты измерений ИИ и лабораторные эталонные значения вводили, группировали и проверяли в Excel. Excel также использовали для расчёта среднего значения, стандартного отклонения, коэффициента вариации (coefficient of variation, CV), относительной ошибки, абсолютной процентной ошибки (absolute percentage error, APE), средней абсолютной процентной ошибки (mean absolute percentage error, MAPE) и отдельных обобщённых статистических показателей, а также для формирования таблиц данных, необходимых для статистического анализа и построения графиков.

Стабильность повторных измерений характеризовали средним значением, стандартным отклонением и CV. Среднее значение отражало центральную тенденцию повторных измерений одной группы, стандартное отклонение характеризовало абсолютные колебания измеренных значений относительно среднего, а CV показывал относительную изменчивость стандартного отклонения по отношению к среднему значению. Лабораторные измерения и результаты повторных испытаний представляли в форме «среднее значение \pm стандартное отклонение». При сравнении параметров с разными единицами измерения или разными порядками величин CV использовали для оценки относительной изменчивости между группами данных. Для данных со средним значением, близким к нулю, CV может быть завышен, поэтому этот показатель применяли преимущественно для повторных измерений с устойчивым положительным средним значением.

Ошибку отдельного параметра, измеренного ИИ, оценивали с помощью APE. APE использовали для оценки относительного отклонения отдельного значения, полученного ИИ, от лабораторного эталонного значения:

$$APE_i = \left| \frac{X_{AI,i} - X_{Lab,i}}{X_{Lab,i}} \right| \times 100\% \quad (2.2)$$

где APE_i — абсолютная процентная ошибка i -го параметра; $X_{AI,i}$ — значение i -го параметра, измеренное ИИ; $X_{Lab,i}$ — соответствующее лабораторное эталонное значение. APE не сохраняет направление ошибки и характеризует только величину отклонения. Индекс i соответствует кодам физико-механических параметров ткани ①–⑳ из табл.2.5 .

Общую ошибку набора параметров, измеренных ИИ, оценивали с помощью MAPE. MAPE рассчитывали как среднее значение APE всех параметров, оцениваемых при одном и том же условии испытания:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n AP E_i \quad (2.3)$$

где $MAPE$ — средняя абсолютная процентная ошибка набора параметров, измеренных ИИ; n — количество параметров, включённых в оценку; $AP E_i$ — абсолютная процентная ошибка i -го параметра. Для полного вектора физико-механических параметров ткани $n = 24$, что соответствует кодам параметров ①–⑳. При оценке отдельной группы параметров n соответствовал фактическому числу параметров в данной группе.

$MAPE$ использовали для оценки общей точности измерений при разных моделях ИИ, версиях промпта и схемах графических доказательств. Межтканевую стабильность характеризовали стандартным отклонением $MAPE$ для разных тканей и 95% доверительным интервалом среднего $MAPE$. Стандартное отклонение $MAPE$ отражало колебания ошибки одной схемы испытания между разными тканями. 95% доверительный интервал характеризовал неопределённость среднего $MAPE$ при ограниченном количестве исследуемых тканей. Эти статистические показатели рассчитывали в Excel или SPSS на основе данных $MAPE$ для соответствующих групп.

$AP E$ и $MAPE$ применяли для оценки точности измерения ИИ по кодам физико-механических параметров ткани ①–⑳. Прогнозирование параметров формы BD, моделирование градиционной реакции PLD и проверка корректировки чертежей оценивались соответственно с использованием относительной ошибки, коэффициента корреляции, коэффициента детерминации, уровня статистической значимости и показателей сходства изображений.

2.3 Методы исследования

2.3.1 Испытания физико-механических свойств тканей

Тестирование тканей проводили для измерения эталонных параметров.

В число тестовых параметров входили следующие показатели.

1. Толщина. Тест на толщину проводили в соответствии с ASTM D1777-96 (2019) [161]. Толщину ткани измеряли при заданном давлении, в пять мест на том же образце для получения среднего значения. Выходной параметр — толщина ткани T_f , единица измерения — мм.

2. Поверхностная плотность (GSM). Тест GSM проводили в соответствии с ASTM D3776

[160]. Образец ткани с известной площадью взвешивали на электронных весах, а измеренная масса конвертировалась в массу на единицу площади. Для каждой ткани было протестировано пять образцов, и среднее значение использовалось в качестве эталонного. Выходной параметр — масса на единицу площади G , единица измерения — г/м^2 .

3. Усилия растяжения при малых удлинениях в направлениях основы, утка и диагонали под углом 45° . Тест на усилие растяжения при малых удлинениях проводили в соответствии с ASTM D5034 [162]. Для записи кривых "нагрузка–удлинение" проб использовали разрывной аппарат Metroteks MT 110-G. В каждом направлении тестировали пять повторных проб. Нагрузки на растяжение, соответствующие удлинениям 1, 2, 3, 4 и 5 мм, извлекали из автоматически записываемой кривой. Если целевое удлинение не совпадало с исходной точкой измерения, значение нагрузки определяли с помощью линейной интерполяции между двумя соседними точками данных. Выходные параметры представляли собой усилия растяжения при малых деформациях по направлениям основы, утка и диагонали, с единицей измерения кгс (сН).

4. Параметры изгиба в направлениях основы, утка и диагонали 45° . Тест, связанный с изгибом, проводили с использованием модифицированного метода консоли, адаптированного из ASTM D1388 [163]. Устройство состояло из горизонтальной платформы, наклонной опорной поверхности и двух линейок для записи параметров расстояния, связанных с изгибом. Образцы вырезали по направлениям основы, утка и диагонали и позволяли им изгибаться под действием силы тяжести. Контактное расстояние фиксировал как горизонтальное расстояние от края платформы до первой точки контакта пробы с нижней опорой. Расстояние перемещения фиксировали как горизонтальное расстояние, необходимое для того, чтобы конец пробы достиг наклонной контрольной линии. В данной диссертации контактное расстояние и расстояние перемещения рассматривали как параметры расстояний, связанных с изгибом.

5. Коэффициент драпируемости DC . Тест круговой драпируемости проводили в соответствии с ISO 9073-9:2008 [164]. Круглый образец размещали на драпетре Касика, чтобы сформировать естественный профиль драпируемости под действием силы тяжести. Проецированное изображение пробы фотографировали сверху и импортировали в ImageJ для калибровки масштаба и измерения проецируемой площади. Выходной параметр — коэффициент драпируемости DC , который характеризует поведение ткани на традиционной круговой опоре.

Толщина, GSM, усилия растяжения при малых удлинениях и параметры изгиба использовали как набор входных параметров для построения цифрового двойника ткани. DC использовали в качестве традиционный показатель драпируемости для оценки измерений ИИ, валидации нового теста драпируемости [158–164].

Все образцы ткани кондиционировали в стандартной текстильной атмосфере перед

тестированием. Температура окружающей среды составляла 20 ± 2 °С, относительная влажность — $65\pm 4\%$, а время кондиционирования было не менее 24 ч [159]. Направления основы и утка были определены и отмечены до раскроя проб, чтобы обеспечить согласованность направлений при тестировании на растяжение, изгиб, драпируемость и при фотографировании. Пробы вырезали из различных участков каждой ткани для уменьшения влияния краевых эффектов, локальных дефектов и локальных структурных вариаций на результаты измерений [158,159].

На рис. 2.5 показаны схемы проб для различных тестов.

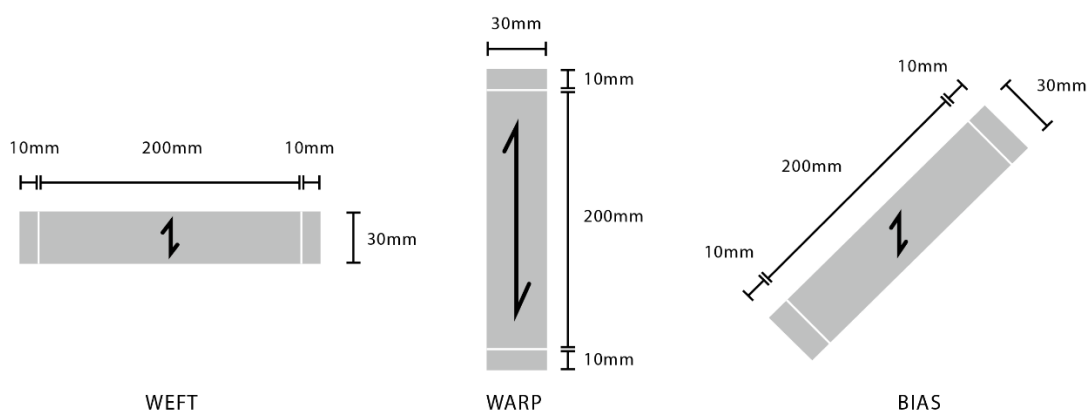


Рисунок 2.5 – Размеры физических образцов, подготовленных для тестов GSM, толщины, растяжения, изгиба

Как показано на Рис. 2.5, различные тесты физических свойств требовали различных геометрий образцов и эффективных площадей тестирования. Плоские образцы использовали для тестов GSM и толщины. Образцы для тестов на растяжение и изгиб вырезали по направлениям основы, утка и диагонали. Круглый образец использовали для теста драпируемости, и по его проецируемой площади рассчитывали традиционный коэффициент круговой драпируемости DC . На рис. 2.6 показаны приборы и принципы измерений, использованные в тестах.



a



b



c

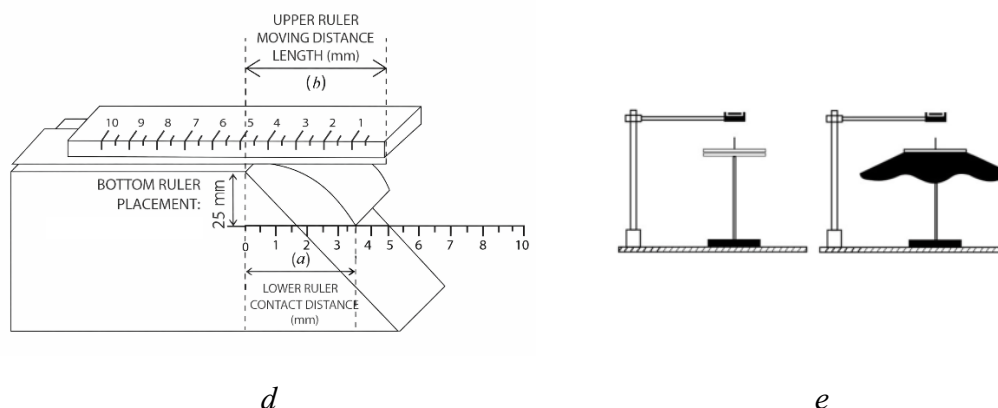


Рисунок 2.6 – Приборы и принципы измерений, использованные в тестах:
a – измерение GSM, *b* – измерение толщины, *c* – тест на растяжение, *d* – тест на изгиб, *e* – тест круговой драпируемости

Уравнение (2.4) показывает расчёт коэффициента круговой драпируемости DC :

$$DC = \frac{A_s - A_d}{A_D - A_d} \quad (2.4)$$

где DC — коэффициент драпируемости, A_s — проецируемая площадь тени драпированной пробы, A_d — площадь опорного диска, A_D — общая площадь исходной плоской недрапированной круглой пробы.

Коэффициент DC , полученный по уравнению (2.4), является безразмерным параметром, используемым для характеристики драпируемости ткани при традиционном условии круговой опоры.

Таблица 2.5 показывает систему кодирования параметров, использованную для согласования физических эталонных значений с результатами измерений ИИ.

Таблица 2.5– Параметры выхода, полученные в ходе тестирования физических свойств

Свойство	Измеряемые параметры	Направление измерения	Единица измерения	Код параметра
Толщина	T_f	—	мм	①
GSM	G	—	г/м ²	②
Нагрузка на растяжение при малых деформациях 1–5 мм	1 мм	Основа	кгс (сН)	③
	2 мм			④
	3 мм			⑤
	4 мм			⑥
	5 мм			⑦
	1 мм	Уток	⑧	

	2 мм			⑨
	3 мм			⑩
	4 мм			⑪
	5 мм			⑫
	1 мм	Диагональ 45°		⑬
	2 мм			⑭
	3 мм			⑮
	4 мм			⑯
	5 мм			⑰
Изгиб	Расстояние контакта	Основа	мм	⑱
	Расстояние перемещения			⑲
	Расстояние контакта	Уток		⑳
	Расстояние перемещения			㉑
	Расстояние контакта	Диагональ 45°		㉒
	Расстояние перемещения			㉓
Коэффициент драпируемости	DC	–	–	⑳

Эта система кодирования предотвращает путаницу между параметрами с различными единицами, направлениями и физическим значением и позволяет вычислять $MAPE$ через прямое соответствие каждого результата ИИ и его соответствующего физического эталона. Символ для DC отличает результат традиционного теста драпируемости от DC_{SFM} , полученного методом SFM, описанным в главе 3.

2.3.2 Метод прогнозирования параметров формирования базового платья

Метод прогнозирования параметров формирования базового платья использовали для установления количественной зависимости между DC_{SFM} и параметрами формы базового платья (BD). DC_{SFM} выступал в качестве входной переменной, а параметры P_{d1} , P_{d2} , P_{d3} и P_{d4} базового платья выступали в качестве переменных отклика. P_{d1} , P_{d2} и P_{d3} соответственно характеризовали изменение формы BD по длине, фронтальной проекционной ширине и углу

наклона бокового контура, а P_{d4} характеризовал коэффициент драпируемости на уровне низа изделия. Данный метод позволял прогнозировать параметры формы ВД на основе DC_{SFM} и снижать объём работ, связанных с прямым изготовлением или моделированием полных образцов изделия.

Данные для моделирования группировали по типу ткани и уровню ВД. ВД1–ВД5 соответствовали пяти уровням длины платья. В пределах каждой группы ткани средние значения повторных измерений DC_{SFM} на одном уровне использовали как входные значения, а средние значения P_{d1} , P_{d2} , P_{d3} и P_{d4} соответствующего уровня ВД использовали как значения отклика формы. Такое сопоставление обеспечивало согласованность между входными значениями DC_{SFM} и уровнями формы ВД и исключало объединение данных разных уровней в одно общее среднее значение.

DC_{SFM} для проб средней длины использовали для вспомогательной оценки переходной связи между драпировочной реакцией на уровне проб и драпировочной реакцией на уровне ВД, но он не входил в уравнения прогнозирования P_{d1} – P_{d4} в качестве входной переменной. В итоговой модели прогнозирования использовали DC_{SFM} как входную переменную и P_{d1} , P_{d2} , P_{d3} и P_{d4} как выходные параметры.

Корреляционный анализ использовали для проверки наличия статистической связи между DC_{SFM} и параметрами формы ВД из тканей F1, F2 и F3. Объектами анализа являлись связи между DC_{SFM} и параметрами P_{d1} , P_{d2} , P_{d3} и P_{d4} . Поскольку каждая ткань включала только пять уровней ВД, результаты корреляционного анализа интерпретировали совместно с качеством регрессионной аппроксимации и ошибкой валидации. На основе корреляционного анализа для каждой ткани F1, F2 и F3 получали модели линейной регрессии следующего вида:

$$Pd = a \cdot DC_{SFM} + b \quad (2.5)$$

где Pd - один из параметров формы P_{d1} , P_{d2} , P_{d3} или P_{d4} ; DC_{SFM} — коэффициент драпируемости, измеренный методом SFM; a и b — коэффициенты регрессии.

На этапе валидации показатель DC_{SFM} использовали как входную переменную. После подстановки DC_{SFM} в соответствующее уравнение регрессии для данной ткани получали прогнозные значения P_{d1} , P_{d2} , P_{d3} и P_{d4} . Прогнозные значения сравнивали с измеренными параметрами формы базового платья (VD) для проверки адекватности уравнений.

2.4 Методы оценки и валидации

2.4.1 Метод оценки согласованности прогнозирования параметров и статистической проверки

Метод оценки согласованности прогнозирования параметров и статистической проверки использовали для оценки согласованности между прогнозными и измеренными значениями, а также для определения статистических различий между параметрами или распределениями ошибок при разных экспериментальных условиях. Результаты прогнозирования параметров формы BD оценивались с использованием относительной ошибки (relative error, RE). Линейная зависимость между DC_{SFM} и параметрами формы BD оценивали с помощью корреляционного анализа Pearson. Степень аппроксимации регрессионной модели характеризовали коэффициентом детерминации R^2 . Различия между результатами виртуального и физического тестов оценивали с использованием t-критерия для независимых выборок. Ошибки измерений ИИ, полученные в разные временные точки или при разных версиях моделей, сравнивали с использованием критерия знаковых рангов Wilcoxon. Влияние типа графических доказательств, типа ткани и их взаимодействия на ошибку измерений ИИ оценивали с помощью дисперсионного анализа.

Согласованность прогнозирования параметров P_{d1} , P_{d2} , P_{d3} и P_{d4} формы BD выражалась через RE. Расчёт выполняли следующим образом:

$$RE = \frac{P_{pre} - P_{mea}}{P_{mea}} \times 100\% \quad (2.6)$$

где RE — относительная ошибка; P_{pre} — прогнозное значение параметра формы BD; P_{mea} — соответствующее измеренное значение. При $RE > 0$ прогнозное значение выше измеренного значения; при $RE < 0$ прогнозное значение ниже измеренного значения.

Корреляционный анализ Pearson использовали для оценки силы линейной связи между DC_{SFM} и параметрами P_{d1} , P_{d2} , P_{d3} и P_{d4} . Коэффициент корреляции отражал степень линейной связи между переменными, а уровень значимости использовался для определения статистической значимости этой связи в пределах исследуемой выборки. Поскольку каждая ткань включала только пять уровней BD, коэффициент корреляции и р-значение интерпретировались совместно с распределением точек, степенью регрессионной аппроксимации и ошибкой валидации.

Линейный регрессионный анализ использовали для установления прогнозной зависимости между DC_{SFM} и параметрами формы BD. Степень аппроксимации регрессионной модели оценивалась с помощью R^2 .

Средние различия между результатами виртуального и физического тестов оценивали с

использованием t-критерия для независимых выборок. При выполнении условия гомогенности дисперсий использовался t-критерий для независимых выборок с равными дисперсиями. При нарушении условия гомогенности дисперсий интерпретация выполнялась по результатам коррекции Welch. Уровень значимости задавался как $p < 0.05$.

Распределения ошибок при разных временных точках или разных версиях моделей ИИ оценивали с использованием критерия знаковых рангов Wilcoxon. В качестве парных данных использовали APE, полученные для одной и той же ткани, одной и той же группы проб и одной и той же позиции параметра. Этот критерий применяли для определения того, произошло ли систематическое изменение распределения ошибок между двумя условиями тестирования. Критерий знаковых рангов Wilcoxon не требует нормального распределения парных разностей и поэтому подходит для сравнения ошибок измерений ИИ между временными точками или версиями моделей.

Влияние типа ткани и их взаимодействия на APE оценивали с помощью дисперсионного анализа. Категория параметра могла использоваться как группирующий или контрольный фактор для снижения влияния различий в размерности параметров и базовом уровне ошибок. Результаты дисперсионного анализа интерпретировали по р-значению и величине эффекта. Если условия гомогенности дисперсий или распределения остатков выполнялись недостаточно, результаты дисперсионного анализа рассматривались как характеристика тенденции влияния факторов и интерпретировались совместно с описательной статистикой или непараметрическими тестами.

Таким образом, указанные статистические методы применяли к разным объектам оценки:

- 1) RE для оценки ошибки прогнозирования параметров формы BD,
- 2) корреляционный анализ Pearson и R^2 для оценки линейной связи и степени аппроксимации между DC_{SFM} и параметрами формы BD,
- 3) t-критерий для сравнения результатов виртуального и физического тестов SFM,
- 4) критерий знаковых рангов Wilcoxon и дисперсионный анализ для сравнения распределений ошибок измерений ИИ и анализа влияния факторов.

2.4.2 Метод проверки геометрической согласованности контура и локальных областей

Метод проверки геометрической согласованности контура и локальных областей использовали для оценки геометрического соответствия между эталонным объектом и объектом валидации на двумерной проекционной плоскости. В качестве объектов сравнения использовались бинарные маски переднего плана. Метод применяли для оценки степени

перекрытия и отклонения границ общего силуэта платьев, контура области талия–бедро, локальной области плеча и контрольной области верхней части. Такая геометрическая ROI представляла собой бинарную область и не использовалась для оценки значений серого, текстурной структуры или светлой реакции.

Эталонное изображение и изображение валидации преобразовывались в бинарные маски переднего плана при одинаковом виде и масштабе. Бинарную маску эталонного объекта обозначали как M_{ref} , а бинарную маску объекта валидации — как M_{val} . При оценке общего силуэта M_{ref} и M_{val} представляли полную область переднего плана платья. При оценке локальных областей они представляли соответствующие бинарные области ROI. Перед сравнением масок выполняли пространственное выравнивание методом трансляции, без дополнительного масштабирования, растяжения или коррекции негибких деформаций.

Степень регионального перекрытия между эталонной и валидационной масками оценивали с помощью коэффициента пересечения по объединению (intersectionoverunion, IoU). IoU соответствует определению индекса Jaccard и используется для оценки отношения площади пересечения двух бинарных областей к площади их объединения; чем ближе значение к 1, тем выше степень перекрытия двух областей [167]. В данной работе IoU использовали для оценки степени совпадения двумерной проекции эталонного объекта и объекта валидации в общем контуре или локальной ROI.

Коэффициент Dice использовали как дополнительный показатель перекрытия для уточнения степени совпадения двух бинарных областей. Как и IoU, коэффициент Dice относится к метрикам регионального перекрытия и подходит для оценки пространственной согласованности между результатами бинарной сегментации [167]. В проверке контуров коэффициент Dice использовали совместно с IoU для оценки степени перекрытия между эталонной и валидационной масками.

Расширение или сжатие валидационной маски относительно эталонной маски оценивали с помощью относительной разницы площадей. Этот показатель относится к метрикам различия размеров областей и используется для определения того, имеет ли объект валидации большую или меньшую площадь по сравнению с эталонным объектом [167,168]. Положительное значение относительной разницы площадей указывает на то, что площадь валидационной области больше площади эталонной области, а отрицательное значение указывает на уменьшение площади валидационной области относительно эталонной. Этот показатель сохраняет направление изменения площади и подходит для оценки общей тенденции расширения или сжатия валидационного контура относительно эталонного контура.

Отклонение границы использовали для описания пространственной разницы между эталонной и валидационной границами. Результаты отклонения границы выражались через среднее отклонение границы, 95%-ный процентиль отклонения границы и максимальное

отклонение границы. Среднее отклонение границы отражало общий уровень смещения границы, 95%-ный перцентиль характеризовал верхний диапазон отклонений большинства граничных точек, а максимальное отклонение использовалось для выявления наиболее выраженной локальной несогласованности границы.

ROI для геометрической согласованности и ROI-1, ROI-2 для анализа градационной реакции PLD имели разные значения. ROI для геометрической согласованности основан на бинарных контурах или локальных бинарных областях и использовался для расчёта IoU, коэффициента Dice, относительной разницы площадей и отклонения границы. ROI-1 и ROI-2 основывались на областях изображения в градациях серого и использовались для сканирования порогов, извлечения процента площади светлой области и оценки структурной схожести. Поэтому проверка геометрической согласованности контура и локальных областей отражала только пространственное соответствие двумерного проекционного контура или локальной бинарной области и не заменяла оценку градационной реакции или структурной схожести текстуры.

2.4.3 Метод проверки эквивалентного отклика и структурной схожести

Метод проверки эквивалентного отклика и структурной схожести использовали для оценки согласованности градационной реакции и локальной структурной схожести между целевым PLD и валидационным PLD в ключевых складчатых областях. В качестве областей анализа использовали общую область складок, ROI-1 и ROI-2. Общую область складок применяли для оценки близости общей градационной реакции основной складчатой зоны, а ROI-1 и ROI-2 — для оценки согласованности градационной реакции и структурной текстуры в разных локальных структурных позициях.

Фронтальные изображения целевого PLD и валидационного PLD преобразовывали в 8-битные изображения в градациях серого согласно процедуре обработки изображений, определённой в разделе 2.2.3. Затем по одинаковым правилам выделяли общую область складок, ROI-1 и ROI-2. Процент площади светлой области целевого PLD в определённой области анализа обозначали как A_{tar} , а процент площади светлой области валидационного PLD в соответствующей области обозначался как A_{val} . Если областью анализа была общая область складок, этот показатель соответствовал $A_{overall}$. Если областью анализа была ROI-1 или ROI-2, показатель соответствовал A_{ROI1} или A_{ROI2} .

Сравнение градационной реакции целевого PLD и валидационного PLD выполняли на основе принципа эквивалентных порогов. Эквивалентные пороги не требуют использования одного и того же фиксированного порога для двух изображений. Вместо этого в пределах соответствующих допустимых диапазонов порогов выбирали такие комбинации порогов, которые давали близкие значения процента площади светлой области. Такой подход

учитывал различия серого уровня, обусловленные цветом ткани, блеском и распределением теней, но требовал близости сегментированной площади светлой реакции складок. При этом фиксировался диапазон смещения порога, чтобы избежать искусственного уменьшения различий отклика за счёт произвольного выбора порога. Разница градационной реакции между целевым PLD и валидационным PLD в одной и той же области анализа рассчитывали следующим образом:

$$D_{\text{resp}} = |A_{\text{val}} - A_{\text{tar}}| \quad (2.7)$$

где D_{resp} — разница градационной реакции, выраженная в процентных пунктах; A_{tar} — процент площади светлой области целевого PLD в соответствующей области анализа; A_{val} — процент площади светлой области валидационного PLD в той же области анализа. Чем меньше D_{resp} , тем ближе светлая градационная реакция целевого PLD и валидационного PLD в данной области. Чем больше D_{resp} , тем более выраженным является различие градационной реакции. Этот показатель использовался для оценки согласованности отклика по площади светлой области и не применялся для оценки MAPE параметров, измеренных ИИ, или геометрического перекрытия контура всего изделия.

Помимо разницы градационной реакции, смещение порога и тенденция отклика использовались как вспомогательные признаки для оценки обоснованности эквивалентного отклика. Смещение порога отражало различие между порогами, необходимыми целевому и валидационному изображениям для получения близкого отклика по площади. Тенденция отклика использовалась для определения того, совпадает ли направление изменения процента площади светлой области между целевым PLD и валидационным PLD при разных уровнях чертежа или разных схемах корректировки. Если направления изменений между соседними уровнями совпадали, тенденция градационной реакции в соответствующей области считалась согласованной. Если направления изменений не совпадали, это указывало на локальное различие отклика в данной области.

Локальная структурная схожесть оценивалась с использованием индекса структурного сходства (structural similarity index measure, SSIM). SSIM рассчитывали по стандартному методу, предложенному Wang и соавт. [166], и использовали для сравнения локальной структуры изображений в градациях серого между целевым PLD и валидационным PLD в ROI-1 и ROI-2. SSIM учитывает яркость, контраст и структуру. Значение, близкое к 1, указывает на более высокую общую схожесть двух локальных изображений в градациях серого. Объектом оценки SSIM являлись двумерные изображения ROI в градациях серого; этот показатель не оценивал напрямую трёхмерную форму изделия, напряжённое состояние ткани или величину корректировки чертежа.

Компоненты яркости, контраста и структуры SSIM использовали для объяснения

источников изменения локальной схожести. Компонент яркости отражал близость среднего уровня серого двух ROI. Компонент контраста отражал близость амплитуды светло-тёмных изменений. Компонент структуры отражал согласованность локальной текстуры складок, распределения серого уровня и направления структурной реакции. Эти три компонента использовали как вспомогательные показатели для интерпретации результатов SSIM и не применялись отдельно как критерии полной согласованности формы PLD.

Эквивалентный отклик и SSIM соответствовали двум различным уровням валидации. Эквивалентный отклик использовали для определения того, формируют ли целевой PLD и валидационный PLD близкую реакцию по площади светлой области в общей области складок, ROI-1 и ROI-2. SSIM использовался для определения схожести локальной градационной структуры в ROI-1 и ROI-2. Первый уровень подчёркивал согласованность величины градационной реакции, второй — согласованность локальной структуры изображения. Совместное использование этих показателей позволяло оценить согласованность графической реакции между целевым объектом и объектом валидации после корректировки чертежа PLD.

ГЛАВА 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ НОВОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ДРАПИРУЕМОСТИ

3.1 Обоснование и моделирование виртуального антропоморфного драпометра

3.1.1 Обоснование необходимости нового устройства

В традиционных виртуальных испытаниях драпируемости обычно используют упрощенные геометрические опоры, такие как сферические, цилиндрические и конические стойки. В этих условиях проба ткани деформируется под действием силы тяжести, а коэффициент драпируемости DC рассчитывают по проекционной площади после драпировки. Такие стойки обеспечивают стабильные и воспроизводимые опорные границы для базовой симуляции драпировки. Однако они представляют собой идеализированные геометрические поверхности. Линия опоры, кривизна контакта и способ фиксации пробы существенно отличаются от условий, связанных с областью плечевого пояса, на которой формируется одежда на теле человека. Поэтому DC , полученный на таких геометрических стойках, главным образом отражает состояние драпируемости плоской пробы при упрощенных условиях опоры, а не поведение ткани в одежде в условиях телесно-ориентированных граничных ограничений [172].

Рисунок 3.1 показывает геометрические виртуальные стойки, использованные для предварительного сравнения.

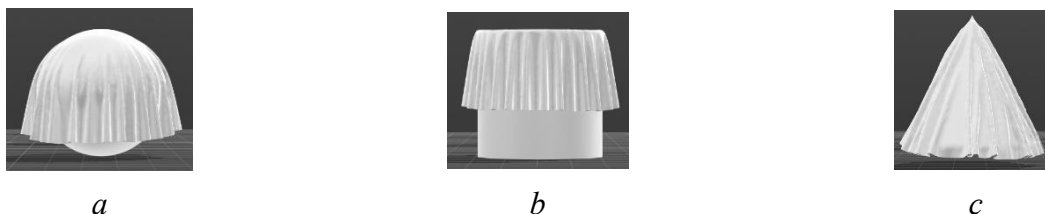


Рисунок 3.1- Геометрические виртуальные опоры, использованные для предварительного сравнения драпируемости: *a* - сферическая опора в CLO3D, *b* - цилиндрическая опора в Style3D, *c* - коническая опора в Style3D

Как показано на рис. 3.1, три виртуальные опоры представляют собой типичные упрощённые трехмерные опоры. Сферическая опора обеспечивает непрерывную криволинейную поверхность, цилиндрическая опора - криволинейную опору линейного типа, а коническая опора - наклонную опору. Хотя эти опоры могут формировать видимые контуры драпировки, их граничные условия определяются регулярными геометрическими примитивами, а не морфологией тела. Поэтому они больше подходят для базового сравнения состояний драпировки.

Чтобы проверить, позволяют ли геометрические опоры различать влияние структуры тканей, в одинаковой процедуре виртуального драпирования были испытаны три вида проб,

отличающихся направлением нитей и типом соединительного шва. DC рассчитывали по проекционной площади после драпировки. Таблица 3.1 показывает значения DC и коэффициента CV , полученные для проб, состоящих из двух частей и соединенных швом, на сферической, конической и цилиндрической опорах.

Таблица 3.1 - Значения DC и CV проб на виртуальных геометрических опорах

Структура образца	Коэффициент драпируемости DC		
	Сфера	Конус	Цилиндр
Основа–основа + стачной шов	0,44	0,48	0,43
Основа–уток + накладной с закрытыми срезами	0,43	0,47	0,42
Основа–диагональ + запошивочный шов	0,41	0,49	0,41
Среднее значение	0,43	0,48	0,42
CV , %	0,07	0,04	0,05

Как показано в Таблице 3.1, сферическая опора обеспечивает наибольший CV , равный 0,07, тогда как значения CV для конической и цилиндрической опор составили 0,04 и 0,05. Однако диапазон DC внутри каждой опоры оставался узким. Это означает, что регулярные геометрические опоры способны формировать измеримый драпировочный контур, однако не обеспечивают достаточной дифференциации в показателях и не отражают влияния направления раскроя проб и структуры шва.

Ограничение, выявленное при сравнении геометрических опор, заключается не в отсутствии деформации драпировки в виртуальной среде, а в несоответствии между упрощенными опорными поверхностями контакта пробы с опорой и реальными условиями драпировки одеждой. В реальных изделиях драпировка ткани ограничивается линией плеча, наклоном плеча, локальным контактом с верхней частью тела, жесткостью плечевого шва и относительной ориентацией передней и задней деталей пробы. Эти факторы влияют на начальную позицию формообразования пробы, путь передачи усилия и расширение нижнего края. Поэтому драпометр, предназначенный для оценки ткани в условиях, имитирующих поведение одежды, должен не только позволять ткани естественно свисать под действием силы тяжести, но и воспроизводить плечеподобную опорную поверхность фигуры.

Исходя из этого требования, поверхность контакта одежды с плечом человека была выбрана в качестве основной морфологической основы нового виртуального драпометра. По сравнению со сферической, конической и цилиндрической опорами плечевая опорная граница более подходит для новой системы испытаний SFM, поскольку она вводит структурные ограничения, связанные с одеждой, включая положение плечевого шва, соотношение передней и задней деталей пробы, расположение направления нитей и расширение нижнего края. Соответственно, новый виртуальный драпометр был

смоделирован не на основе регулярного геометрического примитива, а на основе стандартизированной поверхности плечевой опоры.

3.1.2 Моделирование виртуального драпометра и определение геометрических параметров

После того как плечевая опорная граница была определена как основа для моделирования нового драпометра, виртуальный драпометр был построен на основе данных китайской размерной системы женской одежды, при этом размер 160/84A[169] использовался как референтный размер тела. Форма опоры не копировала плечевую область конкретной фигуры, а синтезировала особенности плечевых областей 10 женских виртуальных тел(160/76Y-160/100C). Посредством локального извлечения, измерения секционных параметров и усреднения была получена стандартизированная поверхность плечевой опоры. Эта процедура сохранила базовые характеристики кривизны опорной границы человеческого плеча, одновременно снижая влияние индивидуальной морфологии тела на испытательную границу. Рисунок 3.2 показывает процесс генерации плечевой области и определение геометрических параметров виртуальной поверхности плечевой опоры.

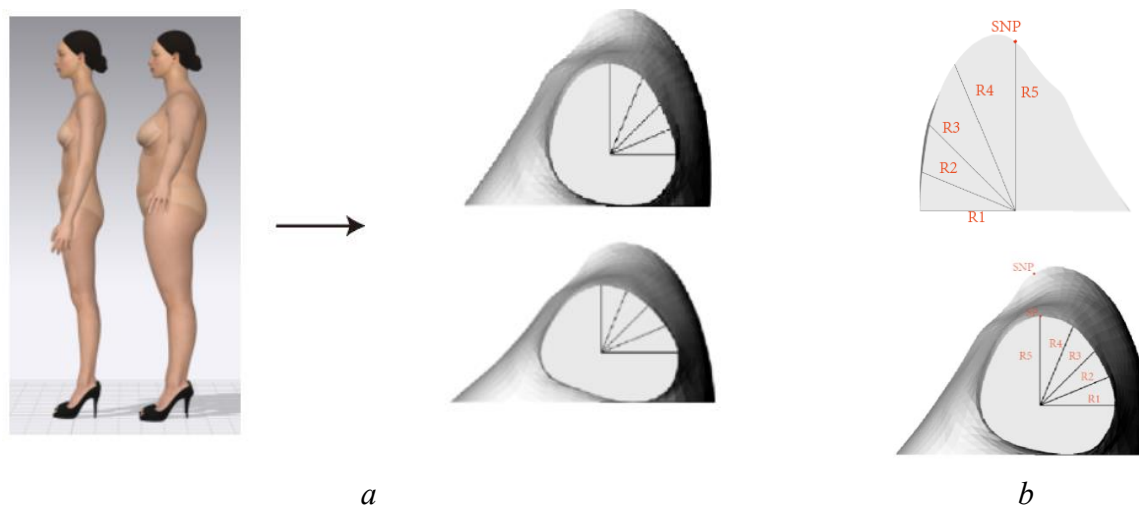


Рисунок 3.2 – Извлечение и параметрическое определение виртуальной поверхности плечевой опоры: *a* – виртуальные фигуры разных размерных градаций и выделенная плечевая область, *b* – определение геометрических параметров опорной поверхности

Как показано на Рис. 3.2, процесс моделирования включал четыре последовательных этапа.

Во-первых, в CLO3D были созданы женские виртуальные фигуры, охватывающие различные размерные варианты в соответствии с китайской системой размеров женской одежды.

Во-вторых, модели в формате OBJ были импортированы в Rhinoceros 7, где сетка человеческого тела была сегментирована и преобразована в поверхность NURBS (non-uniformrationalB-spline) для последующего геометрического выделения и реконструкции поверхности.

В-третьих, опорная область плеча и шеи была выделены в соответствии с ключевыми антропометрическими точками. Ширина опорной конструкции определялась расстоянием от шейной точки сбоку (SNP) до плечевой точки (SP), а высота — расстоянием от SNP до нижней границы проймы.

Наконец, выделенные плечевые поверхности были измерены и усреднены в рамках единой системы секционных параметров, что позволило реконструировать виртуальную поверхность плечевой опоры. На Рис. 3.2,*a* показаны примеры женских виртуальных фигур разных размеров, а на Рис. 3.2,*b*- вертикальные сечения через SP и SNP и измерения R1-R5, использованные для геометрической стандартизации.

Для задания устойчивой геометрической границы виртуальной опоры вертикальные сечения через SP и SNP были выбраны в качестве основных управляющих сечений. На каждом сечении были определены пять радиусных параметров R1–R5. Угловым интервалом между соседними радиусами был установлен равным $22,5^\circ$ для описания изменения кривизны от нижней границы опорной поверхности к верхней области. Линия плеча была описана двумя параметрами: длиной по поверхности и линейным расстоянием, чтобы можно было различать длину криволинейного измерения вдоль поверхности плеча и пространственное прямолинейное расстояние между двумя контрольными точками. Таблица 3.2 показывает усреднённые значения этих параметров.

Таблица 3.2 – Усреднённые геометрические параметры виртуальной поверхности плечевой опоры

Радиус поперечного сечения в SP, мм					Радиус поперечного сечения в SNP, мм					Линия плеча, мм	
R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	Расстояние по поверхности	Линейное расстояние
68.3	66.4	68	75	78.7	105.6	111.9	130.7	162.2	165.8	128.54	124.32

Как показано в Таблице 3.2, по сравнению с сечением через SP значения R1–R5 в сечении SNP в целом были больше, что соответствует морфологии женских фигур. Длина

плечевой линии по поверхности составляла 128,54 мм, а линейное расстояние 124,32 мм. Разница 4,22 мм показывает, что плечевая линия не являлась простым прямым соединением, а представляет пространственную траекторию с определенной степенью кривизны вдоль плечево-шейной поверхности. Эти параметры совместно определяли ширину, высоту и кривизну виртуальной поверхности плечевой опоры для виртуального испытания драпируемости.

На основе геометрических параметров, представленных в Таблице 3.2, виртуальная поверхность плечевой опоры была реконструирована в Rhinoceros 7 и импортирована в Style3D в формате OBJ. Реконструированная модель использовалась как виртуальный драпометр для последующих испытаний SFM. Рис.3.3 показывает окончательную форму виртуальной плечевой опоры в Style3D.

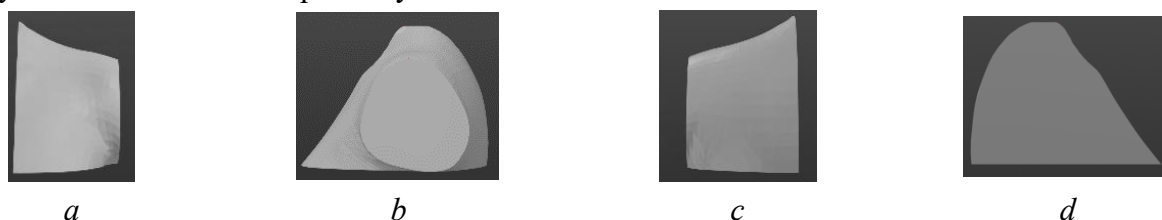


Рисунок 3.3 – Новая виртуальная плечевая опора, сгенерированная в Style3D: *a* – вид спереди; *b* – вид слева; *c* – вид сзади; *d* – вид справа

Виртуальный драпометр обеспечивает единую геометрическую границу для проектирования и размещения проб и измерения DC_{SFM} . По сравнению с регулярными геометрическими опорами (рис.3.1) новая опора вводит в виртуальную среду граничные условия, связанные с одеждой, включая плечевую линию, наклон плеча, шейную точку сбоку, плечевую точку и нижнюю границу проймы. Такие условия позволяют пробе формировать драпировочную морфологию, более близкую к естественному состоянию ткани на опорной поверхности фигур. Новый метод получил название метода плечевой посадки ShoulderFitting Method (SFM).

3.2 Проектирование и реализация физического прототипа драпометра по новому методу

После моделирования и определения геометрических параметров виртуальной поверхности плечевой опоры виртуальный драпометр был далее изготовлен в виде физического прототипа с помощью 3D-печати. Физический драпометр был спроектирован таким образом, чтобы сохранять особенности опорной поверхности в процессе драпирования пробы. На Рис. 3.4 показаны вид спереди, вид сбоку и вспомогательное лазерное устройство.

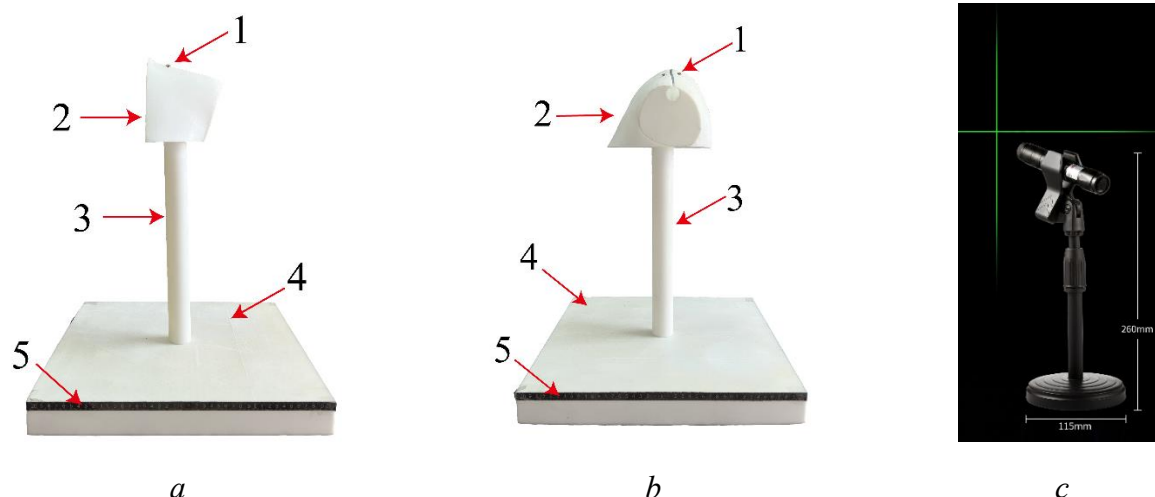


Рисунок 3.4 - Физический прототип драпометра и вспомогательное измерительное устройство: *a* - вид спереди; *b* - вид сбоку; *c* - вспомогательное лазерное опорное устройство

Как показано на Рис. 3.4, физический драпометр состоит из пяти основных частей, а вспомогательное лазерное опорное устройство используется как отдельное вспомогательное средство измерения. Обозначение 1 соответствует магниту, 2 — опоре, 3 — резьбовой модульной опорной стойке, 4 — основанию, 5 — линейке по переднему краю. Магнит расположен в верхней части опоры и служит для стабилизации исходного положения пробы при размещении уменьшения локального смещения до отпуска пробы. Опора является основным испытательным интерфейсом, который непосредственно обеспечивает плечеподобную граничную опору для пробы. Длина опоры составляет 124,04 мм, ширина — 197,04 мм, а высота — 142,44 мм. Эти размеры соответствуют геометрической логике виртуальной поверхности фигур, благодаря чему опорная граница, используемая в физическом испытании, остается согласованной с границей, применяемой в виртуальном испытании. Резьбовая модульная опорная стойка соединяет опору и основание. Длина каждой секции стойки составляет 35 см и предусмотрены четыре секции, чтобы высоту опоры можно было регулировать в зависимости от требуемой длины образца и наличия пространства для свисания. Размер основания составляет 40 см × 40 см × 5 см, что обеспечивает стабильную горизонтальную основу для драпометра и уменьшает влияние смещения устройства в процессе драпирования образца. Линейка по переднему краю размещена вдоль переднего края основания и служит линейной опорой для регистрации ширины низа.

Как показано на Рис. 3.4,с, вспомогательное лазерное опорное устройство имеет высоту 260 мм и ширину основания 115 мм и обеспечивает получение двух пересекающихся лазерных лучей — горизонтального и вертикального. Вертикальный лазерный луч может использоваться для оценки отклонения центральной линии пробы или бокового контура, а горизонтальный - для определения высоты линии низа и положения локально опорного

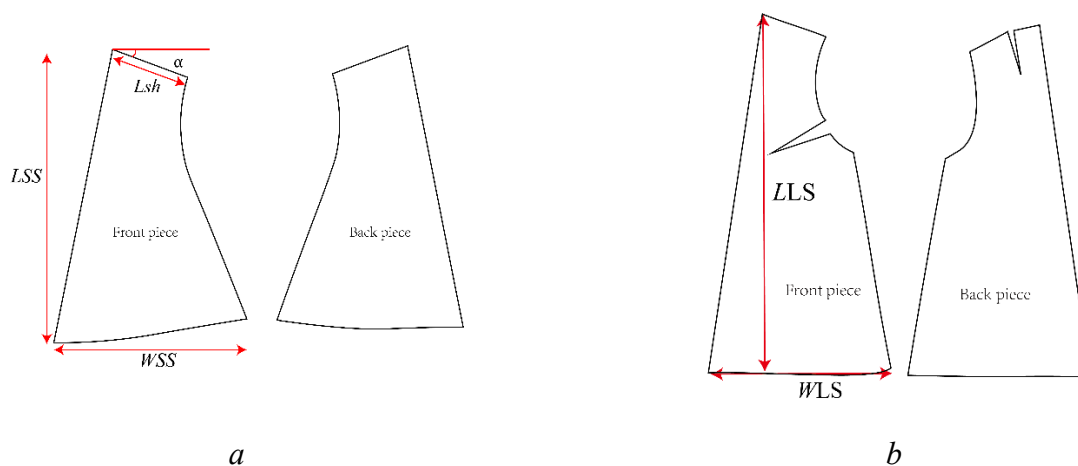
устройства повышает согласованность выравнивания образца и геометрических измерений в ходе физических испытаний.

Во время испытания образец сначала размещают на опоре таким образом, чтобы его верхняя опорная область соприкасалась с плечеподобной криволинейной поверхностью. Магнит стабилизирует исходное состояние пробы в момент контакта и предотвращает заметное смещение до отпущения образца. После отпущения образец естественно драпируется под действием силы тяжести. С помощью линейки на переднем крае измеряют ширину внизу, а с помощью лазерного устройства – горизонтальные и вертикальные размеры.

3.3. Пробы для испытаний

Пробы для оценки драпируемости включали стандартный круговой образец Касика (Cusick) и новые пробы для разработанного стенда (ShoulderFittingMethod, SFM). Стандартный круговой образец Касика представлял собой плоский круг и коэффициент круговой драпируемости DC был получен на основе этого теста. Этот образец служил традиционной эталонной ссылкой для оценки драпируемости тканей.

Образцы SFM включали короткую (SS), длинную (LS) пробы и пробу в виде целого платья. Короткий образец SS формировали путем соединения двух деталей в области плеча и использовали для моделирования влияния плечевых швов изделия, жесткости и направление драпировки ткани. Для SS были разработаны три структуры плечевых швов: s_1 – стачной шов, s_2 – накладной с закрытыми срезами и s_3 – запошивочный шов. Длинный образец LS создавали на основе SS путем увеличения длины и ширины, чтобы сформировать промежуточную форму между SS и платьем. Целый образец имел три варианта обработки нижнего края, h_1 , h_2 и h_3 для сравнения влияния конструкции низа на контур драпировки при отсутствии плечевого шва. На Рис. 3.5 показаны структурные формы и конструктивные переменные проб.



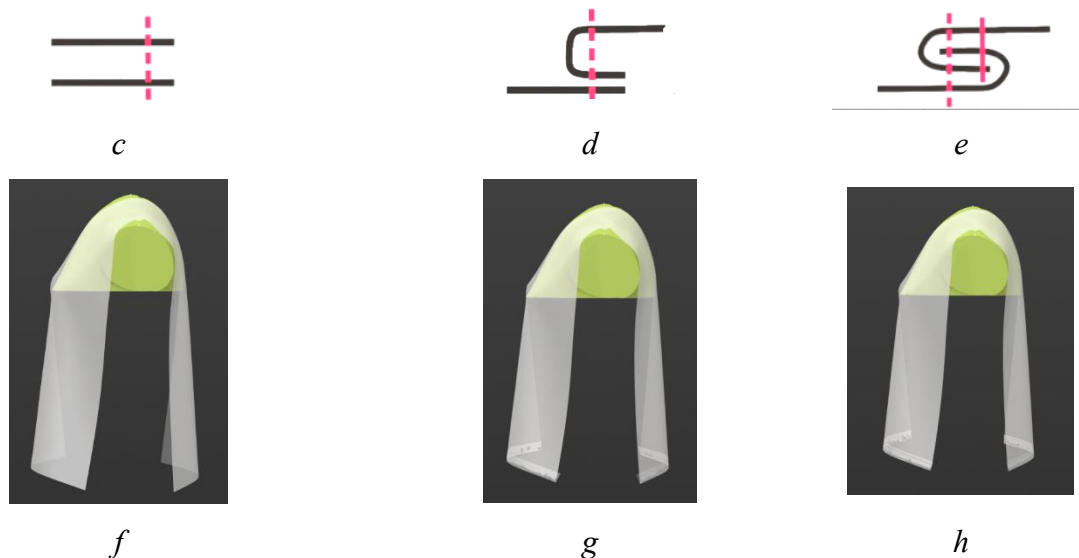


Рисунок 3.5 – Геометрические формы и локальные конструктивные переменные проб:
 a – SS, b – LS, c – s_1 стачной шов, d – s_2 накладной с закрытыми срезами, e – s_3 запошивочный шов, f – h_1 нижний край без подгиба, g – h_2 нижний край с подогнутым срезом, h – h_3 нижний край со швом в подгибку

Как показано на Рис. 3.5, SS и LS выполняли разные функции тестирования. SS использовался как базовая структура пробы для тестирования драпировки по методу SFM, с фокусом на влияние угла наклона плеча, ширины пробы, структуры плечевого шва и направления раскроя. LS расширял SS по длине и ширине, позволяя тестируемому объекту переходить к более висящей форме, приближенной к одежде. Структуры швов s_1 , s_2 и s_3 вводили различные локальные условия жесткости вдоль плечевого шва. Обработки нижнего края h_1 , h_2 и h_3 использовали только для цельного образца, чтобы эффект обработки подола можно было наблюдать без влияния плечевого шва.

После определения структурных форм образцов необходимо зафиксировать их параметры, уровни изменения и экспериментальные функции. Таблица 3.3 показывает виды проб и соответствующие конструктивные переменные.

Таблица 3.3 – Функции проб

Тип пробы	Параметр	Символ	Значение и тип	Статус параметра
Круглая	Диаметр	-	30 см	фиксированный
SS	Сумма углов наклона передней и задней части	α	20°, 25°, 30°, 35°, 40°	переменный
	Длина плечевого среза	L_{sh}	12 см	фиксированный
	Длина SS	L_{SS}	45 см	фиксированный
	Ширина SS	W_{SS}	21, 25, 29, 33, 36	переменный

			37,8, 42 см	
	Структура плечевого шва	s	s_1 – стачной шов; s_2 – накладной с закрытыми срезами; s_3 – запошивочный шов	переменный
	Направление раскроя	o	o_1 – по основе; o_2 – поутку; o_3 – по диагонали	переменный
Цельный образец	Обработка низа	h	h_1 – нижний край без подгиб a ; h_2 – загнутый нижний край; h_3 – шов подгибку	переменный
LS	Длина LS	L_{LS}	45, 55, 65, 75, 85 см	переменный
	Ширина LS	W_{LS}	25, 29, 32, 35, 38 см	переменный

Как показано в Таблице 3.3, круглый образец, SS, цельный образец и LS соответствовали различным целям тестирования. Круглый образец использовался для получения традиционного эталона DC. Диапазон углов наклона плечевых срезов для SS был установлен в пределах 20–40°, что было выведено из диапазона углов переда и спинки чертежей базовых конструкций. Интервал в 5° использовали для формирования управляемого градиента наклона плеча. Длина плеча L_{sh} была установлена на уровне 12 см в соответствии со средней длиной человеческого плеча. Длина SSL_{SS} была установлена на 45 см, чтобы соответствовать расстоянию от плеча до талии и обеспечить достаточное пространство для естественной драпировки. Ширина W_{SS} была выведена из диапазона пропорций груди, а значения ширины внизу от 21 см до 42 см представляли вариацию от узкого до более широкого.

Структура плечевого шва использовалась для сравнения различий локальной жесткости, вызванных различными конструкциями швов. Направление раскроя o было выбрано по основе, утку и диагонали для изучения влияния анизотропии ткани. Цельный образец не содержал плечевой шов и имел разную обработку нижнего края. Поэтому h_1 , h_2 и h_3 использовали как переменные для прогнозирования формы изделия, а служили структурными контрольными параметрами в условиях отсутствия плечевого шва. Длина и ширина LS были организованы как парные уровни размеров, а не как полные факторные

комбинации, чтобы сформировать переходную шкалу от состояния драпировки SS к драпировке платья.

Согласно Таблице 3.3, группа проб SS состояла из трёх видов тканей, пяти уровней угла наклона плеча, шести уровней ширины, трёх структур плечевых швов и трёх направлений раскроя, что образовывало $3*5*6*3*3=810$ комбинаций. Цельная проба включала три структурных варианта в зависимости от трёх способов обработки нижнего края. Группа LS состояла из трёх видов тканей и пяти парных уровней длины и ширины, образуя $3*5=15$ комбинаций. Круглую пробу вырезали из каждой тестируемой ткани и использовался только для получения традиционного эталона *DC*.

3.4 Формирование алгоритма испытания драпируемости по новому методу

3.4.1 Формирование алгоритма в виртуальной среде

Ключевая задача заключалась в том, чтобы определить, как должна располагаться проба, как должно достигаться устойчивое драпированное состояние и какие геометрические параметры необходимо измерять для расчета DC_{SFM} . В отличие от традиционного метода драпируемости на круглом диске, опора SFM представляет собой не горизонтальный диск и не регулярную геометрическую опору, а криволинейную опорную поверхность, имитирующую плечевую область человеческого тела. Поэтому измерительная система не могла просто следовать алгоритму расчета *DC* на основе проекционной площади. Поэтому схемы измерения проб SS и LS должны были быть определены в соответствии с их пространственными характеристиками.

Для обеспечения согласованности исходного состояния SS в виртуальном тесте положение виртуального образца на опоре SFM контролировали с помощью функции Arrange Point в Style3D. Arrange Point не является точкой измерения DC_{SFM} и не участвует в последующем расчёте параметров, а используется только для задания исходного пространственного положения образца перед его освобождением под действием силы тяжести. В виртуальном тесте были заданы Arrange Point1 и Arrange Point2, которые соответственно контролировали исходное положение передней и задней деталей SS по двум сторонам опоры SFM.

Положение точек размещения определяли по геометрии плечевой опорной зоны и расположению передней и задней деталей SS относительно этой зоны. Расстояние между Arrange Point1 и Arrange Point2 составляло 24 см, что обеспечивало постоянный пространственный интервал между двумя деталями в зоне плечевой опоры. Каждая точка размещения была задана в центре соответствующей плоскости размещения, а расстояние от точки до этой плоскости составляло 5 см. Такой зазор предотвращал пересечение образца с

опорой или плоскостью размещения в начальном состоянии и уменьшал влияние случайного контакта до начала симуляции.

Такая настройка уменьшала случайное смещение, поворот и локальное предварительное растяжение виртуального образца, обеспечивая сопоставимые начальные граничные условия для разных SS. После освобождения образца точки размещения не ограничивали свободное драпирование его нижней части, поэтому стабилизированная форма определялась параметрами ткани, структурой образца и плечевой опорной границей SFM. Рис. 3.6 показывает исходное размещение SS на опоре SFM и его стабилизированное драпированное состояние.

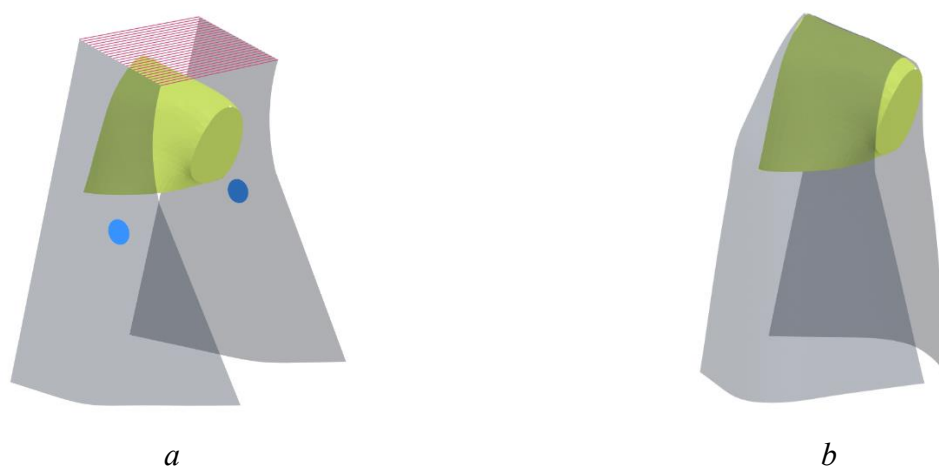


Рисунок 3.6 - Фиксированное положение для размещения и стабилизированное драпированное состояние SS: *a* – исходное размещение SS в фиксированном положении; *b* – стабилизированное драпированное состояние SS

Как показано на Рис. 3.6, ArrangePoint1 и ArrangePoint2 задают исходное пространственное соответствие между SS и опорой SFM. На Рис. 3.6,а передняя и задняя детали SS расположены по двум сторонам плечевой опорной зоны, а область плечевого соединения образца сохраняет устойчивое соответствие с опорой. Такое размещение формирует одинаковое начальное положение образцов перед запуском симуляции.

На Рис. 3.6,б показано состояние SS после достижения устойчивой драпированной формы под действием силы тяжести. На этом этапе точки размещения уже не являются объектом интерпретации результата, а морфология образца характеризует естественное свисание, расширение в направлении спереди назад, изменение ширины нижнего края и изгиб краевого контура при заданной плечевой опорной границе. Поэтому Рис. 3.6 используется для пояснения логики виртуального теста: исходное размещение, освобождение образца для драпировки и последующее измерение после стабилизации.

После достижения SS устойчивого драпированного состояния задача измерения была преобразована в извлечение геометрических параметров. В предварительных виртуальных испытаниях были сравнены три кандидатные методики измерения:

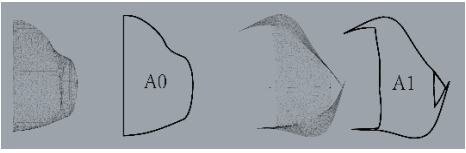
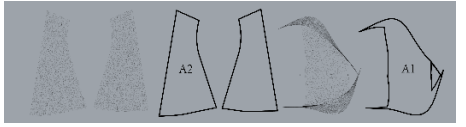
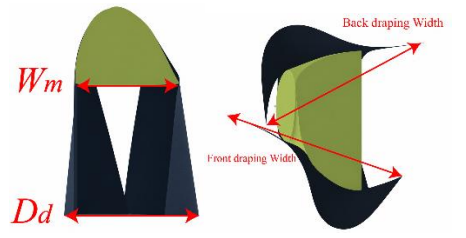
метод I основывался на соотношении между площадью опоры и проекционной площадью пробы,

метод II основывался на соотношении между исходной площадью плоской пробы и проекционной площадью,

метод III объединял изменение максимального передне-заднего расстояния с изменением средней ширины нижнего края.

Числовой диапазон, среднее значение и CV для трех методов использовали для определения лучшей методики измерения для SS. Таблица 3.4 сравнивает кандидатные методики измерения для SS.

Таблица 3.4 – Кандидатные методики измерения SS

Методикаиспытания	Уравнение	№	Результат			
			Мин.	Макс.	Средн ее	CV, %
I 	$DC_{SFM-I} = \frac{A_0}{A_1}$	(3.1)	0.54	0.78	0.62	0.38
II 	$DC_{SFM-II} = \frac{A_2}{A_1}$	(3.2)	0.16	0.23	0.19	0.36
III 	$DC_{SFM} = \frac{\Delta_2}{\Delta_1}$	(3.3)	0.24	0.86	0.66	0.93

Как показано в Таблице 3.4, A_0 , A_1 и A_2 обозначают площади, использованные только для сравнения кандидатных методик измерения SS. В Методе I A_0 обозначает фиксированную площадь плечевой опорной области до драпирования, A_1 обозначает проекционную площадь пробы после драпирования при том же условии наблюдения. В методе II A_2 обозначает исходную плоскую площадь пробы до драпирования, A_1 также используется как проекционная площадь пробы после драпирования. Следовательно, методы I и II являются методами, основанными на отношении площадей, но различаются выбором исходной площади для расета. Расчёт DC_{SFM} в методе III показан в уравнении (3.3), где DC_{SFM} — коэффициент драпируемости, измеренный методом SFM; Δ_1 — нормализованный параметр

расширения в передне-заднем направлении; Δ_2 — нормализованный параметр изменения средней ширины. Δ_1 обозначает отклик расширения драпированной пробы в передне-заднем направлении относительно эффективной ширины драпометра SFM и его расчёт показан в уравнении (3.4).

$$\Delta_1 = \frac{D_d}{W_m} \quad (3.4)$$

где D_d — максимальное передне-заднее расстояние пробы после драпировки; W_m — эффективная ширина драпометра SFM.

Δ_2 обозначает относительное изменение средней ширины образца до и после драпировки, и его расчёт показан в уравнении (3.5).

$$\Delta_2 = \frac{W_0 - W_d}{W_0} \quad (3.5)$$

где W_0 — средняя ширина образца до драпировки; W_d — средняя ширина образца после драпировки.

Сравнение показало, что методы, основанные только на соотношении площадей, не обеспечивают достаточной дифференциации структурных различий для SS. Метод I дал среднее значение 0,62 и CV 0,38, что показывает его способность отражать общий проекционный контур, но ограниченную чувствительность к различиям структуры образца. Метод II дал более узкий числовой интервал от 0,16 до 0,23, а его CV составил 0,36. Это означает, что замена фиксированной площади плечевой опоры на исходную плоскую площадь образца не привела к существенному усилению реакции на структурные изменения. Метод III дал самый широкий числовой интервал от 0,24 до 0,86 и наибольшее значение CV, равное 0,93. Следовательно, включение передне-заднего параметра и изменения средней ширины лучше отражает асимметричную деформацию SS на плечевой опоре. На основании этих результатов Метод III был выбран в качестве формальной методики расчёта DC_{SFM} для SS.

После определения методики измерения параметры образца SS все еще требовали стандартизации, поскольку ширина образца и угол наклона плечевого среза совместно влияют на расширение в передне-заднем направлении, изменении ширины нижнего края и изгиба контура низа в условиях плечевой опорной границы. При фиксированном условии виртуальной ткани VF3 значения DC_{SFM} были рассчитаны для различных сочетаний ширины образца SS и угла плеча в соответствии с методом III. Таблица 3.5 показывает значения DC_{SFM} для VF3 при различных ширинах образца SS и углах плеча.

Таблица 3.5 – Значения DC_{SFM} для пробы SS из виртуальной ткани VF3

Размер пробы, см	Угол наклона плечевого среза, °				
	20	25	30	35	40

21	0,65	0,57	0,44	0,33	0,27
25,2	0,68	0,64	0,61	0,51	0,46
29,4	0,87	0,78	0,66	0,50	0,44
33,6	0,82	0,79	0,74	0,66	0,54
37,8	0,90	0,85	0,77	0,64	0,60
42	0,86	0,84	0,79	0,75	0,73
Среднее значение	0,797	0,745	0,668	0,565	0,507
CV, %	12,8	15,0	18,9	27,1	32,1

Как показано в Таблице 3.5, при увеличении угла плеча с 20° до 40° среднее значение DC_{SFM} снизилось с 0,797 до 0,507. Это указывает на то, что больший угол плеча ограничивал расширение пробы. В то же время CV показал, что угол плеча 40° обеспечивает более сильную дифференциацию между различными условиями ширины образца. При условии 40° и ширине 21 см проба имеет значение DC_{SFM} 0,27, которое использовалось для метода III в последующем сравнении пяти виртуальных тканей. Поэтому угол плеча 40° и ширина пробы 21 см были выбраны в качестве стандартных условий сравнения для сопоставления метода III с традиционными коэффициентами DC , основанными на проекционной площади. Это условие использовали только для сравнения дифференцирующей способности различных методов расчета DC , тогда как полный градиент углов наклона плечевых линий и ширины был сохранен в последующем факторном анализе для пробы SS.

Чтобы оценить способность метода III дифференцированно оценивать входные факторы, он был дополнительно сопоставлен с тремя широко используемыми определениями DC , основанными на проекционной площади. Выбранные три метода рассчитывают DC на основе проекционной площади пробы или области опоры, однако их числовая направленность и чувствительность к различиям драпировки не являются одинаковыми [170]. Традиционный метод, основанный на проекционной площади, рассчитывает DC как отношение проекционной площади после драпировки к площади недеформированного плоского образца, как показано в уравнении (3.6).

$$DC_1 = \frac{A_p}{A_0} \quad (3.6)$$

где DC_1 — коэффициент драпируемости, полученный традиционным методом проекционной площади; A_p — проекционная площадь пробы после драпировки; A_0 — площадь пробы в недеформированном плоском состоянии. В данном определении ткань с лучшей драпируемостью обычно формирует меньшую проекционную площадь; следовательно, DC_1 обратно связан с драпируемостью.

Модифицированный метод вычитает площадь опоры из расчета проекционной площади, чтобы уменьшить влияние опорной области на эффективную драпированную площадь, как показано в уравнении (3.7).

$$DC_2 = \frac{A_p - A_{st}}{A_0 - A_{st}} \quad (3.7)$$

где DC_2 — коэффициент драпируемости, полученный модифицированным методом проекционной площади; A_{st} — проекционная площадь опоры. Этот метод рассчитывает только эффективную драпированную область за пределами площади опоры и поэтому ближе к эффективной области драпировки, используемой в традиционных методах вырезания и взвешивания, а также в методах анализа изображений.

Комплементарный метод проекционной площади рассчитывает DC_3 как отношение между непокрытой проекционной площадью и эффективной площадью за пределами области опоры, как показано в уравнении (3.8).

$$DC_3 = \frac{A_0 - A_p}{A_0 - A_{st}} \quad (3.8)$$

где DC_3 — коэффициент драпируемости, полученный комплементарным методом проекционной площади. В отличие от DC_1 и DC_2 , DC_3 увеличивается по мере повышения драпируемости; следовательно, его числовая направленность ближе к содержанию метода III.

Четыре метода сравнивали в рамках одного и того же виртуального процесса моделирования и измерения. В методе III использовали пробу SS с углом наклона плечевого среза 40° и шириной 21 см. Конструкция пробы SS включала направления нитей по основе и диагонали и стачной шов s_1 . В трех методах, основанных на проекционной площади, использовали круглые пробы, расположенные на сферической опоре (рис.3.1,а). Испытывали пять виртуальных тканей из библиотеки тканей Style3D, обозначенные как VF1–VF5 (Глава 2). После симуляции драпировки в Style3D образцы импортировали в Rhino 7 в формате OBJ для извлечения проекционных контуров и параметров площади. Рисунок 3.7 показывает процесс испытания по методу SFM и традиционным методам, основанных на проекционной площади, в Style3D и Rhino 7.

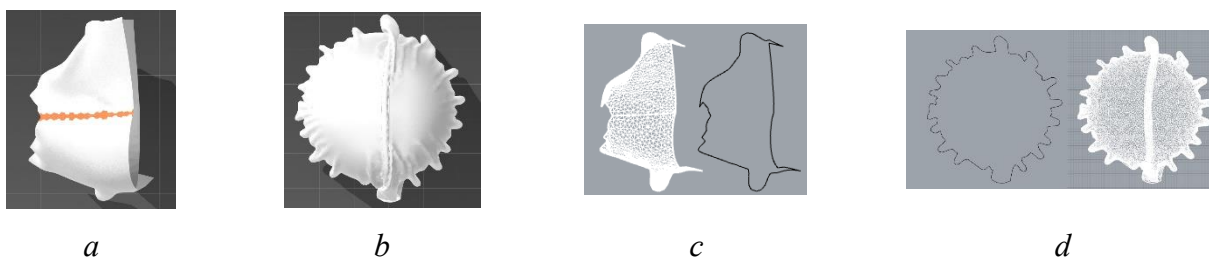


Рисунок 3.7 - Процесс испытания по методу SFM и традиционным методам, основанных на проекционной площади, в Style3D и Rhino 7: *a* - симуляция пробы SS на опоре SFM, *b* - симуляция круглой пробы на сферической опоре, *c* - проекционный контур пробы SS, *d* -

проекционный контур круглой пробы

Как показано на Рис. 3.7, основные различия между методом III и тремя методами, основанными на проекционной площади, заключаются в опорной границе, форме образца и измеряемом отклике. На Рис. 3.7,а образец SS формирует асимметричное драпированное состояние вдоль плечевой опорной поверхности опоры SFM, а измеряемыми откликами являются расширение в передне-заднем направлении и изменение ширины нижнего края. На Рис. 3.7,б круглая проба формирует более регулярное радиальное драпированное состояние на сферической опоре, а измеряемым откликом в основном является проекционная площадь. На рис. 3.7,с и рис. 3.7,д показаны проекционные контуры, извлеченные в Rhino 7 для двух типов проб. Контур пробы SFM содержит явные различия между параметрами, тогда как контур круглой пробы в основном отражает радиальную проекционную границу. Следовательно, сравнение четырех методов является не только сравнением формул, но и сравнением способности плечевой опорной границы и традиционной геометрической опорной границы отражать драпировочный отклик проб.

Для одной и той же группы виртуальных тканей значения DC были рассчитаны с использованием метода III, традиционного метода по проекционной площади, модифицированного метода по проекционной площади и комплементарного метода по проекционной площади. Среднее значение и CV использовали для характеристики способности каждого метода показывать различия между выбранными тканями VF1–VF5. Таблица 3.6 показывает сравнение DC между Методом III и тремя традиционными методами, основанными на проекционной площади.

Таблица 3.6 – Сравнение значений DC для разных методов расчёта

Ткань	Значение DC			
	Метод III	Традиционный метод проекционной площади	Модифицированный метод проекционной площади	Комплементарный метод проекционной площади
VF1	0,34	0,23	0,06	0,95
VF2	0,30	0,26	0,10	0,92
VF3	0,27	0,26	0,11	0,92
VF4	0,22	0,27	0,12	0,91
VF5	0,13	0,28	0,14	0,89
Среднее значение	0,25	0,26	0,11	0,92
CV, %	32,8	7,4	28,8	2,4

Как показано в Таблице 3.6, четыре метода показали явные различия в способности реагировать на различия между виртуальными тканями. Преимущество Метода III заключается не просто в изменении числовой направленности DC , а в одновременном включении расширения в направлении спереди назад и изменения средней ширины нижнего края в расчет. Эта геометрическая реакция отражает совместное влияние угла наклона плечевой линии, ширины пробы, типа шва, направления раскроя и различий материала. По сравнению с методами, основанными на одном показателе проекционной площади, метод III более подходит для описания асимметричной деформации пробы в условиях плечевой опорной границы SFM. Поэтому метод III был определен как формальный метод измерения DC_{SFM} для уровня SS и использовался как базовый метод расчета для последующего факторного анализа SS, проверки виртуально-физической согласованности и прогнозирования формообразования платья.

После определения условий реализации метода измерения проб SS необходимо было дополнительно уточнить единые правила размещения виртуальных проб SS, LS и физической пробы SS в испытании SFM, чтобы обеспечить согласованность между разными средами испытания. Рисунок 3.8 показывает размещение SS, LS и физического SS в тесте SFM.

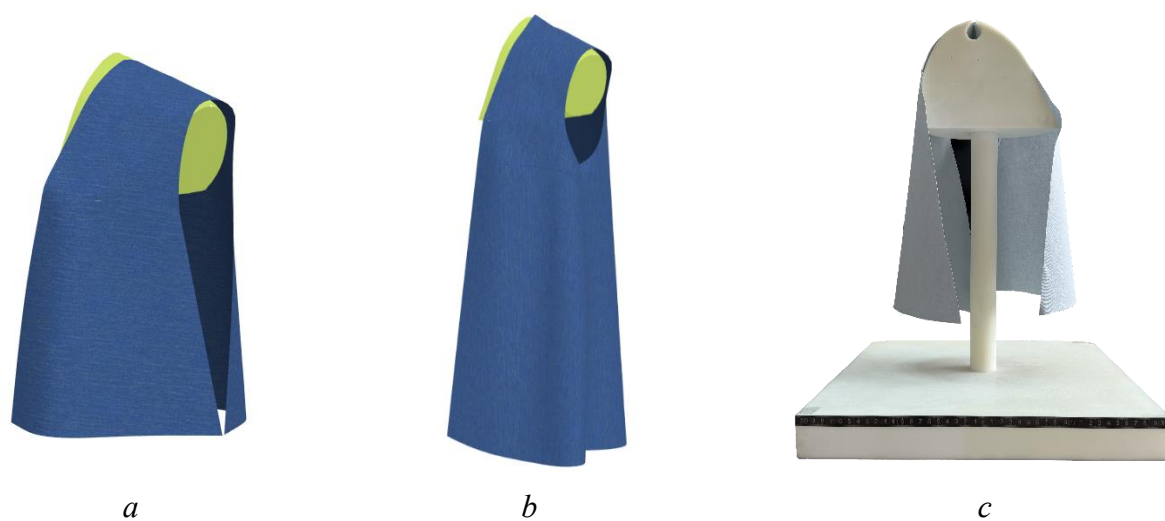


Рисунок 3.8 – Размещение образцов для теста драпировки SFM:

a – размещение SS в виртуальном тесте, *b* – размещение LS в виртуальном тесте, *c* – размещение физического образца SS

Как показано на Рис. 3.8,*a* и Рис. 3.8,*b*, после размещения проб SS и LS в виртуальной среде обе пробы выравниваются вдоль линии плечевой опоры и используют одну и ту же плечевую границу как исходное ограничение. На Рис. 3.8,*c* показано размещение физического образца SS на драпометре SFM; образец также выравнивается по отмеченной

линии плеча и фиксируется на плечевой опорной границе. Следовательно, различия между виртуальным SS, виртуальным LS и физическим SS связаны не с изменением правила размещения, а главным образом с масштабом образца, структурными параметрами и геометрическим откликом после драпировки. Этот рисунок обеспечивает единую операционную основу для последующего выбора схемы измерения LS и для сопоставления виртуального и физического тестов.

Рисунок 3.9 показывает схему измерения соответствующих параметров DC_{SFM} .

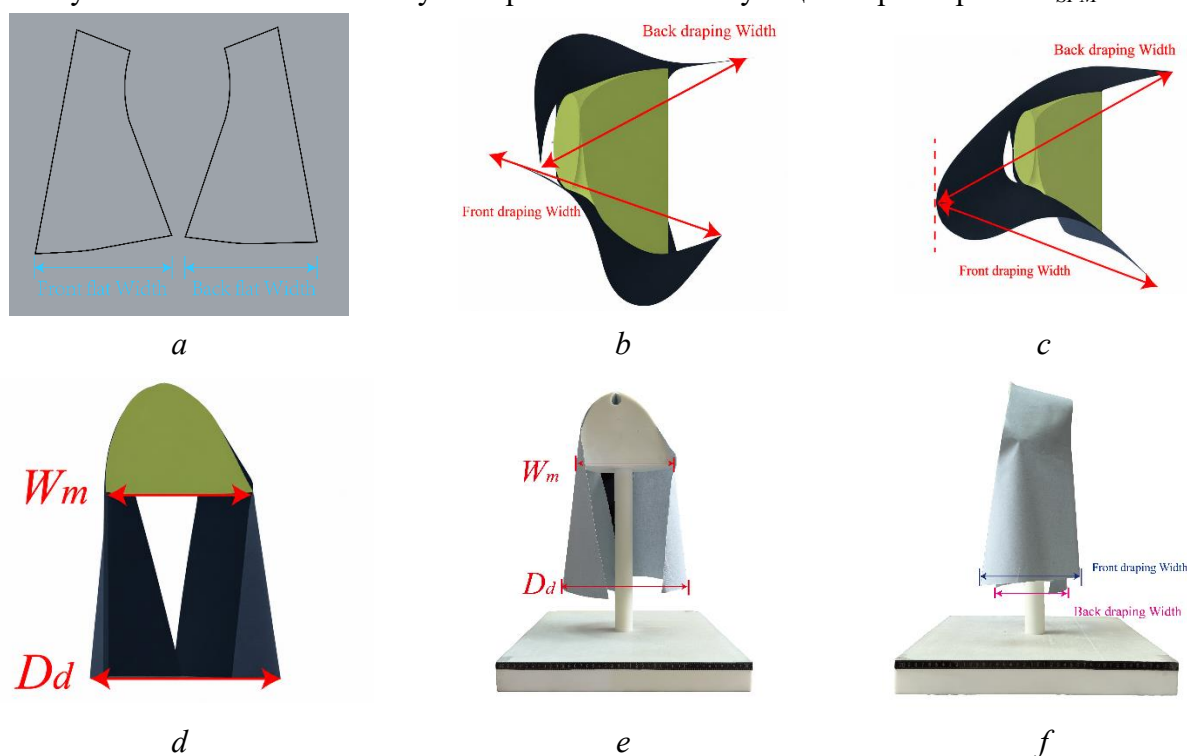


Рисунок 3.9 – Схема измерений параметров для расчета DC_{SFM} :

a – измерение плоской ширины SS до драпировки, *b* – измерение ширины SS после драпировки, *c* – измерение ширины LS после драпировки, *d* – виртуальное измерение D_d и W_m для SS, *e* – физическое измерение D_d и W_m для SS, *f* – физическое измерение ширины SS после драпировки

Как показано на Рис. 3.9, DC_{SFM} интегрирует измерение расширения в передне-заднем направлении и средней ширины. На Рис. 3.9,а показан плоский SS до драпировки, где для расчёт W_0 использованы передняя и задняя плоские ширины. На Рис.3.9,б показан виртуальный SS после драпировки, где для расчёта W_a использованы передняя и задняя драпированные ширины. На Рис. 3.9,с показано измерение ширины LS после драпировки. В отличие от пробы SS проба LS имеет большую ширину после драпировки; поэтому измерение Δ_2 основано на соответствующих передних и задних ширинах драпированной пробы, а не на прямом копировании ширины короткого образца. На Рис. 3.9,д и Рис. 3.9,е

показаны виртуальные и физические измерения D_d и W_m соответственно. В обоих случаях D_d принимается как максимальная передне-задняя ширина драпированного образца, а W_m как эффективная ширина драпометра SFM. На Рис. 3.9,f показано физическое измерение передних и задних драпированных ширин SS, соответствующее физическому измерению W_d . Эти фигуры показывают, что для проб - короткой SS и средней LS длины - использована одна и та же структура расчёта DC_{SFM} , однако точки измерения Δ_2 откорректированы в соответствии с контуром пробы.

Для уровня LS разработка схемы измерения была с учетом расширенного драпированного контура по сравнению с SS. В Rhino 7 были исследованы четыре кандидатные схемы измерений, показанные на Рис. 3.10.



Рисунок 3.10 - Кандидатные схемы измерения DC_{SFM} для средней пробы LS в Rhinoceros 7: a - схема 1, b - схема 2, c - схема 3, d - схема 4

Как показано на Рис. 3.10, различия между четырьмя схемами для пробы LS главным образом заключаются в выборе горизонтального передне-заднего расстояния:

- расстояние между передней и задней точками, отражающее общее расширение и чувствительное к изменению координаты конечной точки контура (Рис. 3.10,a),
- расстояние от передней точки до точки бокового шва, что делает траекторию измерения более близкой к фактическому направлению расширения LS вдоль боковой структуры (Рис. 3.10,b),
- расстояние от передней точки до точки бокового шва, что сохраняет признак бокового шва, но ослабляет выражение пространственной криволинейной траектории (Рис. 3.10,c),
- расстояние от передней точки до задней точки бокового шва, что обеспечивает более длинную пространственную траекторию измерения, но может чрезмерно усиливать локальные вариации бокового шва (Рис. 3.10,d).

Эти сравнения показывают, что LS требует схемы измерения, адаптированной к его удлиненному контуру и параметризации бокового расширения, а не прямого измерения контура, как в случае SS.

Распределение DC_{SFM} , среднее значение и CV, полученные по четырем схемам измерения LS для трех тканей и пяти уровней измерения, использовали для оценки

чувствительности каждой схемы к вариациям длины пробы и различиям между тканями. Таблица 3.7 представляет распределение DC_{SFM} для средней пробы LS при четырех кандидатных схемах.

Таблица 3.7 - Значения DC_{SFM} для LS для четырех кандидатных схем измерения

Проба	DC_{SFM}											
	Схема 1			Схема 2			Схема 3			Схема 4		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3
LS1	0.128	0.197	0.123	0.039	0.132	0.045	0.152	0.330	0.145	0.063	0.249	0.062
LS2	0.095	0.176	0.100	0.044	0.131	0.051	0.109	0.296	0.115	0.058	0.235	0.065
LS3	0.093	0.189	0.111	0.058	0.148	0.074	0.096	0.288	0.131	0.060	0.233	0.092
LS4	0.102	0.201	0.119	0.073	0.161	0.096	0.102	0.290	0.178	0.073	0.235	0.150
LS5	0.124	0.211	0.151	0.099	0.171	0.129	0.125	0.328	0.247	0.102	0.235	0.214
Среднеезначение	0.108	0.195	0.121	0.063	0.149	0.079	0.117	0.307	0.163	0.071	0.238	0.117
CV, %	13.6	6.1	14.1	38.9	11.6	41.2	32.3	24.5	13.1	19.7	0.3	55.8

Как показано в Таблице 3.7, четыре схемы демонстрируют различную реакцию на разных уровнях измерения в зависимости от типа ткани. Схема 1 дает относительно плавное изменение DC_{SFM} , при этом значения CV для всех трех тканей остаются ниже 15 %, что свидетельствует о недостаточной чувствительности схемы 1. Хотя данная схема фиксирует расстояние между передней и задней контурными точками, использование горизонтального расстояния между конечными точками не отражает влияние вертикальной драпировки и бокового расширения. Для сравнения, схема 2 показывает более выраженную размерную чувствительность для тканей F1 и F3. Для ткани F2 значения DC_{SFM} демонстрировали относительно устойчивую возрастающую тенденцию по размерным уровням LS. С геометрической точки зрения, в схеме 2 использовано прямое кратчайшее измерение от передней точки до точки бокового шва, которое фиксирует расширение LS в передне-заднем направлении и отражает влияние бокового шва на драпированный контур. Поэтому схема 2 обеспечивает лучший баланс между геометрическим смыслом, размерной чувствительностью и стабильностью и была выбрана в качестве формальной схемы измерения пробы LS в системе SFM.

Для обеспечения согласованной операционной основы SFM виртуальный и физический тесты должны соответствовать друг другу по геометрии опоры, размещению образца, стабилизации драпировки и извлечению геометрических переменных. Таблица 3.8 показывает соответствие операций и измеряемых результатов между виртуальным и физическим тестами SFM.

Таблица 3.8 – Соответствие операций SFM в виртуальных и физических тестах

Шаг	Виртуальный тест SFM	Физический тест SFM	Контролируемый вывод
1	Построить или импортировать драпметр SFM в Style3D	Использовать физический драпметр SFM, полученный из той же геометрии опоры	Поверхность поддержки, имитирующая плечо
2	Разместить SS или LS вдоль линии плеча виртуального драпметра	Выровнять сшитый образец по отмеченной линии плеча физического драпметра	Граница выравнивания образца
3	Запустить симуляцию гравитации до достижения стабильной драпированной формы	Освободить образец и дать ему достичь стабильного драпированного состояния под действием гравитации	Стабильная драпированная геометрия
4	Получить W_0 из геометрии плоского образца и измерить D_d и W_d из драпированной геометрии	Получить W_0 из плоской физической пробы и измерить D_d и W_d из калиброванного драпированного изображения или записанного контура	Геометрические переменные для Δ_1 и Δ_2
5	Рассчитать DC_{SFM} с использованием уравнений (3.3)–(3.5)	Рассчитать DC_{SFM} с использованием тех же уравнений	Сопоставимый коэффициент драпировки SFM DC_{SFM}

Как показано в Таблице 3.8, виртуальные и физические тесты на новом стенде SFM согласованы через геометрию опоры, выравнивание образцов, стабилизацию драпировки, извлечение геометрических переменных и расчёт коэффициента драпируемости. Это

операционное соответствие гарантирует, что показатели W_0 , W_d , D_d , W_m , Δ_1 и Δ_2 определяются последовательно для виртуального и физического тестов SFM.

Таким образом, измерительная система SFM была сформирована для двух проб - короткой SS и средней LS. Для пробы SS был принят метод III, в котором сочетание изменения максимального расстояния в передне-заднем направлении и изменения средней ширины внизу использовано как основной геометрический отклик. Этот уровень поддерживает построение базовой базы данных драпировочного отклика и анализ структурных факторов, таких как угол наклона плечевого ската, ширину пробы, тип шва и направление раскроя. Для пробы LS была принята схема 2, в которой кратчайшее расстояние от передней точки до точки бокового шва и максимальная ширина использованы как базовые измерения.

3.4.2 Результаты коэффициента драпируемости короткого образца и основные влияющие факторы

Были проанализированы структурные факторы, влияющие на DC_{SFM} короткой пробы. Переменные включали тип шва, направление раскроя, угол наклона плечевого ската и ширину пробы внизу[174].

Первый анализ был сосредоточен на выборе типа шва и направления раскроя. CV использовали для оценки того, могут ли данные факторы усиливать различия DC_{SFM} между тканями и конфигурациями проб. Таблица 3.9 показывает значения CV для DC_{SFM} короткой пробы при различных типах швов и направлениях раскроя (здесь s_1 , s_2 и s_3 обозначают виды швов).

Таблица 3.9 – CV для DC_{SFM} короткой пробы при различных направлениях раскроя и типах шва

Направление раскроя	Значения DC_{SFM}								
	F1			F2			F3		
	s_1	s_2	s_3	s_1	s_2	s_3	s_1	s_2	s_3
Основа	0.73	0.67	0.65	0.50	0.54	0.69	0.33	0.64	0.83
Уток	0.80	0.69	0.68	0.56	0.52	0.72	0.51	0.59	0.79
Диагональ	0.76	0.68	0.67	0.58	0.53	0.58	0.59	0.60	0.80

Как показано в Таблице 3.9, три типа шва дали разные уровни рассеивания DC_{SFM} . Пробы со стачным швом s_1 показали четкую реакцию на изменения направления раскроя и типа ткани, что указывает на пригодность плоского шва для наблюдения. Для шва s_1

	0	6	5	7	2	0	4	3	6	1	4	4	3	8	7
37.8	0.7 8	0.8 1	0.8 7	0.6 6	0.8 0	0.8 2	0.5 6	0.6 2	0.6 8	0.5 0	0.5 3	0.4 9	0.3 8	0.4 7	0.4 6
42	0.9 8	0.9 6	0.9 5	0.8 6	0.9 1	0.9 9	0.7 8	0.7 7	0.8 6	0.7 3	0.7 4	0.7 0	0.6 1	0.6 7	0.6 4
Среднезначе- ние	0.4 7	0.5 2	0.5 7	0.4 1	0.4 8	0.5 1	0.3 4	0.3 9	0.4 3	0.3 1	0.3 4	0.3 2	0.2 4	0.2 9	0.2 9

Как показано в Таблице 3.10, при увеличении ширины пробы с 21 см до 42 см значения DC_{SFM} явно возрастали для всех трех тканей при всех углах. Это означает, что большая ширина позволяет пробе формировать более выраженное формообразование. При угле наклона плечевого среза 20° проба проявляет максимальную возможность для драпируемости.

Для дальнейшего изучения влияния плечевого шва и обработки нижнего края пробы с плечевыми швами были сопоставлены с цельнокроеными пробами без плечевых швов. Рисунок 3.12 показывает влияние наличия и отсутствия плечевого шва, а также обработки нижнего края цельнокроеной пробы на DC_{SFM} короткой пробы, где h_1 , h_2 и h_3 обозначают три варианта обработки нижнего края цельнокроеной пробы: край без подгиба, загнутый край и шов подгиба соответственно.



Рисунок 3.12 – Влияние конструкции плечевого шва и обработки нижнего края цельнокроеной пробы на DC_{SFM}

Как показано на Рис. 3.12, шов s_1 дал наибольший отклик DC_{SFM} для ткани F3 и при этом оставался сопоставимым с другими швами для тканей F1 и F2. Структура плечевого шва

влияет на локальную жесткость и начальное формирование складки от плечевого ската. В группах цельнокроеной пробы факторы h_1 , h_2 и h_3 влияли ограниченно. Это показывает, что в виртуальной среде влияние вида обработки нижнего края на DC_{SFM} не выражено. Поэтому обработка нижнего края была исключена как основная переменная в последующих испытаниях SS, а стачной плечевой шов s_1 был сохранен как.

Для сравнения относительного вклада показателей физико-механических свойств тканей и параметров пробы был выполнен корреляционный анализ. X_1 обозначает усилие растяжения, X_2 - жесткость при изгибе, X_3 - удлинение при растяжении, X_4 - угол наклона плечевого среза, X_5 - ширину пробы внизу. Коэффициенты корреляции между этими переменными и DC_{SFM} короткой пробы приведены в Таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Коэффициенты корреляции между DC_{SFM} , геометрическими параметрами короткой пробы SS и показателями физико-механических свойств тканей и ($n = 270$)

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	DC_{SFM}
X_1	1					
X_2	-0.211**	1				
X_3	-0.045	0	1			
X_4	0	0	0	1		
X_5	0	0	0	0	1	
DC_{SFM}	0.044	-0.049	-0.079	-0.306**	0.920**	1

Примечание: ** указывает на значимость на уровне 0,01.

Как показано в Таблице 3.11, DC_{SFM} короткого образца имеет сильную положительную корреляцию с шириной пробы X_5 , значимую отрицательную корреляцию с углом наклона плечевого среза X_4 . Напротив, корреляции между DC_{SFM} и X_1 , X_2 и X_3 не показали значимых взаимосвязей. Это указывает на то, что в рамках текущей виртуальной матрицы испытаний параметры конструкции образца оказывают более сильное влияние на DC_{SFM} , чем выбранные физико-механические параметры ткани.

Чтобы визуализировать взаимосвязи между двумя значимыми конструктивными параметрами - углом X_4 и шириной X_5 - и DC_{SFM} на Рисунке 3.13 показаны их зависимости.

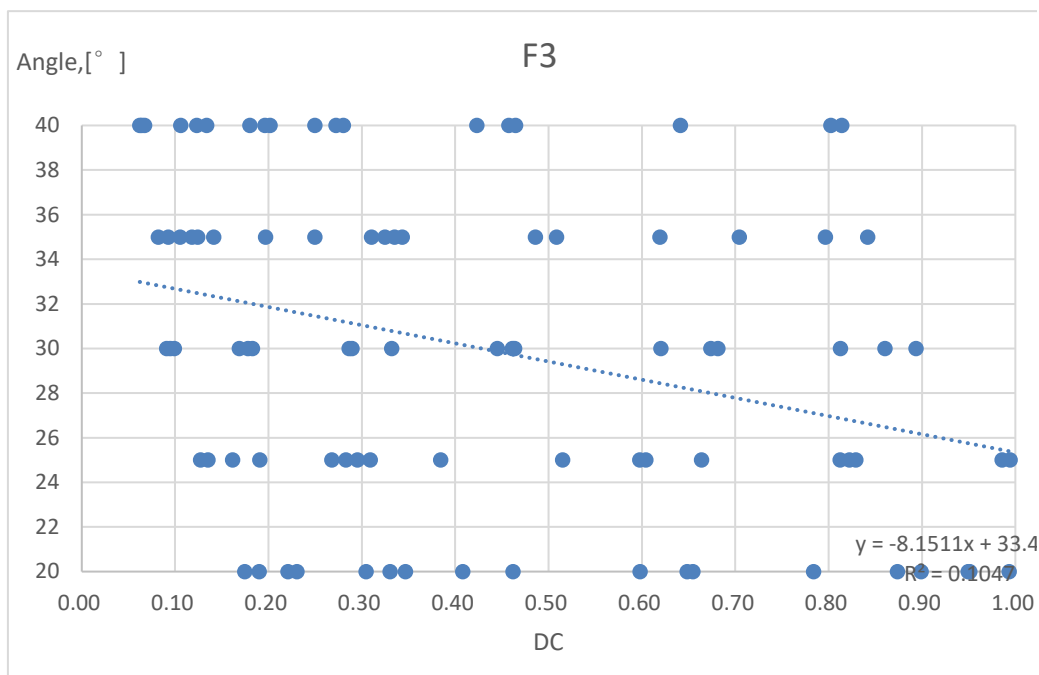


Рисунок 3.13 – Репрезентативная зависимость между углом X_4 и DC_{SFM} короткой пробы для ткани F3

Рисунок 3.14 показывает репрезентативную зависимость между шириной пробы X_5 и DC_{SFM} на примере F2.

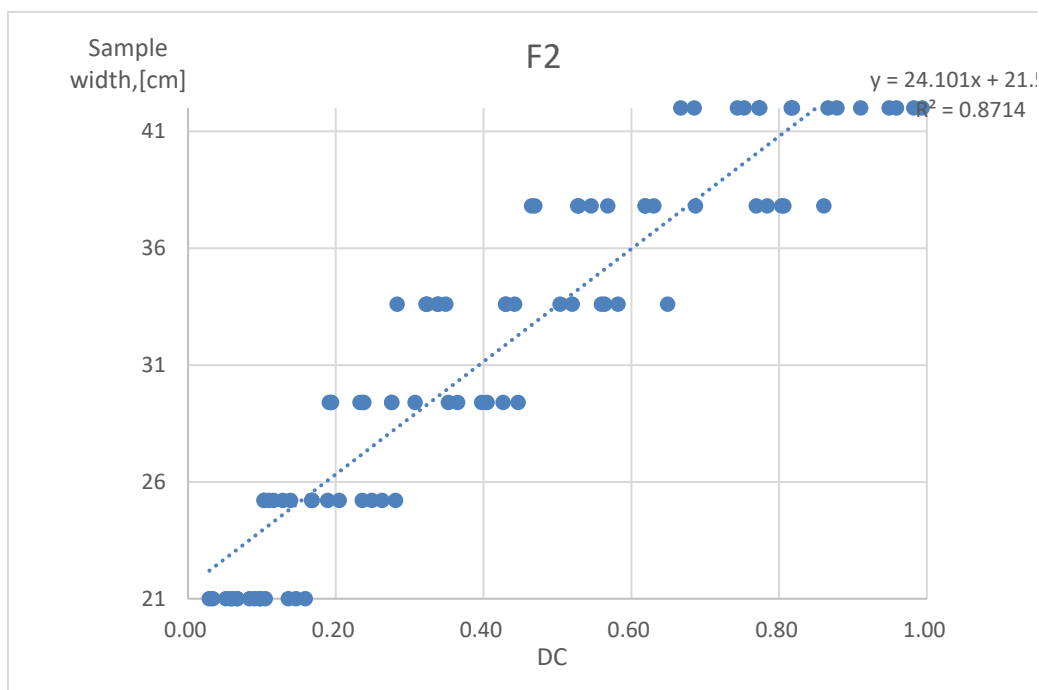


Рисунок 3.14 – Репрезентативная зависимость между шириной нижнего края X_5 и DC_{SFM} короткого образца для F2

На основе корреляционного анализа была построена двухфакторная линейная регрессионная модель, в которой угол наклона плечевого среза X_4 и ширина пробы внизу X_5 использовали в качестве предикторов DC_{SFM} короткой пробы. Регрессионное уравнение приведено в уравнении (3.9).

$$DC_{SFM} = -0.369 - 0.012X_4 + 0.036X_5 \quad (3.9)$$

где DC_{SFM} - коэффициент драпируемости короткой пробы SS, полученный по методу SFM, X_4 — угол наклона плечевого среза, град., X_5 — ширина пробы внизу, см.

Чтобы проверить, может ли уравнение (3.9) прогнозировать DC_{SFM} , были использованы три ткани из Style3D в качестве контрольных тканей, обозначенные как C1, C2 и C3 (ГЛАВА 2). Сравнение измеренных и прогнозируемых значений DC_{SFM} для контрольных тканей представлено в Таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Проверка прогнозирования DC_{SFM} на контрольных тканях

Контрольная ткань	Материал	Угол плеча, °	Ширина пробы внизу, см	DC_{SFM}	
				Измеренное значение	Прогнозируемое значение
C1	Саржа	20	30	0.50	0.47
C2	Полиэстер	20	34	0.60	0.61
C3	Хлопок	28	34	0.54	0.52

Как показано в Таблице 3.12, уравнение (3.9) обеспечивает хорошее качество прогнозирования DC_{SFM} : абсолютные различия составили 0,01-0,03. Несмотря на ограниченный объем валидационного набора контрольных тканей, малые абсолютные различия показывают, что с помощью двух переменных можно прогнозировать коэффициент в пределах исследованного диапазона.

Измеренные и прогнозируемые значения DC_{SFM} были дополнительно сопоставлены с использованием t-теста сравнения средних. В Таблице 3.13 представлено статистическое сравнение между измеренными и прогнозируемыми значениями DC_{SFM} .

Таблица 3.13 – Парное сравнение измеренных и прогнозируемых значений DC_{SFM}

DC_{SFM}	Среднее значение	SD	t	p
Измеренное значение	0.5467	0.0507	0.268	0.799
Прогнозируемое значение	0.5333	0.0701		

Как показано в Таблице 3.13, значение p составило 0,799, что превышает уровень значимости 0,05. Следовательно, в рамках данной контрольной валидации значимого различия между измеренными и прогнозируемыми значениями DC_{SFM} выявлено не было. Данный результат следует интерпретировать как предварительное статистическое свидетельство в пользу уравнения (3.9), а не как полную валидацию регрессионной модели.

3.5 Валидация нового метода на основе физического прототипа

3.5.1. Проверка согласованности между виртуальными и физическими результатами

Валидацию проводили на пробах с суммарным углом наклона плечевых срезов 40° , стачным плечевым швом s_1 , раскроем по утку и шести значений ширины пробы внизу. Для каждой ткани исследовали шесть проб, а среднее значение DC_{SFM} использовали как репрезентативный отклик SFM для виртуально-физического сравнения. Таблица 3.14 показывает матрицу DC_{SFM} для виртуальных и физических проб SS.

Таблица 3.14 – Значения DC_{SFM} для виртуальных и физических проб SS

Ширина пробы внизу, см	Значения DC_{SFM}					
	F1		F2		F3	
	Виртуальный	Физический	Виртуальный	Физический	Виртуальный	Физический
21	0.76	0.75	0.79	0.73	0.76	0.71
25.2	0.75	0.67	0.73	0.55	0.71	0.74
29.4	0.72	0.72	0.64	0.53	0.67	0.65
33.6	0.60	0.70	0.52	0.47	0.64	0.59
37.8	0.55	0.62	0.45	0.34	0.55	0.52
42	0.48	0.48	0.36	0.30	0.37	0.48
Среднее значение	0.64	0.66	0.58	0.49	0.62	0.62
CV, %	18.15	14.82	28.67	32.06	22.69	16.86

Как показано в Таблице 3.14, группы виртуальных и физических SS показали сопоставимые средние значения DC_{SFM} . Ткань F3 показала наиболее близкое совпадение средних значений между виртуальными и физическими испытаниями, за ней следовали F1 и F2. Значения CV указывают на то, что F2 имела более высокую дисперсию как в виртуальных, так и в физических испытаниях, со значениями 28,67% и 32,06% соответственно. Это показывает, что F2 была более чувствительна к изменению ширины

нижнего края, тогда как F1 и F3 демонстрировали относительно более стабильные отклики на уровне ширины.

Чтобы дополнительно определить, были ли средние различия между виртуальными и физическими SS статистически значимыми, были проведены t-тесты для независимых выборок с использованием шести значений DC_{SFM} по уровням ширины внизу для каждой ткани. Таблица 3.15 показывает результаты t-теста для независимых выборок между виртуальными и физическими SS.

Таблица 3.15 – Результаты t-теста для независимых выборок между виртуальными и физическими SS

Ткань	t	p	df	Значимость при $\alpha = 0,05$	Средняя разница, V-R
F1	-0,215	0,834	10	Статистически незначимо	-0,013
F2	1,019	0,332			+0,095
F3	0,023	0,982			+0,002

Как показано в Таблице 3.15, p-значения для F1, F2 и F3 составили 0,834, 0,332 и 0,982 соответственно, то есть все они превышали 0,05. Следовательно, при уровне $\alpha = 0,05$ значимого различия между виртуальными и физическими значениями DC_{SFM} для SS не было выявлено ни для одной из трех тканей.

3.5.2. Сравнение дискового и нового методов

Поскольку эти методы различаются по форме проб, опорной границе и формулам расчет коэффициента драпируемости, абсолютные значения DC и DC_{SFM} не являются напрямую эквивалентными. Рисунок 3.15 показывает виртуальные и физические состояния круглых проб из тканей F1–F3, полученных дисковым методом.

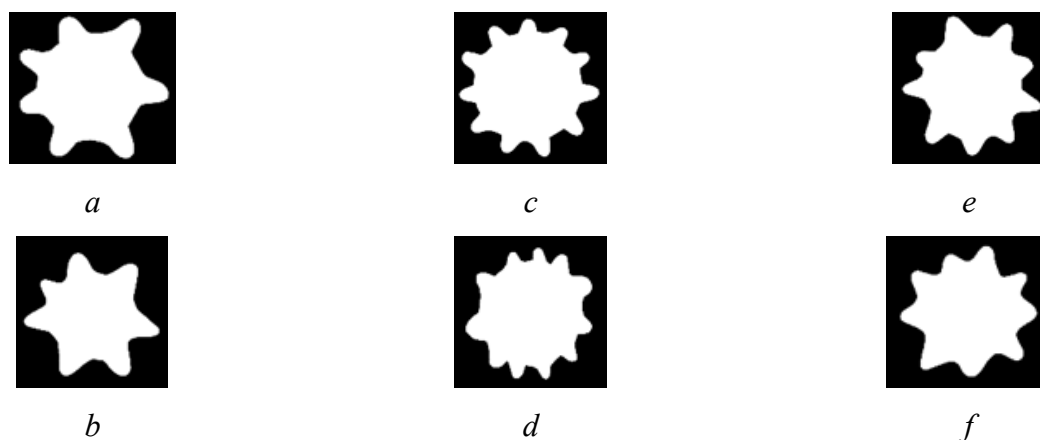


Рисунок 3.15 - Виртуальные и физические круглых пробы из тканей F1–F3, полученные дисковым методом: *a* - виртуальная драпировка F1; *b* - физическая драпировка F1; *c* -

виртуальная драпировка F2; d - физическая драпировка F2; e - виртуальная драпировка F3; f - физическая драпировка F3

Как показано на Рис. 3.15, виртуальные и физические круглые пробы сформировали радиальные контуры драпировки вокруг центральной области опоры.

Относительное виртуально-физическое различие рассчитывали по форме уравнения (2.6), при этом прогнозное значение в исходной формуле было заменено виртуальным значением, а измеренное значение — физическим. Положительное значение различия указывает на то, что результат виртуального испытания был выше результата физического испытания, а отрицательное значение - результат виртуального испытания был ниже результата физического. Таблица 3.16 показывает значения DC , полученные дисковым методом, значения DC_{SFM} , полученные по новому методу, соответствующие виртуально-физические различия, межтканевой CV и средние абсолютные виртуально-физические различия.

Таблица 3.16 – Виртуально-физические различия и межтканевой CV для дискового и нового методов

Индекс	Ткань / статистика	Коэффициент драпируемости	
		DC , дисковый метод	DC_{SFM} , новый метод
Виртуальное значение	F1	0,37	0,64
	F2	0,34	0,58
	F3	0,39	0,62
	Межтканевой CV, %	6,86	4,98
Физическое значение	F1	0,42	0,66
	F2	0,33	0,49
	F3	0,45	0,62
	Межтканевой CV, %	15,61	15,06
Виртуально-физическое различие, %	F1	-11,9	-3,0
	F2	+3,0	+18,4
	F3	-13,3	0,0
	Среднее абсолютное виртуально-физическое различие, %	9,42	7,13

Как показано в Таблице 3.16, оба метода определяют ткань F2 как ткань с наименьшим драпировочным откликом. Виртуально-физические различия дополнительно раскрывают соответствие между испытанием цифрового двойника и физическим испытанием при двух

условиях опоры. В дисковом методе виртуальные значения DC для F1 и F3 были ниже соответствующих физических значений DC . В новом методе виртуальное значение DC_{SFM} для F1 было немного ниже физического значения, с различием $-3,0\%$, тогда как F3 почти не показала виртуально-физического отклонения, с различием $0,0\%$. F2 показала наибольшее отклонение в методе подгонки плеча: виртуальное значение было выше физического на $+18,4\%$. Следовательно, метод подгонки плеча обеспечил более близкое виртуально-физическое согласование, чем дисковый метод, для F1 и F3, однако дал более выраженное тканеспецифическое отклонение для F2.

Среднее абсолютное различие описывает общий уровень виртуально-физического отклонения по трём тканям. Среднее абсолютное различие составило $9,42\%$ для дискового метода и $7,13\%$ для нового метода. Это сравнение показывает, что метод подгонки плеча дал более низкое общее виртуально-физическое отклонение по F1–F3, чем дисковый метод. Однако это снижение не было равномерно распределено между всеми тканями. Меньшие отклонения в новом методе для F1 и F3 были основными факторами, обеспечившими более низкое среднее абсолютное различие, тогда как для ткани F2 видно, что ее особенности сильно влияют. Поэтому результаты, полученные по новому методу, не следует интерпретировать как прямую числовую замену дискового метода: новый метод представляет другое выражение драпировочного отклика.

Сравнение CV показало, что в виртуальных испытаниях CV составил $6,86\%$ для дискового метода и $4,98\%$ для нового метода, при этом новый метод обеспечивает более низкий уровень рассеивания.

Таким образом, сравнение дискового и нового методов показало, что они соответствуют разным уровням оценки драпируемости. Дисковый метод остаётся пригодным как традиционный референс на уровне материала для характеристики изменений проекционной площади круглых образцов при регулярной опорной границе. Новый метод ближе к состоянию драпировки ткани в области плечевой поверхности. На основе данной характеристики отклика новый метод может использоваться как метод получения драпировочных входных данных на уровне пробы для последующего анализа и прогнозирования формообразования платья.

Выводы по главе 3

1. Сформирован алгоритм испытания драпируемости ткани по новому методу, включающий виртуальный и физический драпометр, два вида проб (короткую и среднюю), схему расчета коэффициента драпируемости DC_{SFM} процедуру виртуально-физической проверки.

2. На основе параметров плечевой области женских фигур была изготовлен испытательный стенд, включающий антропоморфную плечевую опору с магнитной фиксацией пробы, модульную стойку, основание, линейка и лазерное устройство. Обоснованы размеры проб разной длины и предложены выражения для расчета коэффициентов драпируемости.

3. Сравнение сферической, конической и цилиндрической виртуальных опор показало, что регулярные геометрические границы недостаточно отражают влияние показателей свойств тканей: значения коэффициентов вариации CV составляют лишь 0,05-0,07, а диапазон значений коэффициента драпируемости DC является узким. Новый метод обеспечивает коэффициент вариации 0,14-0,32.

4. Анализ особенностей формообразования проб показал, что коэффициент драпируемости сильнее зависит от геометрических параметров пробы, чем от показателей физико-механических свойств тканей. Построена регрессионная модель прогнозирования коэффициента драпируемости. Проверка на контрольных тканях показала адекватность уравнения и малые абсолютные различия между измеренными и прогнозируемыми значениями.

5. Виртуально-физическая проверка подтвердила сопоставимость результатов, получаемых при испытаниях проб на новом стенде в виртуальной и физической средах: статистически значимых различий между двумя группами результатов выявлено не было.

6. Сравнение с традиционным дисковым методом показало, что новый метод не заменяет традиционный напрямую, а характеризует другой уровень драпируемости, связанный с плечевой опорой и структурой пробы. Среднее виртуально-физическое различие составило 9,42% для дискового метода и 7,13% для нового. Новый метод может использоваться как основа для дальнейшего анализа связи между драпируемостью проб и формообразованием платьев.

Глава 4. ПОСТРОЕНИЕ И ВАЛИДАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ТКАНЕЙ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

4.1. Набор изображений и система кодирования параметров для измерений с помощью искусственного интеллекта

В этой главе стандартизированный набор визуальных данных, система кодирования физических параметров и среда Style3D был использован для формирования бесконтактного неинструментального измерения показателей свойств тканей с помощью искусственного интеллекта (ИИ). Набор изображений обеспечивал контролируемые визуальные входные данные, модели ИИ преобразовывали визуально-текстовые данные в физико-механические параметры ткани в соответствии с протоколом промпта, а система кодирования параметров согласовывала результаты измерений ИИ с лабораторными эталонными значениями. Полученные параметры затем использовали для построения цифрового двойника ткани с помощью fabricDT в Style3D.

Набор визуальных данных для ИИ-измерений использовали для предоставления стандартизированных визуальных входных данных мультимодальным моделям ИИ. Этот набор изображений являлся не тренировочным датасетом, а представлял собой источник визуальных данных для вывода физических параметров ткани. Набор изображений включал двухмерные 2D изображения и трёхмерные 3D изображения. 2D-изображения предоставляли информацию о внешнем виде ткани, масштабе, структуре переплетения и деталях поверхности, а 3D-изображения деформации отражали морфологические реакции тканей под действием силы тяжести, границ опоры и деформации при низких нагрузках. Вместе эти два типа изображений формировали входные данные для измерений толщины, поверхностной плотности, усилий растяжения при малых деформациях, жесткости при изгибе и коэффициенту круговой драпируемости DC. На Рис. 4.1 показана структура набора изображений для измерений ИИ.

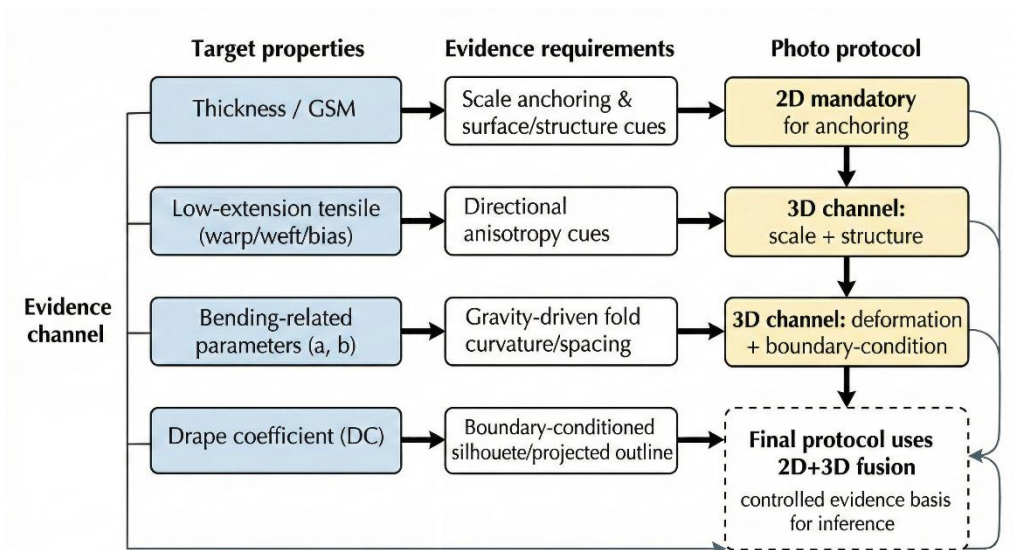


Рисунок 4.1 – Структура набора изображений для ИИ-измерений показателей свойств тканей

Как показано на Рис. 4.1, набор визуальных данных для измерений с помощью ИИ организован в соответствии с соотношением между целевыми физическими свойствами и визуальными каналами. Канал двухмерных изображений обеспечивает масштабное ориентирование, плоский внешний вид и информацию о структуре переплетения, тогда как канал трёхмерных изображений предоставляет информацию о воздействии силы тяжести, границах опоры и морфологии деформаций. Толщина ткани и поверхностная плотность могут быть идентифицированы по двумерным изображениям. Усилие растяжения при малых удлинениях, изгибная жесткость и коэффициент круговой драпируемости DC требуют трёхмерных изображений для учета количества и глубины складок, кривизны края, контура драпировки и направленной деформации.

Набор визуальных данных для измерений ИИ включал шесть типов фотографий, обозначенных как P1–P6. P1 и P2 – это двухмерные изображения, фиксирующие плоское состояние и текстуру поверхности ткани соответственно. P3–P6 – это трёхмерные изображения деформации, фиксирующие круговую драпируемость Касика, спиральную закручиваемость, драпируемость по новому методу SFM и вертикальное подвешивание, соответственно. P3 в основном обеспечивает визуальные доказательства для коэффициента DC, P5 в основном предоставляет данные о морфологии складчатой поверхности по методу SFM, связанной с DC_{SFM} .

Все фотографии трёх тканей были сняты в идентичных условиях окружающей среды после кондиционирования образцов в стандартных условиях, описанных в разделе 2.3.1. В эксперименте использовали беззеркальную камеру CanonEOSR7 с сенсором APS-CCMOS и макрообъектив CanonRF 35 мм f/1.8 ISSTM. Модель камеры, модель объектива, фокусное

расстояние, расстояние от камеры до объекта, геометрия освещения, настройки экспозиции и разрешение изображений оставались постоянными для всех тканей и типов фотографий. Камера была установлена на штатив с выравнивающей базой для поддержания перпендикулярного оптической оси положения относительно плоскости объекта и уменьшения искажений перспективы. Изображения снимались с помощью дистанционного триггера для сохранения согласованного положения и предотвращения дрожания камеры. На Рис. 4.2 показан набор изображений, где P1–P2 представляют плоские изображения тканей, а P3–P6 в момент их деформации.

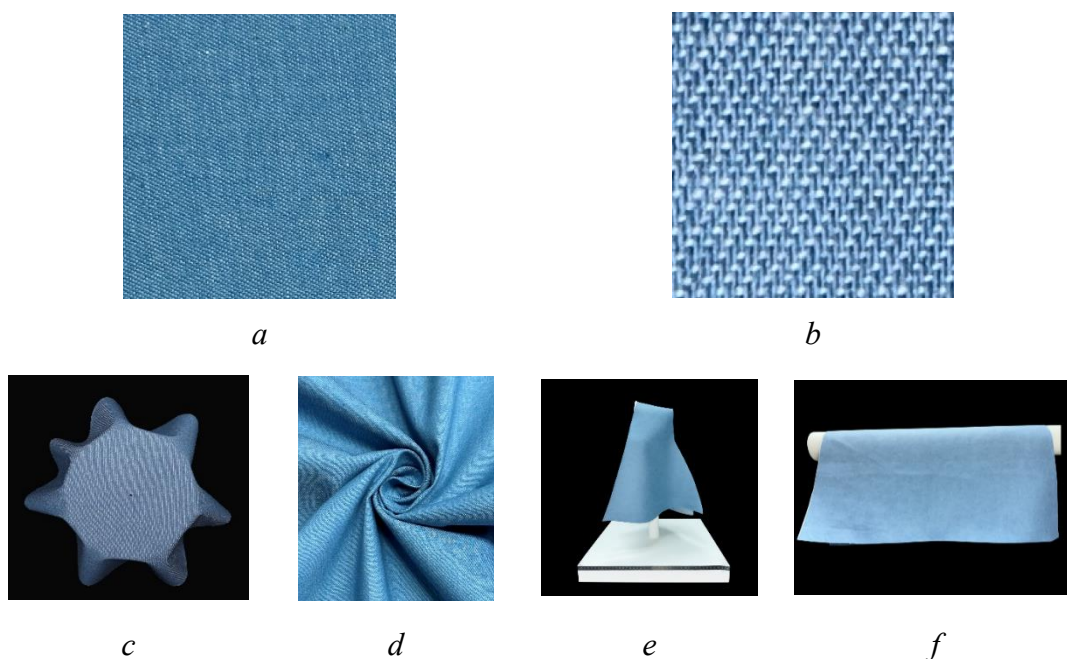


Рисунок 4.2 – Типы фотографий:

a – плоское изображение P1, *b* – текстура поверхности крупным планом P2, *c* – круговая драпировка Касика P3, *d* – спиральная закручиваемость P4, *e* – драпируемость по новому методу SFMP5, *f* – вертикальное подвешивание P6

P1 фиксирует плоское состояние ткани и используется для наблюдения общей плоскостности, заворачивания краёв и макроструктуры поверхности. P2 фиксирует локальные детали поверхности и используется для наблюдения за тониной пряжи, структурой переплетения, плотностью структуры и ворсистостью поверхности. P3 фиксирует традиционное состояние круговой драпируемости и используется для наблюдения проецируемого контура, количества складок и их глубины, обеспечивая основные морфологические данные для вывода коэффициента драпируемости DC. P4 фиксирует состояние спиральной закручиваемости и используется для наблюдения направления спиральных складок, плотности складок и различий в деформациях. P5 фиксирует состояние драпируемости по новому методу SFM и используется для наблюдения общей морфологии, кривизны краёв и асимметричных складок на опоре, имитирующей плечо, обеспечивая

данные для морфологического анализа, связанного с DC_{SFM} . P6 фиксирует состояние подвешивания на колонне и используется для наблюдения длины подвеса, расстояния между складками и кривизны краёв при линейной опоре.

Таблица 4.1 суммирует, как каждый код фотографии преобразуется в визуальные данные, связанные с параметрами.

Таблица 4.1 – Визуальные сигналы и группы физических свойств в наборе изображений для ИИ измерений

Код	Тип фотографии	Основные визуальные сигналы	Физические свойства
P1	Плоская раскладка	Макроструктура поверхности, заворачивание краёв, удержание складок, общая плоскостность	Толщина, GSM
P2	Крупный план	Тонкость нитей, структура переплетения, плотность структуры, волосистость поверхности и блеск	
P3	Драпируемость Касика	Контур, обусловленный силой тяжести, и особенности складок, включая проецируемый контур, количество складок и глубину	DC, реакция, связанная с изгибом
P4	Спиральная закручиваемость	Ориентация и распределение складок при спиральной деформации, отражающие направленные различия и режимы деформации	Реакция на растяжение при малых деформациях, реакция, связанная с изгибом
P5	Драпируемость по новому SFM	Общая морфология драпировки при условии поддержки, имитирующем плечо, включая развитие асимметричных складок, кривизну подола и морфологию драпировки от плеча до подола	DC_{SFM} , реакция, связанная с изгибом
P6	Подвешивание на колонне	Драпировка, обусловленная гравитацией, при линейной или колонной опоре, с акцентом на провисание и расстояние между складками вдоль направления драпировки	Реакция, связанная с DC, реакция, связанная с изгибом, реакция на растяжение при малых деформациях

Для сопоставления результатов измерений ИИ с лабораторными эталонными значениями выходные параметры были организованы в единую систему кодирования (Таблица 2.5).

4.2. Построение и калибровка протокола промпта для ИИ измерений

4.2.1. Библиотека элементов промпта

Протокол ИИ-измерений был построен как структурированный промпт, предназначенный для получения физико-механических параметров ткани по изображениям P1–P6. В отличие от обычного текстового запроса, данный промпт рассматривался как измерительный протокол, задающий область допустимых доказательств, состав выходных параметров, единицы измерения, физические ограничения и форму представления результатов.

Элементы промпта сгруппированы в две категории – базовые (**B**) и переменные (**V**). Базовый блок формирует основу протокола и обеспечивает одинаковый контекст и основные ограничения для разных версий. Элементы поддерживают метрологический контекст, границы доказательств и основные физические ограничения, согласованные между версиями промптов, обеспечивая сопоставимость последующих сравнений.

Переменный блок фиксирует структурные изменения, введённые в ходе итераций, включая организацию измеряемых элементов, способ представления численных значений, объединение доказательств с несколькими фотографиями, механизм закрытого цикла суммаризации и правила сходимости. Таблица 4.2 показывает модульные элементы, используемые для кодирования промпта как измеряемого протокола.

Таблица 4.2 – Библиотека элементов промпта

ID элемента	Название элемента	Тип блока	Содержание	Роль
E01	Метрологическое определение	B	Заявление о роли, назначающее модель экспертом по тестированию тканей для механических свойств и драпировки	Фиксирует предметную область и формулировку ответа
E02	Правило границы доказательств	B	Ограничение, согласно которому результаты должны выводиться из фотографий, и подсказка не должна утверждать использование стандартных инструментов	Ограничивает допустимые доказательства и предотвращает недопустимые методологические утверждения
E03	Ограничение согласованности с фоновыми знаниями	B	Инструкция, согласно которой все выходные данные должны быть	Вводит явные предварительные ограничения как

			согласованы с предоставленными фоновыми знаниями	часть основы протокола
E04	Правила физической допустимости и согласованности	<i>V</i>	Ограничения, такие как неотрицательность, допустимые области и внутренние требования к направленной согласованности	Обеспечивает физическую правдоподобность и внутреннюю согласованность выходных данных
E05	Правило обработки определённости	<i>V</i>	Правило, требующее консервативного выражения при недостаточности данных	Предотвращает чрезмерную уверенность и стабилизирует выходные данные при ограниченных данных
E06	Определение измерений	<i>V</i>	Раздел, перечисляющий целевые свойства и обязательные поля для отчета	Определяет объём выходных данных и может быть адаптирован для других целей
E07	Шаблон стандартизированной таблицы	<i>V</i>	Фиксированная структура таблицы с заранее заданными полями, единицами и порядком	Стандартизирует отчётность для сравнения и вычислений
E08	Формат вывода	<i>V</i>	Требование предоставлять результаты в структурированных таблицах и ограничивать несущественные тексты	Улучшает читаемость для машины и уменьшает отклонение выходных данных
E09	Режим представления численных значений	<i>V</i>	Правило, задающее диапазон вывода, вывод одного значения или переход от диапазона к одному значению	Контролирует интерфейс между выражением неопределённости и количественной оценкой
E10	Правило обоснования визуальных сигналов	<i>V</i>	Требование предоставлять наблюдаемые визуальные доказательства, подтверждающие заявленные значения	Поддерживает аудит и отслеживаемость рассуждений

E11	Правило итеративного обновления	V	Инструкция, позволяющая вносить изменения на основе результатов предыдущего раунда	Обеспечивает итеративную стабилизацию и усиление согласованности
E12	Расписание слияния нескольких фотографий	V	Правило, задающее порядок объединения доказательств, например, однократное объединение или поэтапное	Определяет, как объединяются данные с разных фото
E13	Распределение приоритетов доказательств	V	Правило, назначающее, какие типы фото в основном поддерживают какие физические свойства	Снижает конфликты при мультифото-обосновании и улучшает согласованность
E14	Механизм суммаризации с замкнутым циклом	V	Требование производить промежуточные сводные отчёты и итоговую таблицу	Организует выходные данные в проверяемый замкнутый цикл
E15	Правило сходимости и стабильности	V	Правило, обеспечивающее стабилизацию на раундах, например, сужение диапазона или условия сходимости	Ограничивает колебания выходных данных и поддерживает воспроизводимость

Как показано в Таблице 4.2, пять версий промптов будут представлены в виде конфигураций элементов после определения библиотеки элементов и структуры блоков, так что структура протокола каждой версии кодируется с использованием одного и того же набора элементов. Такое представление смещает описание итерации с уровня различий на уровне формулировки к различиям на уровне структуры протокола. Каждая версия промпта рассматривается как комбинация базовых и переменных элементов.

4.2.2 Протокол промпт-инжиниринга

Для обеспечения аудируемого структурного учёта используется единая нотация. B указывает, что элемент активирован как базовый, V — активирован как переменный. Для выбранных переменных элементов использовали метки V-number для различения интерфейсов протокола. В частности, режим представления численных значений использует символы V_1 для вывода диапазона значений, V_2 для вывода одного численного значения и V_3

для двухэтапного рабочего процесса «диапазон-к-одному численному значению». Расписание слияния нескольких фотографий использует V_4 для пошагового ввода и V_5 для одномоментного совместного ввода. Правила стабилизации используют V_6 для ограничения вложенного диапазона и V_7 для процесса прогрессивного сужения диапазона.

Таблица 4.3 показывает конфигурацию элементов E01–E15 для пяти версий промптов.

Table 4.3–Структура промптов

Подсказка	Элемент E															Фото
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	
1	B	B	-	B	<i>B</i>	<i>V</i>	B	B	V_1	B	-	-	-	-	-	<i>P1–P4</i>
2	B	B	<i>B</i>	B	-	<i>V</i>	B	B	V_2	B	<i>V</i>	V_4	<i>V</i>	<i>V</i>	-	<i>P1–P4</i>
3	B	B	<i>B</i>	B	-	<i>V</i>	B	B	V_2	B	-	V_5	-	-	-	<i>P1–P4</i>
4	B	B	<i>B</i>	B	<i>B</i>	<i>V</i>	B	B	V_3	B	<i>V</i>	V_4	<i>V</i>	<i>V</i>	V_6	<i>P1–P4</i>
5	B	B	<i>B</i>	B	<i>B</i>	<i>V</i>	B	B	V_3	B	<i>V</i>	V_4	<i>V</i>	<i>V</i>	V_7	<i>P1–P4</i>

Как показано в Таблице 4.3, пять версий промптов имеют стабильную основу протокола, в которую входят базовые элементы E01, E02, E04 и E06–E08. Основные структурные различия сосредоточены в переменных блоках. В частности, промпт 1 делает акцент на диапазонном представлении и не включает ограничение фоновых знаний, соответствующее протоколу, без явных предварительных данных. Промпты 2 и 3 вводят фоновое знание и содержат отдельные значения, но различаются в способе объединения доказательств. В промпте 2 использован поэтапный ввод доказательств и их суммирование в конце, а промпт 3 совместно были объединены четыре фотографии в одном цикле измерения. Промпты 4 и 5 включали базовые информацию и ограничения с явными алгоритмами замкнутого цикла и стабилизации: оба использовали интерфейс «от диапазона к одному значению» и поэтапный ввод доказательств с итеративным обновлением для уменьшения нестабильности выходных данных. В промпте 4 применено ограничение для диапазона значений, а в промпте 5 — прогрессивное сужение и финальная консолидация. Система фотографий формализована с использованием двух взаимодополняющих уровней: на первом уровне фотографии P1–P2 предоставляют 2D-доказательства, а фотографии P3–P6 — 3D-морфологические доказательства; на втором уровне фотографии P1, P2, P4 и P6 определены как конфигурации стандартного типа, которые можно легко воспроизвести, тогда как P3 и P5 определены как конфигурации специального типа, требующие более конкретной настройки. Таблица 4.4 показывает полученную связь между группами целевых свойств, каналами доказательств, конфигурациями фотографий и модулями промптов.

Таблица 4.4 – Связь между входными и выходными требованиями

Группа целевых свойств	Требования к доказательствам	Канал доказательства	Используемые фотографии	Основные элементы промпта
Толщина, GSM	Масштабное ориентирование, общий внешний вид, макроплоскость	2D	<i>P1 + P2</i>	<i>E02, E03, E10, E13</i>
Усилия растяжения при малых удлинениях	Сигналы направленной деформации и сопротивления формированию при контролируемой манипуляции	3D	<i>P4, P6</i>	<i>E02, E03, E04, E10, E12, E13</i>
Расстояния, связанные с изгибом консоли	Кривизна/провисание /расстояние между складками под действием силы тяжести	3D	<i>P3, P6</i>	<i>E02, E03, E04, E10, E13</i>
<i>DC</i> и <i>DC_{SFM}</i>	3D силуэт, количество/глубина складок, деформация под действием силы тяжести	3D	<i>P3, P5, P6</i>	<i>E02, E03, E04, E10</i>

Основные различия между промптами сосредоточены в трёх аспектах: стратегия объединения доказательств, режим представления численных значений и механизм замкнутого цикла. Стратегия объединения доказательств определяет, применяются ли ограничения согласованности за одну генерацию или постепенно усиливаются через многократные обновления. Режим представления численных значений определяет, выводятся ли результаты напрямую как отдельные значения или сначала кодируются как диапазоны для отражения неопределённости, а затем преобразуются в конкретные значения. Механизм замкнутого цикла определяет, организованы ли результаты в проверяемый рабочий процесс через промежуточную сравнительную таблицу и итоговую таблицу с выполнением правил сходимости. Таблица 4.5 показывает настраиваемые модули протокола.

Таблица 4.5 – Настройки выполнения и вывода для версий промпта

Промпт	Объединение доказательств и порядок ввода	Режим вывода	Явное обновление предыдущих данных	Механизм замкнутого цикла и сходимость	Методологическая цель
1	Поэтапное применение ограничений	Диапазон	Нет	Неявно	Устанавливает консервативный структурированный базовый протокол
2	Объединение P1–P4	Однозначие	Нет	Сводная таблица плюс итоговая таблица	Обеспечивает напрямую сопоставимые отдельные значения с отчётностью замкнутого цикла
3	Однораундовое объединение с принудительным использованием всех фото	Однозначие	Нет	Неявно	Обеспечивает глобальные ограничения согласованности в одном проходе
4	Поэтапное разблокирование с итеративным обновлением	Минимальное–максимальное–среднее значения	Да	Вложенная сходимость	Контролирует дрейф через проверку

					ые правила сходимост и
5	Обновление по тесту и финальная консолидация	Диапазон → однозначение	Да	Прогрессив ноесужени е	Стандартиз ирует протокол замкнутого цикла и усиливает проверяем ость

Как показано в Таблице 4.5, версии промптов различаются главным образом контролируемыми регуляторами протокола, которые управляют объединением доказательств, представлением значений и организацией вывода в проверяемый рабочий процесс замкнутого цикла.

Структура промптов приведена в ПРИЛОЖЕНИИ А.

4.3 Калибровка и конфигурирование протокола измерений

Протокол измерений ИИ был откалиброван и настроен с помощью трёх взаимосвязанных процедур. Эти процедуры соответствовали трём контролируемым факторам: протоколу промпта, модели измерений ИИ и протоколу фотодоказательств. В этом разделе рассмотрены методы составления протокола.

1. *Калибровка протокола промпта.* Протокол промпта был откалиброван при фиксированной модели ИИ и фиксированном входе фотодоказательств P1–P4. Пять версий промпта были последовательно составлены и сравнены. Различия между версиями не описывались с точки зрения длины текста или различий в формулировках, а фиксировались в зависимости от состояния активации элементов, режима численного вывода, режима объединения нескольких изображений и механизма сходимости замкнутого цикла, как показано в Таблицах 4.3 и 4.5. Параметры ①–②④, полученные с помощью каждой версии промпта, сравнивали с физическими эталонными параметрами, а МАРЕ использовали для оценки ошибки.

2. *Выбор модели ИИ.* GPT-5.1, Gemini 3 Pro, Grok 4.1 и Qwen3-Max получили одни и те же фотодоказательства P1–P4 и выдавали полный набор параметров ①–②④. Результаты сравнивали с соответствующими физическими эталонными параметрами из Таблицы 4.6, а МАРЕ использовали для оценки ошибки. Эта процедура сравнивала возможности различных

мультимодальных моделей ИИ по измерению параметров ткани при одинаковых промптах и изображениях.

3. *Определение протокола фотодоказательств.* Тест фотодоказательств был разделён на три части. Первая часть сравнивала P1, P2 и P1+P2, чтобы определить, предоставляют ли изображение плоской ткани и текстуры крупным планом взаимодополняющие доказательства. Вторая часть сравнивала ошибки измерений при использовании P4 при различных углах вращения для получения спиральной драпировки. Третья часть сравнивала ошибки измерений при использовании P6 при прдвешивании пробы, выкроенной по направлениям основы, утка и диагонали. Все протоколы фотодоказательств оценивали на основе параметров ①–⑳, а MAPE использовался для количественной оценки их ошибок относительно физических эталонных параметров.

Эти три процедуры совместно определяли условия работы ИИ. Первая процедура фиксировала протокол промпта, вторая — модель ИИ, а третья — правила получения фотодоказательств. Подсказка, модель и протокол изображений, определённые в ходе этих процедур, совместно формировали протокол измерений ИИ, используемый для последующего построения цифрового двойника ткани (DT). Итоговый протокол измерений ИИ состоял из стандартной части промпта, выбранной модели ИИ, комбинации двумерных доказательств P1 и P2, изображения P4 с определённым углом вращения и изображения P6 с определённым направлением размещения. P3 и P5 сохраняли как доказательства морфологии драпируемости.

4.3.1. Калибровка протокола промпта

Таблица 4.6 показывает лабораторные эталонные параметры, использованные для расчёта APE и MAPE при калибровке версий промпта.

Таблица 4.6 – Лабораторные эталонные значения физико-механических свойств тканей F1–F3

Ткань	Направление нитей	GSM, г/м ²	Толщина, мм	Усилие растяжения, кгс (сН), после заданного удлинения пробы, мм					Изгиб, мм		DC
				1	2	3	4	5	Контакт ноерасстояние	Расстояниеперемещения	
F1	Основа	136.36 ± 3.25	0.33±0.02	0.148±0.01	0.344±0.02	0.555±0.04	0.798±0.07	1.123±0.09	46±1.87	52.8±3.5	0.42±0.01
	Уток			0.030±0.02	0.058±0.04	0.084±0.07	0.111±0.09	0.138±0.11	21.2±0.8	32.6±0.8	
	Диагональ			0.010±0.01	0.011±0.01	0.016±0.01	0.019±0.01	0.022±0.01	28.8±1.3	37.6±1.1	
F2	Основа	90.91±1.94	0.18±0.01	0.238±0.12	0.647±0.28	1.504±0.55	2.500±0.77	3.654±0.87	13.6±1.8	28.8±0.8	0.33±0.01
	Уток			0.024±0.004	0.047±0.007	0.080±0.013	0.117±0.019	0.158±0.024	9.4±0.67	24.6±0.5	
	Диагональ			0.010±0.001	0.011±0.001	0.016±0.001	0.019±0.001	0.022±0.001	28.8±1.3	37.6±1.1	

				0.01	0.01	0.02	0.03	0.03		5	
	Диагно наль			0.010± 0.01	0.020± 0.01	0.030± 0.01	0.040± 0.01	0.050± 0.01	12.8±0.4 5	27.2±1.1	
F3	Основ а	101.52±2 .47	0.15±0. 01	0.248± 0.11	0.678± 0.34	1.190± 0.56	1.808± 0.82	2.629± 1.2	33.3±2.1 7	42.4±2.8 8	0.45±0.0 1
	Уток			0.056± 0.01	0.108± 0.02	0.161± 0.04	0.217± 0.04	0.279± 0.04	22.6±1.1 4	33.6±0.8 9	
	Диагно наль			0.016± 0.01	0.034± 0.01	0.045± 0.01	0.060± 0.01	0.072± 0.01	24.4±2.3	32.8±3.3 5	

Как показано в Таблице 4.6, три ткани имеют выраженные различия по всем показателям. Совокупные результаты показывают, что ткани различаются, что обеспечивает широкую основу для последующих испытаний.

Путь получения ИИ параметров был итерационно откалиброван посредством разработки протокола промпта. Калибровку проводили при фиксированной модели ИИ и стабильном наборе фотодоказательств P1–P4. В основной части промпта описаны элементы E01–E15, режим численного вывода, порядок объединения фотографических доказательств и механизм сходимости, поскольку именно эти структурные различия определяли условия измерения.

Рисунок 4.3 показывает значения MAPE для параметров, оцененных моделью GPT-5.1 при использовании версий промпта 1–5, с группировкой по категориям свойств.

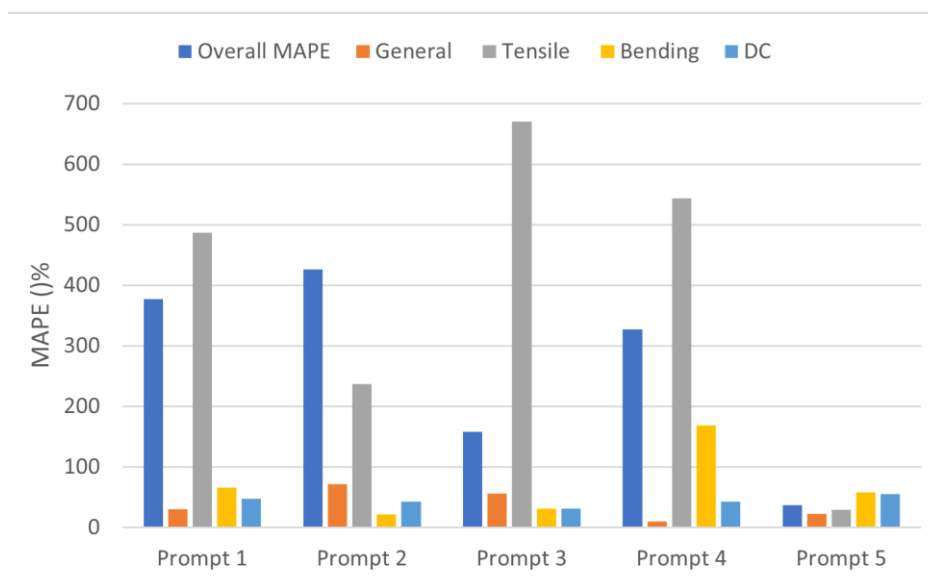


Рисунок 4.3 – Значения MAPE для показателей, оцененных ИИ, для промптов 1–5

Как показано на Рис. 4.3, ошибки в значительной степени зависят от структуры промпта. Промпты 1 и 2 дают высокие и нестабильные ошибки, а промпт 3 существенно снизил

общий уровень ошибки. Промпт 4 подтвердил, что дополнительные ограничения протокола не повышают автоматически точность измерения. Промпт 5 достиг наименьшего общего значения MARE, равного 37%, и имеет наиболее пригодную структуру среди пяти версий. Сгруппированные ошибки также показывают, что параметры растяжения являются основным источником ошибки, что указывает на высокую вариативность этой группы параметров.

Результаты пяти промптов были сопоставлены с соответствующими лабораторными результатами. В Таблице 4.7 сравнены показатели свойств ткани F1, полученные путем ИИ оценивания и измеренные традиционными способами.

Таблица 4.7 – Показатели свойств, оцененные по промптам 1–5, и соответствующие им результаты контактных лабораторных измерений для F1

Код показателя (табл. 2.5)	Показатель, оцененный по промпту					Реальное значение, полученное традиционным способом
	1	2	3	4	5	
①	0.4	0.55	0.45	0.32	0.36	0.33
②	190	240	240	160	185	136.36
③	0.21	0.09	0.27	0.11	0.2	0.148
④	0.36	0.18	0.716	0.21	0.53	0.344
⑤	0.57	0.32	1.161	0.32	0.86	0.555
⑥	0.87	0.49	1.607	0.42	1.19	0.798
⑦	1.5	0.68	2.052	0.5	1.52	1.123
⑧	0.165	0.07	0.2	0.09	0.03	0.03
⑨	0.27	0.13	0.38	0.18	0.057	0.058
⑩	0.4	0.2	0.56	0.27	0.085	0.084
⑪	0.59	0.27	0.74	0.39	0.111	0.111
⑫	0.78	0.32	0.92	0.5	0.14	0.138
⑬	0.085	0.06	0.14	0.07	0.006	0.01
⑭	0.14	0.08	0.182	0.15	0.008	0.011
⑮	0.185	0.1	0.224	0.23	0.009	0.016
⑯	0.23	0.12	0.266	0.34	0.01	0.019
⑰	0.25	0.13	0.308	0.44	0.012	0.022
⑱	40	34	30	115	34	46
⑲	43	42	27	62.5	81	52.8
⑳	48	30	20	108	29	21
㉑	51	38	45	67.5	72	32.6
㉒	60	24	40	85	30	28
㉓	62	34	30	82.5	76	37.6

⑭	0.62	0.6	0.55	0.6	0.65	0.42
MAPE, %	377	426	158	327	37	-

Как показано в Таблице 4.7, насыщение промптов дополнительной информацией привело к снижению ошибки по всем параметрам: общее значение MAPE изменилось с 377% в промпте 1 до 37% в промпте 5. Эти изменения показывают, что улучшение промпта не было простым линейным процессом, а сопровождалось перераспределением ошибок между выбранными показателями. На уровне отдельных параметров преимущество промпта 5 заключалось не в том, что каждый параметр стал наиболее близким к лабораторному эталонному значению. Например, параметр ① был ближе к лабораторному эталонному значению в промпте 4, параметр ⑳ - в промпте 3, параметр ㉒ - в промпте 2. Преимущество промпта 5 проявилось прежде всего на уровне полного набора параметров и снижения общего значения MAPE до 37%. Поэтому промпт 5 был выбран в качестве стандартного протокола.

Для дальнейшего изучения влияния структуры промпта на точность оценивания параметров сравнивали их влияние в четырех последовательных переходах: промпт 1→промпт 2, промпт 2→промпт 3, промпт 3→промпт 4 и промпт 4→промпт 5. Таблица 4.8 показывает изменения протокола и эволюцию ошибок на уровне параметров между соседними версиями подсказок.

Таблица 4.8 – Изменения протокола и эволюция ошибок на уровне параметров между соседними версиями подсказок

Показатель	Основная корректировка промптов			
	1→2	2→3	3→4	4→5
Количество улучшенных параметров	16	3	15	15
Количество ухудшенных параметров	8	21	9	9
Среднее Δ APE по 24 кодированным параметрам, %	+49	-268	+169	-290
Улучшенные коды	③, ⑧–⑰, ⑳–㉔	①, ㉑, ㉔	①–⑭, ⑰	⑦–⑱, ㉑, ㉒ –⑳
Ухудшенные коды	①–②, ④–⑦, ⑱–⑲	③–⑱, ㉑–㉓	⑮–⑱, ㉑–	①–⑥, ⑰,

			⑳	㉑, ㉒
Наибольшее улучшение	⑯ Растяжение по диагонали на 4 мм (-578.9 %)	㉐ Контактное расстояние при изгибе поутку (-38.1 %)	⑬ Растяжение по диагонали, 1 мм (-700 %)	⑰ Растяжение по диагонали, 5 мм (-1854.5 %)
Наибольшее ухудшение	① Толщина (+45.5 пр)	⑭ Растяжение по диагонали на 2 мм (+927.3 %)	⑰ Растяжение по диагонали, 5 мм (+600 %)	⑲ Расстояние перемещения при изгибе по основе (+35 %)

Примечание: ΔAPE означает изменение APE , выраженное в процентных пунктах. Отрицательное значение указывает на снижение ошибки, тогда как положительное значение указывает на увеличение ошибки.

Как показано в Таблице 4.8, итерация генераций перераспределяет ошибки на уровне параметров. Переход от промпта 2 к промпту 3 показал наиболее выраженный дисбаланс по количеству параметров: только три параметра улучшились, а 21 параметр ухудшился. Хотя среднее значение ΔAPE по 24 закодированным параметрам снизилось на 268 %, но изменение промпта не обеспечило равномерного повышения стабильности параметров, особенно для растяжения при малых удлинениях и параметров изгиба: напротив, переход от промпта 4 к промпту 5 дал наибольшее снижение APE , достигшее 290 % по 24 параметрам.

Таким образом, калибровка промптов определила стандартную версию протокола для последующих ИИ измерений. Промпт 5 сочетал границы доказательств, физические ограничения, структурированный вывод, итеративное обновление, суммаризацию с замкнутым циклом и прогрессивное сужение диапазона. Эта конфигурация обеспечила наименьший общий $MAPE$ среди пяти версий и была использована как фиксированный протокол для дальнейшего отбора модели ИИ и определения фотографического протокола.

4.3.2 Отбор модели ИИ

Модель измерений ИИ отбирали при фиксированном протоколе промпта и одинаковом наборе фотодоказательств P1–P4. GPT-5.1, Qwen3-Max, Gemini 3 Pro и Grok-4.1 получили один и тот же входной набор изображений и вывели полный набор параметров ①–㉒. Полученные значения сопоставили с лабораторными эталонными значениями, а общий

МАРЕ использовали как основной показатель выбора модели ИИ. Таблица 4.9 показывает результаты, использованные для выбора модели ИИ при откалиброванном протоколе промпта для ткани F1.

Таблица 4.9 – Результаты оценивания показателей свойств ткани F1 с помощью разных ИИ

Код параметра	Значение параметра, оцененное ИИ				Реальное значение, полученное традиционным способом
	GPT-5.1	Qwen3-Max	Gemini 3 Pro	Grok-4.1	
①	0.36	0.20	0.315	0.44	0.33
②	185	130	152.5	220	136.36
③	0.2	0.6	0.39	2.28	0.148
④	0.53	1.59	1.043	3.85	0.344
⑤	0.86	2.58	1.696	5.18	0.555
⑥	1.19	3.57	2.349	6.48	0.798
⑦	1.52	4.56	3	7.65	1.123
⑧	0.03	0.085	0.058	0.34	0.03
⑨	0.057	0.162	0.11	0.48	0.058
⑩	0.085	0.238	0.162	0.6	0.084
⑪	0.111	0.315	0.214	0.72	0.111
⑫	0.14	0.391	0.267	0.85	0.138
⑬	0.006	0.016	0.0105	0.06	0.01
⑭	0.008	0.02	0.0135	0.07	0.011
⑮	0.009	0.025	0.0165	0.09	0.016
⑯	0.01	0.029	0.0195	0.1	0.019
⑰	0.012	0.035	0.023	0.13	0.022
⑱	34	27	46	24.5	46
⑲	81	36	56	35	52.8
⑳	29	23	32	14.5	21
㉑	72	32	42	28	32.6
㉒	30	25	40	19.5	28
㉓	76	35	50	31	37
㉔	0.65	0.55	0.44	0.45	0.42

MAPE, %	37	129	68	446	-
---------	----	-----	----	-----	---

Как показано в Таблице 4.9, GPT-5.1 обеспечил достижение наименьшего значения MAPE 37%. GPT-5.1 показал более высокую общую согласованность по всему набору параметров, особенно в группе параметров растяжения и в некоторых параметрах, связанных с изгибом. Gemini 3 Pro дал правдоподобные значения для ①, ⑱ и ㉔. Qwen3-Max показал более значительные отклонения в параметрах растяжения при малых удлинениях, Grok-4.1 дал наибольшее общее значение MAPE из-за крупных ошибок по большинству параметров растяжения. Эти результаты показывают, что отбор модели был необходим, поскольку один и тот же промпт вызывает значительную вариацию в разных моделях ИИ.

Ошибки для параметров были преобразованы в баллы как «100 – MAPE»; если MAPE превышало 100%, балл устанавливался равным 0. Следовательно, более высокий балл указывает на меньшую ошибку в соответствующей категории параметров. Рисунок 4.4 показывает распределение баллов для групп параметров.

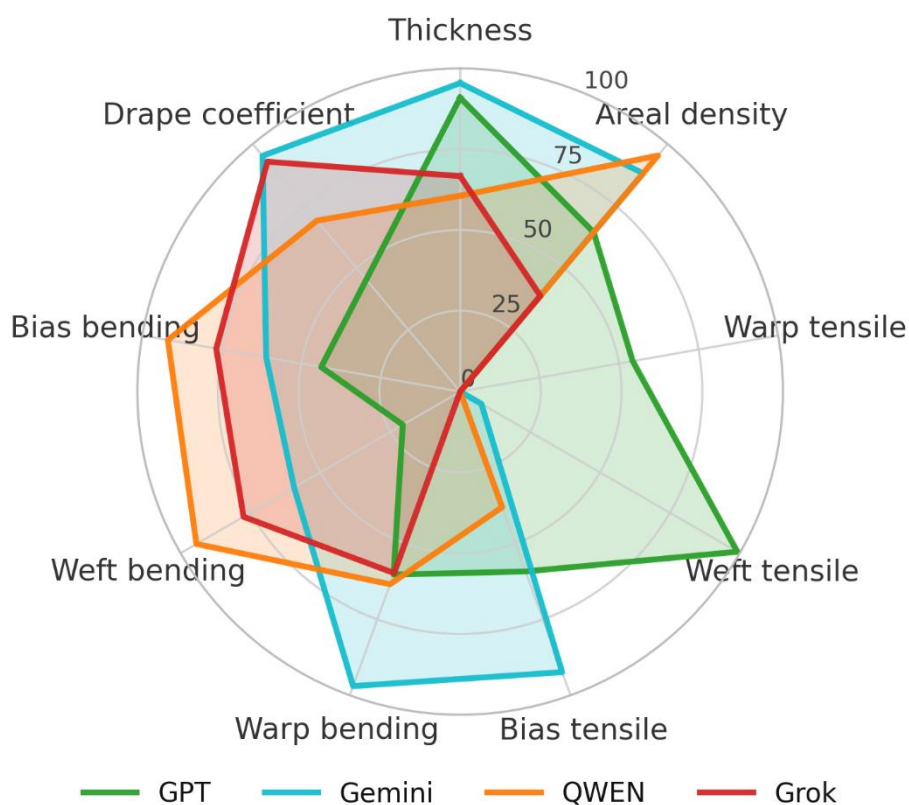


Рисунок 4.4 – Радарная диаграмма для разных моделей ИИ

Как показано на Рис. 4.4, модели демонстрируют различную эффективность на уровне параметров. GPT-5.1 показал наиболее сбалансированный общий профиль, особенно по толщине, растяжению по утку и DC, тогда как его балл по параметрам, связанным с изгибом в

диагональном направлении, был относительно низким. Gemini 3 Pro показал высокие баллы по толщине, DC, параметрам, связанным с изгибом в направлении основы, и поведению при растяжении в диагональном направлении, однако его балл по растяжению в направлении основы был близок к 0, что указывает на серьезное отклонение в этой категории параметров. Qwen3-Max хорошо проявил себя по GSM и параметрам, связанным с изгибом, но его баллы по параметрам растяжения в целом были ниже. Grok-4.1 показал приемлемые результаты по DC и категориям, связанным с изгибом, однако его баллы по толщине, GSM и параметрам растяжения были низкими. Эти результаты подтверждают, что различия между моделями не ограничивались только общим MAPE, представленным в Таблице 4.9. Каждая модель имеет сильные и слабые стороны на уровне категорий параметров, а GPT-5.1 обеспечивает наиболее сбалансированную структуру выходных значений среди четырех протестированных моделей ИИ.

4.3.3 Определение набора фотодоказательств

На основании комплексного сравнения GPT-5.1 был выбран в качестве основной модели ИИ для последующего исследования.

Отбор фотографий. Для определения влияния количества фотографий тканей на точность оценивания параметров были сравнены три промпта с разным набором фотографий: P1, P2 и P1+P2. Ошибка MAPE была разложена на четыре группы: базовые физические свойства (два параметра: толщина и поверхностная плотность), параметры растяжения (15 параметров), параметры изгиба (шесть параметров), DC (один параметр). Таблица 4.10 показывает MAPE для ткани F1.

Таблица 4.10 – Сравнение MAPE для входных данных P1, P2 и P1+P2 для F1

Входное фото	Значение MAPE, %			Относительная ошибка для DC, %	Общий MAPE, %
	для общих свойств	для растяжения	для изгиба		
P1	63.05	103.21	97.84	11.90	94.71
P2	41.52	221.29	75.21	35.71	162.06
P1+P2	70.38	27.80	108.87	26.19	51.55

Как показано в Таблице 4.10, после объединения фотодоказательств P1 и P2 MAPE для параметров растяжения снизился до 27,8%, а общее MAPE уменьшилось до 51,55%. Объединение фотографий позволило снизить общий MAPE, поэтому P1 и P2 были сохранены в составе промпта как обязательные, а их сочетание обеспечивает наименьшую общую ошибку и существенно улучшает результаты оценивания наиболее нестабильной группы параметров.

Изображение P4 потребовало обоснования угла вращения для получения спиралевидных

складок, поскольку спиральная деформация изменяет видимую плотность складок и длину их распространение. Были выбраны три возможных контролируемых угла вращения: 180°, 360° и 540°. Оценку полученных параметров проводили с использованием общего MAPE, MAPE для параметров растяжения, MAPE для параметров изгиба, APE для DC. Таблица 4.11 показывает значения ошибок при разных углах вращения P4.

Таблица 4.11 – Влияние угла вращения на фотографии P4 на ошибку измерения для ткани F1

Угол вращения	Значения MAPE, %			Относительная ошибка DC, %
	растяжение	изгиб	общий	
180°	113.62	160.06	113.91	11.9
360°	28.37	135.66	54.85	4.76
540°	282.07	94.96	202.66	0

Как показано в Таблице 4.11, закручивание на 360° привело к наименьшему значению общего MAPE, равное 54,85%. Это указывает на то, что условие 360° обеспечивает более сбалансированную деформацию ткани для оценки параметров растяжения при малых удлинениях и оценки DC. Хотя закручивание на 540° обеспечило для DC APE=0 и относительно низкое MAPE для параметров изгиба, оно вызвало сильное завышение параметров растяжения: MAPE для параметров растяжения увеличилось до 282,07%, а общее MAPE возросло до 202,66%. Поэтому 360° был выбран в качестве стандартного угла вращения P4.

Фотография P6, фиксирующая подвешивание на колонне, показывает видимое провисание и складки, зависящие от направления раскроя. Поэтому были протестированы три варианта размещения пробы: вдоль основы, вдоль утка и по диагонали. Таблица 4.12 показывает сгруппированные значения MAPE, использованные для выбора условий размещения P6.

Таблица 4.12 – Влияние направления раскроя пробы на фотографии P6 на ошибку измерения для ткани F1

Направление раскроя пробы на фотографии P6	Значения MAPE, %			Относительная ошибка DC, %
	растяжение	изгиб	общий	
Основа	22.94	33.19	34.10	42.86
Уток	48.85	146.20	127.55	30.95
Диагональ 45°	71.58	40.15	62.44	59.52

Как показано в Таблице 4.12, размещение пробы вдоль основы обеспечивает наименьшее общее значение MAPE и наименьшие ошибки в группе базовых физических свойств, параметров растяжения и изгиба. Эти результаты показывают, что изображение на

фотографии P6 пробы, выкроенной по направлению основы, обеспечивает наиболее сбалансированные результаты оценивания. Поэтому P6-Warp было выбрано в качестве стандартизированного размещения для последующего получения параметров на основе ИИ.

Таким образом, на основе анализа результатов, представленных в Таблицах 4.10-4.12, в протокол для составления промпта включены следующие фотографии:

- для визуализации 2D состояния тканей - фотографии P1+P2 использовали как обязательные,
- для визуализации способности ткани к спиральному закручиванию на 360° - фотография P4,
- для визуализации реагирования ткани на силу гравитации по основе - фотография P6.

Самостоятельный вклад каждой фотографии. Для количественной оценки самостоятельного вклада каждой фотографии и исключения эффектов взаимодействия, возникающих при объединении нескольких фотографий, шесть типов фотографий исследовали как независимые входные данные для оценивания параметров трех тканей F1, F2 и F3. В каждом тесте промпт был неизменным, а изменяли только тип фотографии. Таблица 4.13 показывает, может ли промпт с одной фотографией поддерживать вывод полного набора параметров.

Таблица 4.13 – MAPE для всех параметров при включении в промпт одной фотографии P1–P6

Тип фотографии (одиночный вход)	MAPE, %, для тканей		
	F1	F2	F3
P1	94.71	6.89	30.19
P2	162.06	19.55	35.93
P3	48.68	48.33	34.23
P4	54.85	67.9	85.18
P5	71.8	10.8	59.4
P6	34.1	139.38	38.74

Как показано в Таблице 4.13, вклад каждой одиночной фотографии заметно различается между тремя тканями: сравнение подтверждает, что ни один тип фотографии не обеспечивает стабильно низкую ошибку для всех трех тканей. Например, фотография P6 является наиболее эффективным одиночным входом для ткани F1, но приводит к высокой ошибке для ткани F2. Эти результаты показывают, что визуальных данных по одной фотографии недостаточно в качестве общего протокола для вывода полного набора параметров.

Чтобы дополнительно определить, является ли одиночная фотография достаточной для

разных тканей (ориентир только на наименьшее значение MAPE был признан недостаточным для обобщения), для каждой фотографии были рассчитаны среднее значение, медиана, SD и описательный 95%-ный доверительный интервал. Такая статистическая обработка важна для разделения среднего уровня ошибки и установления разброса между тканями. Таблица 4.14 представляет статистические данные, использованные для оценки влияния каждой фотографии.

Таблица 4.14 – Результаты статистической обработки влияния фотографий на точность оценивания показателей всех тканей F1–F3

Тип фотографии	Статистические оценки MAPE, %				Межтканевая интерпретация
	Среднее значение	Медиана	дисперсия	доверительный интервал	
P1	43,93	30,19	45,49	[0; 156,93]	Конкурентный средний уровень ошибки, но зависит от ткани
P2	72,51	35,93	77,98	[0; 266,23]	Высокая нестабильность между тканями
P3	43,75	48,33	8,24	[23,28; 64,22]	Наименьшая средняя ошибка и наименьшее рассеивание
P4	69,31	67,90	15,21	[31,53; 107,09]	Относительно стабилен, но с высокой средней ошибкой
P5	47,33	59,40	32,24	[0; 127,42]	Эффективен для ткани F2, но менее стабилен между тканями
P6	70,74	38,74	59,49	[0; 218,53]	Эффективен для тканей F1 и F3, но нестабилен для ткани F2

Как показано в Таблице 4.14, фотография P3 обеспечила наибольшую межтканевую стабильность среди шести входных данных и всех фотографий: среднее значение MAPE составило 43,75%, SD 8,24 % при 95%-ном доверительном интервале [23,28; 64,22].

Эти результаты согласуются со статистически подтвержденным влиянием одиночных фотографий в Таблице 4.13: P3 показало наименьший разброс для всех тканей F1–F3, однако его среднее MAPE оставалось на уровне 43,75%. Большой разброс в Таблице 4.14 показывает, что ошибка при использовании одной фотографии зависит не только от типа фотографии, но

и от типа ткани. Для статистической проверки этого предположения был проведен двухфакторный дисперсионный анализ. Тип фотографии и тип ткани рассматривались как фиксированные факторы, а размерность параметра рассматривалась как блокирующий фактор. Таблица 4.15 показывает статистические показатели, использованные для оценки влияния типа фотографии, типа ткани и их взаимодействия на абсолютную процентную ошибку APE.

Таблица 4.15 – Дисперсионный анализ влияния типа фотографии, ткани и эффектов их взаимодействия

Источник вариации	Степени свободы, df1; df2	F-критерий Фишера	p-значение	Размер эффекта η_p^2
Тип фотографии (P1–P6)	5, 391	6,16	$1,63 \times 10^{-5}$	0,073
Тип ткани (F1–F3)	2, 391	17,17	$7,12 \times 10^{-8}$	0,081
Тип фотографии × тип ткани	10, 391	22,46	$3,41 \times 10^{-33}$	0,365

Примечание: df1 и df2 обозначают степени свободы фактора и остаточной ошибки соответственно. F-критерий Фишера используется для проверки статистической значимости влияния фактора. p-значение показывает уровень статистической значимости. η_p^2 обозначает частичный эта-квадрат и используется для оценки размера эффекта. Все показатели в таблице являются безразмерными.

Как показано в Таблице 4.15, тип фотографии оказал статистически значимое влияние на APE отдельных параметров: $F = 6,16$, $p = 1,63 \times 10^{-5}$, $\eta_p^2 = 0,073$. Малое p-значение показывает, что различия между фотографиями P1–P6 были статистически устойчивыми. Однако $\eta_p^2 = 0,073$ указывает на небольшой размер эффекта, поэтому тип фотографии влиял на ошибку, но не был главным источником вариации.

Тип ткани также оказал статистически значимое влияние на ошибку оценки: $F = 17,17$, $p = 7,12 \times 10^{-8}$, $\eta_p^2 = 0,081$. Это подтверждает, что ошибки оценки различались между тканями F1, F2 и F3. При этом размер эффекта также был ограниченным.

Наибольший размер эффекта был получен для взаимодействия типа фотографии и типа ткани: $F = 22,46$, $p = 3,41 \times 10^{-33}$, $\eta_p^2 = 0,365$. Это показывает, что точность оценки по одной фотографии зависела от типа ткани. Следовательно, фотографии P1–P6 не являются полностью универсальными источниками визуальных данных для всех тканей.

Чтобы дополнительно определить, может ли одиночная фотография влиять на значения DC, лабораторные значения, принятые в качестве эталонных, сравнивали со значениями DC, сгенерированными по одиночным фотографиям P1–P6. Это сравнение было сосредоточено на

том, может ли один тип визуальных данных надежно служить базой для оценки драпируемости ткани. Таблица 4.16 представляет значения DC, полученные на основе одиночных фотографий, и соответствующие лабораторные эталонные значения.

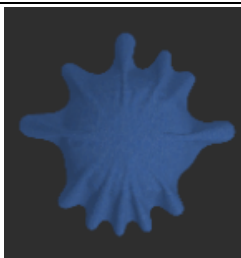
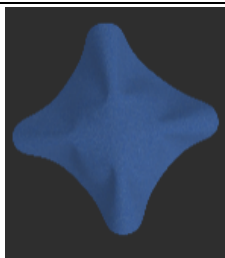
Таблица 4.16 – Сравнение значений DC, полученных GPT-5.1 при использовании одной фотографии, с лабораторными эталонными значениями



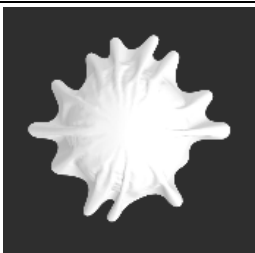

Ткань	Коэффициент драпируемости DC						
	Реальное значение	Результат оценивания по фотографии					
		P1	P2	P3	P4	P5	P6
F1	0.42	0.5	0.48	0.59	0.53	0.34	0.45
F2	0.33	0.29	0.32	0.30	0.27	0.31	0.31
F3	0.45	0.42	0.41	0.41	0.43	0.40	0.39

Как показано в Таблице 4.16, среди шести фотографий наиболее точное значение DC для ткани F1 обеспечила фотография P6, для ткани F2 предсказанные значения DC, близкие к реальному, обеспечили фотографии P2, P5 и P6. Для ткани F3 все предсказанные значения DC были ниже лабораторного эталонного значения 0,45, а фотография P4 дала наиболее близкий результат 0,43. Эти результаты показывают, что оценка DC также зависит от вида фотографии.

Численные значения DC, представленные в таблице 4.16, были дополнительно рассмотрены на морфологическом уровне, поскольку отклонение DC может проявляться не только в численном результате, но и в форме самой драпированной виртуальной пробы. Для этого лабораторный базовый вариант был сопоставлен с виртуальными пробами, сгенерированными на основе параметров, полученных ИИ при использовании одиночных фотографий. Таблица 4.17 показывает лабораторный базовый вариант и виртуальные пробы с максимальным отклонением от лабораторного результата.

Таблица 4.17 – Визуальное сравнение лабораторной пробы и виртуальных проб, сгенерированных на основе параметров ИИ

Ткань	Внешний вид проб во время измерения коэффициента драпируемости DC		Фотография ткани в промпте
	Лабораторная	сгенерированная ИИ	
F1			P3

F2			P3
F3			P6

Как показано в Таблице 4.17, численные отклонения, представленные в Таблице 4.16, отразились на морфологии смоделированной драпированной пробы. Для ткани F1 результат, полученный на основе P3, показал наибольшее структурное отклонение: лабораторный базовый вариант имел несколько радиальных фалд и относительно сложный контур складок, тогда как результат, полученный на основе фотографии P3, имел более сглаженный четырехфалдовый контур с недостаточным разделением складок. Это указывает на то, что фотография P3 недостаточна для воспроизведения сложной драпированной поверхности ткани F1. Для ткани F2 результат, полученный на основе фотографии P3, не полностью утратил радиальную структуру драпировки, однако распределение складок стало более концентрированным и менее равномерным по сравнению с лабораторным базовым вариантом: отклонение проявлялось главным образом в изменении расстояния между фалдами и их плотности. Для ткани F3 результат, полученный на основе фотографии P6, показал чрезмерную фрагментацию внешнего контура и более плотные локальные складки по сравнению с лабораторным базовым вариантом, что указывает на то, что вид ткани на фотографии в подвешенном состоянии совпал с деформационным поведением.

Результаты показывают, что нестабильность входных данных из-за одной фотографии не ограничивается численной ошибкой, а изменяет и морфологию драпированной пробы. Фотография с одним 2D или 3D видами могут усиливать один тип визуального признака, одновременно ослабляя другую деформационную способность, необходимую для оценивания всех показателей физико-механических свойств. В совокупности анализ влияния одиночных фотографий показал, что один изолированный источник изображения не может обеспечить достаточно стабильную основу для оценивания полного набора параметров.

Отбор группы фотографических изображений. После анализа результатов по одиночным фотографиям дальнейшая проверка была направлена на определение

рационального сочетания 2D и 3D фотографических доказательств. Для тканей F1–F3 были сопоставлены одиночные входы P1–P6, 2D-базовая конфигурация P1+P2 и четыре гибридные конфигурации, в которых к P1+P2 добавлялся один 3D-вид: P1+P2+P3, P1+P2+P4, P1+P2+P5 и P1+P2+P6. Для каждой конфигурации рассчитывали MAPE по полному набору параметров ①–⑳. Рисунок 4.5 показывает распределение ошибок для одиночных, 2D-базовой и гибридных фотографических конфигураций по тканям F1–F3.

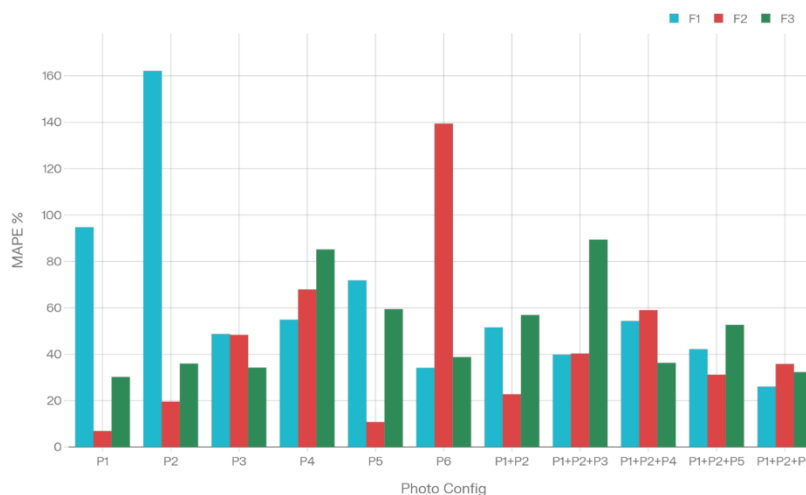


Рисунок 4.5 – Влияние объединения фотографий на точность измерений ИИ

Как показано на Рис. 4.5, эффект объединения фотографий различался для F1, F2 и F3. Для ткани F1 одиночная фотография P6 вызвала ошибку всех параметров и составила MAPE= 34,1%, а конфигурация фотографий P1+P2+P6 снизила ошибку до 26%, что указывает на важность изображения ткани в подвешенном состоянии. Для ткани F3 конфигурация P1+P2+P6 также обеспечила наименьшее значение MAPE=32,29%. Эти результаты показывают, что фотография P6 повышает точность оценивания, поскольку она предоставляет полезную информацию о расстоянии между складками и кривизне края.

Однако та же конфигурация фотографий не была эффективной для ткани F2. Базовая конфигурация фотографий P1+P2 дала значение MAPE 22,71%, а ее дополнение фотографией P6 с дополнительными 3D эффектами не снизили ошибку. Поэтому выявлено два случая: комбинация P1+P2+P6 повышает точность измерения для тканей F1 и F3 и отсутствие такого положительного влияния для ткани F2.

Чтобы сравнить сложность измерения разных параметров, ошибки параметров были сгруппированы по категориям. Рисунок 4.6 показывает среднее значение MAPE для различных групп параметров, агрегированных по тканям F1–F3. Здесь ③–⑦ обозначают параметры растяжения при малых удлинениях по основе, ⑧–⑫ - параметры растяжения при малых удлинениях по утку, ⑬–⑰ - параметры растяжения при малых удлинениях по

диагонали, ① обозначает толщину, ② обозначает GSM.

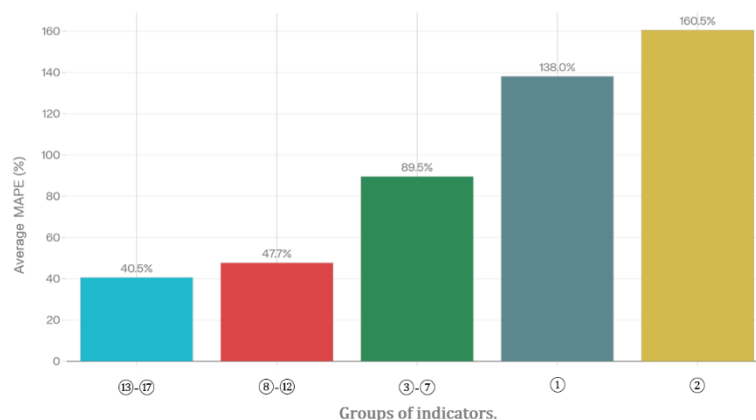


Рисунок 4.6 – Ранжирование групп параметров свойств текстильных материалов по среднему MAPE для тканей F1–F3

Как показано на Рис. 4.6, разные группы параметров сформировали четкую иерархию точности измерения. Группа параметров растяжения по диагонали (⑬–⑰) достигла наименьшего среднего MAPE, равного 40,5%, за ней следовала группа параметров растяжения по утку (⑧–⑫) со значением 47,7%. Группа параметров растяжения по основе (③–⑦) показала заметно более высокое среднее MAPE, что указывает на более высокую вариабельность в направлении основы. Два параметра базовых физических свойств имели самые высокие ошибки: толщина (①) достигла 138%, а GSM (②) достигло 160,5%.

Эти результаты показывают, что при схеме агрегирования, использованной на Рис. 4.6, группы параметров растяжения при малых удлинениях по диагонали и по утку давали меньшие средние ошибки, чем толщина и GSM. Это не означает, что все параметры растяжения были стабильными; группа параметров растяжения по основе все еще показала высокое MAPE, что согласуется с ранее сделанным наблюдением о чувствительности результатов растяжения в области малых удлинений к протоколу и конфигурации фотографий. Напротив, толщина и GSM не имели устойчивых прямых визуальных опор и поэтому показали существенно более высокие средние ошибки. Этот результат демонстрирует, что измеримость разных категорий параметров является неодинаковой. Соответственно, получение параметров на основе ИИ следует интерпретировать отдельно для низконапряженных механических параметров и базовых физических свойств.

Чтобы определить влияние 2D и 3D фотографий на ошибки, фотографии P1+P2 использовали как 2D-базовую конфигурацию, с которой сравнивали 3D фотографии и гибридный вариант из 2D+3D фотографий. Это сравнение использовали для определения

эффективной границы применения 3D фотографий для разных тканей. Таблица 4.18 содержит значения MAPE для базовой конфигурации из 2D фотографий, только 3D фотографий и конфигурации из 2D+3D фотографий.

Таблица 4.18 – Значения MAPE для конфигураций из 3D и 2D+3D фотографий в сравнении с 2D-базовой конфигурацией

Ткань	MAPE для базовой конфигурации P1+P2, %	Лучшая фотография 3D			Лучшая конфигурация фотографий 2D+3D		
		фото	MAPE	Относительное изменение, %	фото	MAPE	Относительное изменение, %
F1	51,55	P6	34,10	-33,9	P1+P2+P6	26	-49,6
F2	22,71	P5	10,80	-52,4	P1+P2+P5	31,12	+37,0
F3	56,90	P3	34,23	-39,8	P1+P2+P6	32,29	-43,3

Как показано в Таблице 4.18, вклад 3D фотографий заметно различался между тремя тканями. Для ткани F1 лучшей 3D фотографией была P6, что соответствовало относительному улучшению на 33,9% по сравнению с базовой конфигурацией P1+P2. Когда P6 объединили с P1+P2, MAPE дополнительно снизился до 26%.

Для ткани F2 лучшей 3D фотографией была P5. Однако лучшая гибридная конфигурация P1+P2+P5 увеличивала MAPE до 31,12%, что соответствовало ухудшению на 37,0% относительно базовой конфигурации. Этот результат показывает, что 3D фотография при одиночном использовании не обязательно остается эффективной после объединения с 2D фотографиями.

Ключевое различие в Таблице 4.18 заключается в том, что лучшие 3D фотографии при одиночном использовании не всегда сохраняют свою эффективность после объединения с плоскими фотографиями, а гибридную конфигурацию следует оценивать на основе достигаемого результата, а не только по количеству фотографий.

Для дополнительной проверки влияния гибридных фотографических конфигураций был отдельно рассмотрен параметр DC. Лабораторное значение DC сопоставляли с результатами, полученными при использовании 2D-базовой конфигурации P1+P2 и четырёх гибридных конфигураций, в которых к P1+P2 добавлялся один 3D-вид: P1+P2+P3, P1+P2+P4, P1+P2+P5 и P1+P2+P6. Такое сравнение позволяло определить, приближает ли добавленный 3D-вид значение DC к лабораторному эталону или вызывает его дрейф. Таблица 4.19 показывает значения DC, использованные для оценки сходимости и дрейфа при 2D-базовой и гибридных фотографических конфигурациях.

Таблица 4.19 – Сходимость и дрейф DC между 2D-базовой конфигурацией и гибридными входами

Ткань	Значение коэффициента круговой драпируемости DC					
	Реальное значение	P1+P2	P1+P2+P3	P1+P2+P4	P1+P2+P5	P1+P2+P6
F1	0.42	0.50	0.29	0.35	0.33	0.34
F2	0.33	0.30	0.28	0.30	0.29	0.30
F3	0.45	0.58	0.44	0.41	0.64	0.43

Как показано в Таблице 4.19, добавление третьего изображения к базовой конфигурации P1+P2 не привело к устойчивому улучшению прогнозирования DC. Для F1 базовая конфигурация P1+P2 дала значение DC=0,50, что было выше лабораторного эталонного значения 0,42. После добавления третьего изображения все четыре гибридных входа дали более низкие значения DC в диапазоне от 0,29 до 0,35. Среди них конфигурация P1+P2+P4 дала наиболее близкое значение, равное 0,35, однако этот результат все еще занижал лабораторное эталонное значение DC. Это показывает, что добавление 3D-деформационных данных корректировало завышение, вызванное P1+P2, и вводило тенденцию к занижению для ткани F1.

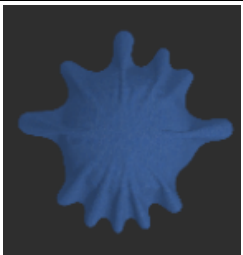
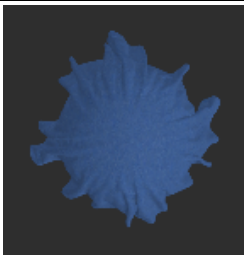




Для ткани F2 все комбинированные фотографические входы дали относительно близкие значения DC в диапазоне от 0,28 до 0,30 по сравнению с лабораторным эталонным значением 0,33. Конфигурации P1+P2, P1+P2+P4 и P1+P2+P6 дали значение 0,30, что показывает, что добавление одного 3D-вида существенно не изменяло выходное значение DC для этой ткани. Для F3 базовая конфигурация P1+P2 завышала DC до 0,58, тогда как P1+P2+P3 и P1+P2+P6 снижали значения до 0,44 и 0,43 соответственно, оба значения были ближе к лабораторному эталонному значению 0,45. Однако P1+P2+P5 увеличивала DC до 0,64, показывая, что не все 3D-доказательства улучшали сходимость.

На уровне DC добавленный 3D-вид не обеспечивал единого направления сходимости: сходимость DC зависит от типа ткани и добавленного деформационного вида.

Чтобы дополнительно определить наличие связи между численными отклонениями трехфотографических гибридных входов и конечной морфологией драпировки, базовая симуляция была сопоставлена с гибридной симуляцией, давшей максимальное отклонение для каждой ткани. Цель этого сравнения заключалась не только в проверке значения DC, но и в оценке того, искажает ли несовместимое объединение визуальных доказательств внешний контур, распределение фалд и локальную структуру складок. Таблица 4.20 представляет гибридные случаи с максимальным отклонением, использованные для анализа морфологических последствий несовместимого объединения доказательств.

Таблица 4.20 – Визуальное сравнение морфологических отклонений, вызванных гибридными фотографическими входами с максимальным отклонением

Ткань	Лабораторный базовый вариант	Случай максимального отклонения	Источник отклонения
	НТ	ИЯ	Я

F1			P1+P2+P3
F2			P1+P2+P3
F3			P1+P2+P5

Как показано в Таблице 4.20, численные отклонения, выявленные в Таблице 4.19, отразились на морфологии смоделированной драпировки. Для F1 случай с максимальным отклонением был получен при конфигурации P1+P2+P3. По сравнению с лабораторным базовым вариантом гибридная симуляция показала более плотный и более нерегулярный внешний контур с увеличенным подразделением фалд и сниженной плавностью радиального контура. Это указывает на то, что добавление P3 ввело деформационный признак, который изменил исходную структуру драпировки, а не стабилизировал ее.

Для F2 конфигурация P1+P2+P3 также привела к максимальному отклонению. Смоделированная драпировка сохраняла общую радиальную форму, однако расстояние между фалдами стало более раскрытым, а локальные складки стали менее мелкими, чем в лабораторном базовом варианте. Этот результат показывает, что для F2 добавленная фотография P3 изменила баланс между расширением контура и развитием локальных складок, что привело к видимому морфологическому дрейфу.

Для F3 наибольшее отклонение было вызвано конфигурацией P1+P2+P5. По сравнению с лабораторным базовым вариантом гибридная симуляция показала более расширенный силуэт с более выраженными выступающими фалдами и менее компактной центральной структурой. Это визуальное изменение согласуется с завышением DC, представленным в Таблице 4.19, где предсказанное значение DC увеличилось до 0,64 по сравнению с лабораторным эталонным значением 0,45.

В целом эти сравнения показывают морфологические последствия несовместимых

гибридных доказательств. Чтобы дополнительно сравнить конфигурации фотографий с точки зрения ошибки и межтканевой вариативности, для каждой конфигурации был рассчитан локальный метрику отбора фотографий. Такой подход позволяет определить предпочтительную область «меньшая отборочная ошибка — меньшая вариативность» в единой системе координат и тем самым оценить баланс между точностью и стабильностью как для одиночных фотографий, так и для многофотографических комбинаций. Рисунок 4.7 показывает распределение точности и стабильности разных конфигураций доказательств на основе локального метрика отбора факторов доказательств.

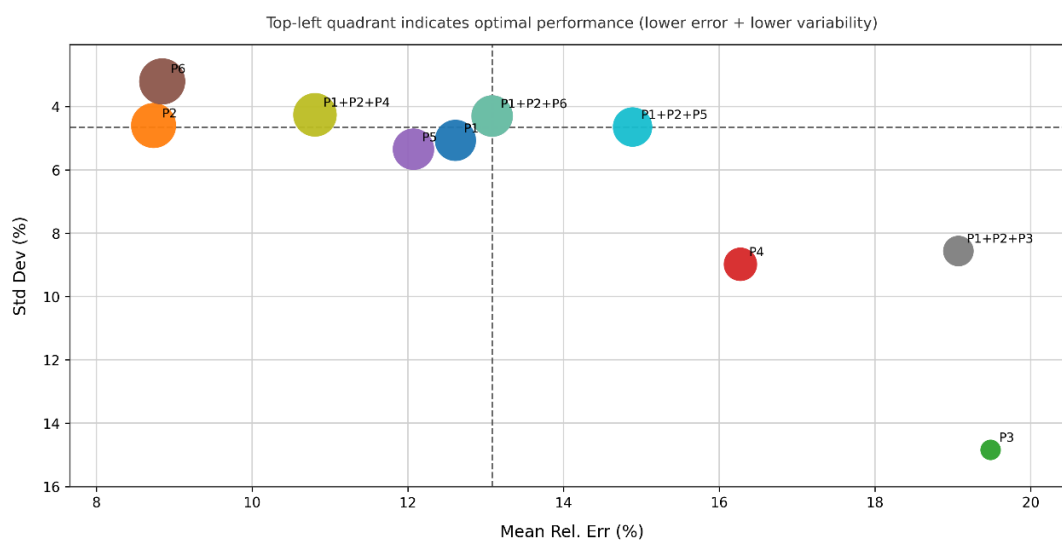


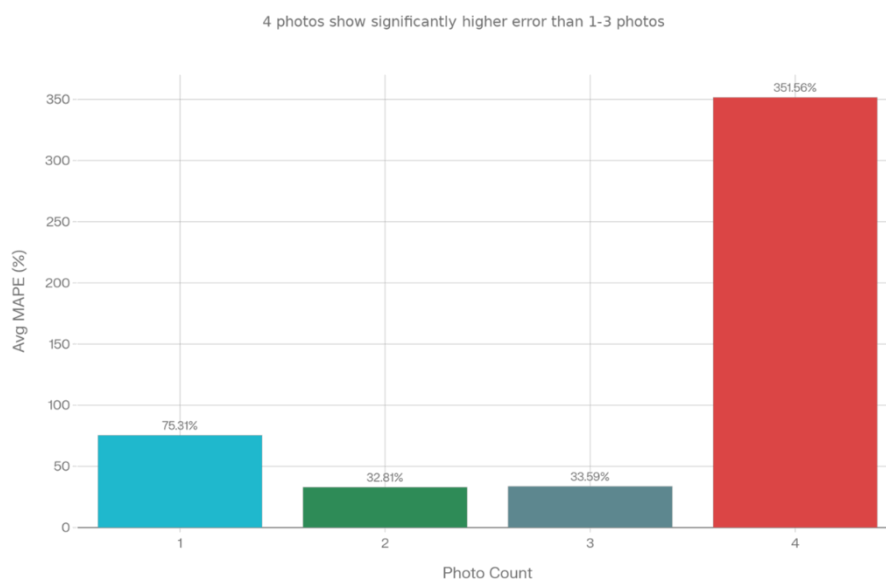
Рисунок 4.7 – Распределение точности и стабильности различных конфигураций доказательств

Как показано на Рис. 4.7, верхний левый квадрант соответствует наиболее желательной области результатов, указывая на меньшую локальную отборочную ошибку при одновременно меньшей вариативности между тканями. Среди протестированных конфигураций P6 и P2 располагались на относительно низких уровнях локальной отборочной ошибки, приблизительно около 9%, со значениями SD около 3,2% и 4,5% соответственно. Конфигурация P1+P2+P4 также оставалась в области низкой вариативности, с локальной отборочной ошибкой около 10,8% и SD около 4,0%. Напротив, P3 и P1+P2+P3 находились в области высокой ошибки с локальными отборочными ошибками, близкими к 19%–20%; в частности, P3 также показала наибольшее значение SD, около 14,9%, что указывает на слабую межтканевую стабильность в рамках данного дополнительного метрика.

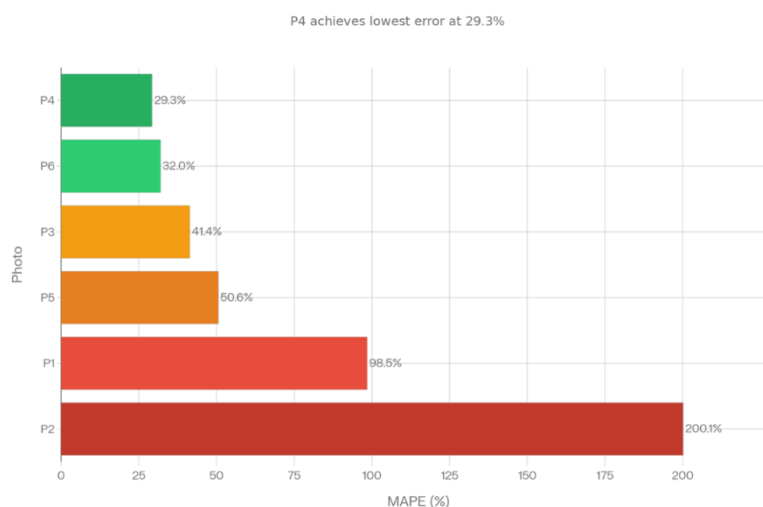
Из общего распределения видно, что эффективность фотографических доказательств не улучшалась монотонно с увеличением числа входных изображений. Некоторые конфигурации из трех фотографий, такие как P1+P2+P6, показали относительно хороший контроль вариативности, хотя их локальная отборочная ошибка была выше, чем у P2 и P6.

Напротив, комбинация P1+P2+P3 показала высокую локальную отборочную ошибку и высокую вариативность. Поэтому Рис. 4.7 не использовался как единственное основание для выбора протокола; он интерпретировался совместно с полным значением MAPE по всем параметрам, сходимостью DC и морфологическими сравнениями.

Дополнительный F1-специфический анализ фотографий. Чтобы дополнительно разделить влияние количества фотографий и влияние ИХ типа, был проведен дополнительный F1-специфический анализ. В этом анализе использовали локальный метрику отбора фотографий, показанный на Рис. 4.8. Одно сравнение обобщало ошибку в зависимости от количества входных фотографий, тогда как другое ранжировало шесть одиночных фотографических входов при одинаковом F1-специфическом условии отбора. Рисунок 4.8 показывает F1-специфическое сравнение эффекта количества фотографий и ранжирования одиночных фотографий.



a



b

Рисунок 4.8 – Влияние количества фотографий и типа одиночной фотографии на локальную отборочную ошибку для F1: *a* – средняя локальная отборочная ошибка при разном количестве фотографий; *b* – ранжирование одиночных входных данных P1–P6 по локальной отборочной ошибке

Как показано на Рис. 4.8,а, количество входных фотографий не имеет монотонной связи со снижением ошибки. При использовании только одной фотографии средняя локальная отборочная ошибка составляла 76,3%. Использование двух фотографий заметно снижало среднюю локальную отборочную ошибку до 32,3%, а использование трех фотографий давало близкий результат — 33,3%. Однако при увеличении числа фотографий до четырех средняя локальная отборочная ошибка резко возросла примерно до 352,0%. Этот результат показывает, что добавление большего числа фотографий не обязательно повышало точность измерения. Напротив, избыточные или несовместимые визуальные доказательства могли вызывать существенное усиление ошибки.

Как показано на Рис. 4.8,б, шесть одиночных фотографических входов также заметно различались по эффективности для F1. Это ранжирование показывает, что не все источники одиночных фотографических доказательств одинаково способствовали выводу верных параметров. В совокупности Рис. 4.8,а и Рис. 4.8,б показывают, что контроль ошибки определяется не только количеством фотографий, а главным образом их типом и совместимостью.

4.3.4 Формирование итогового набора параметров, измеренных с помощью искусственного интеллекта

После фиксации стандартного протокола промпта, модели ИИ и правил использования фотографических доказательств результаты ИИ измерений были организованы в соответствии с системой кодирования параметров, определенной в Главе 2. Такая организация позволила сравнивать ИИ и традиционные инструментальные измерения в последующей стадии моделирования.

Выходные значения ①–⑳ были объединены в одну таблицу параметров. Таблица включает параметры, непосредственно назначаемые в редакторе материалов Style3D, и вспомогательные параметры, используемые для оценки ошибки и проверки физической согласованности. Таблица 4.21 представляет объединенный закодированный вектор параметров, полученный с помощью финальной одномодельной конфигурации ИИ измерений.

Таблица 4.21 – Набор ИИ параметров материала для генерации и оценки цифрового двойника ткани

Код параметра	F1	F2	F3
①	0.41	0.20	0.18
②	175	110	90
③	0.20	0.127	0.40
④	0.42	0.41	1.00
⑤	0.70	0.81	1.80
⑥	1.08	1.32	2.80
⑦	1.52	1.95	4.24
⑧	0.029	0.013	0.043
⑨	0.058	0.038	0.077
⑩	0.082	0.060	0.119
⑪	0.108	0.073	0.162
⑫	0.132	0.084	0.213
⑬	0.005	0.005	0.011
⑭	0.008	0.011	0.018
⑮	0.009	0.016	0.027
⑯	0.011	0.022	0.036
⑰	0.011	0.027	0.050
⑱	25.00	9.00	23.50
⑲	28.75	19.08	29.85
⑳	21.00	7.00	16.75
㉑	32.55	18.34	24.96
㉒	23.00	8.40	20.00
㉓	30.36	17.89	26.80
㉔	0.69	0.36	0.43
Общий MAPE, %	26.00	35.78	32.29

Как показано в Таблице 4.21, ИИ дал наименьшую ошибку для ткани F1 и наибольшую ошибку для ткани F2. Для всех трех тканей силы растяжения в направлениях основы, утка и диагонали увеличивались от удлинения 1 мм до 5 мм, что указывает на соответствие выходных значений базовому физическому поведению при растяжении в области малых нагрузок. Параметры растяжения по основе для F2 в целом были ниже соответствующих

лабораторных эталонных значений, тогда как для F3 они в целом были выше. Это сравнение показывает, что направленное поведение при растяжении в области малых удлинений оставалось чувствительной группой параметров в пути измерений ИИ.

В целом путь получения параметров с помощью ИИ был сформирован через три последовательных этапа: калибровку промпта, отбор модели ИИ и отбор фотографического протокола. Промпт 5 был выбран как стандартный протокол, поскольку он обеспечил наименьшее общее MAPE и более стабильную структуру выходных значений. При одном и том же протоколе и идентичных условиях входных изображений GPT-5.1 достиг наименьшей общей ошибки и поэтому был выбран в качестве основной модели. Отбор фотографического протокола дополнительно зафиксировал использование 2D-фотографий P1+P2, условие вращения P4 на 360° и правило P6-Warp для подвешивания пробы на колонне. Одномодельный набор параметров, представленный в Таблице 4.21, был получен с использованием P1+P2+P6-Warp в качестве финальной комбинации визуальных доказательств. Полученный набор параметров ИИ сформировал второй путь ввода материала, соответствующий пути традиционных инструментальных измерений. Поэтому валидность этого пути ввода материала, полученного с помощью ИИ, должна оцениваться не только по ошибке на уровне параметров, но и по морфологии драпировки, сформированной при единых условиях симуляции в Style3D.

4.4. Построение цифрового двойника ткани с помощью ИИ параметров

4.4.1 Рабочий процесс построения цифрового двойника ткани

Рабочий процесс построения цифрового двойника ДТ основан на связи между физическими эталонными параметрами, фотодоказательствами, протоколом промпта, ИИ параметрами и назначением материала в Style3D. Рисунок 4.9 показывает полный рабочий процесс преобразования фотографий и выходных ИИ параметров в цифровой двойник ткани.

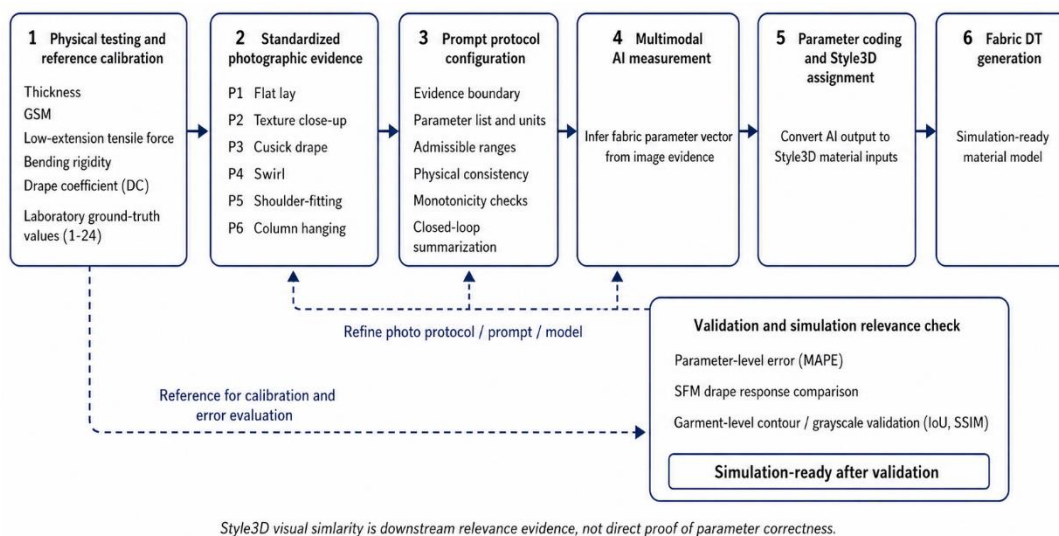


Рисунок 4.9 – Рабочий процесс построения цифрового двойника ткани (DT) на основе ИИ измерений

Как показано на Рис. 4.9, физические испытания, фотодоказательства, протокол промпта, вывод параметров ИИ и назначение материалов в Style3D образуют непрерывную цепочку методов. Физические испытания предоставляют эталонный набор параметров ①–⑳ для калибровки и оценки ошибок. Система фотодоказательств обеспечивает контролируемую визуальную информацию для вывода ИИ параметров. Протокол промпта ограничивает модель ИИ через границы доказательств, допустимые диапазоны параметров, единицы измерения, требования к физической согласованности и консолидацию замкнутого цикла. Сконсолидированные ИИ результаты затем кодируются в соответствии с Таблицей 4.2 и передаются в Style3D для построения цифрового двойника ткани. Параметры, измеренные ИИ, считаются пригодными для последующего моделирования только после оценки ошибок на уровне параметров, сравнения драпировки по новому методу SFM и проверки контура или отклика по градиациям серого на уровне изделия. Визуальное сходство в Style3D рассматривается как доказательство адекватности.

4.4.2 Назначение параметров в редакторе материалов Style3D

Коды ①, ②, ③–⑰, ⑱, ㉑ и ㉓ использовали для генерации цифрового двойника ткани в Style3D. Рисунок 4.10 показывает интерфейс Style3D, используемый для ввода параметров, полученных с помощью ИИ.



Рисунок 4.10 – Интерфейс Style3D для ввода параметров

Как показано на рис. 4.10, в Style3D используют толщину ①, поверхностную плотность ②, усилия растяжения при малых удлинениях 1–5 мм ③–⑦ по основе, по утку ⑧–⑫, по диагонали ⑬–⑰, параметры изгиба в трёх направлениях ⑱, ⑲ и ⑳. Параметры контактного расстояния ⑳, ㉑ и ㉒, а также DC, не назначаются напрямую в этом интерфейсе. После ввода назначаемых параметров цифровой двойник ткани создаётся автоматически и может использоваться для последующих симуляций проб тканей SS, LS, VD и PLD.

4.4.3 Сравнение цифровых двойников тканей

При единой параметрической структуре, определенной в Главе 2, и одинаковых настройках моделирования в Style3D для тканей F1, F2 и F3 были построены цифровые двойники DT тканей с использованием двух способов получения параметров. В первом способе, обозначенном как Lab на Рис. 4.11, использовали набор параметров, измеренных традиционными лабораторными приборами. Во втором способе использовали финальный одномодельный набор параметров, измеренных ИИ, представленный в Таблице 4.21. Рисунок 4.11 показывает DT тканей, сформированные на основе лабораторного и ИИ способов.

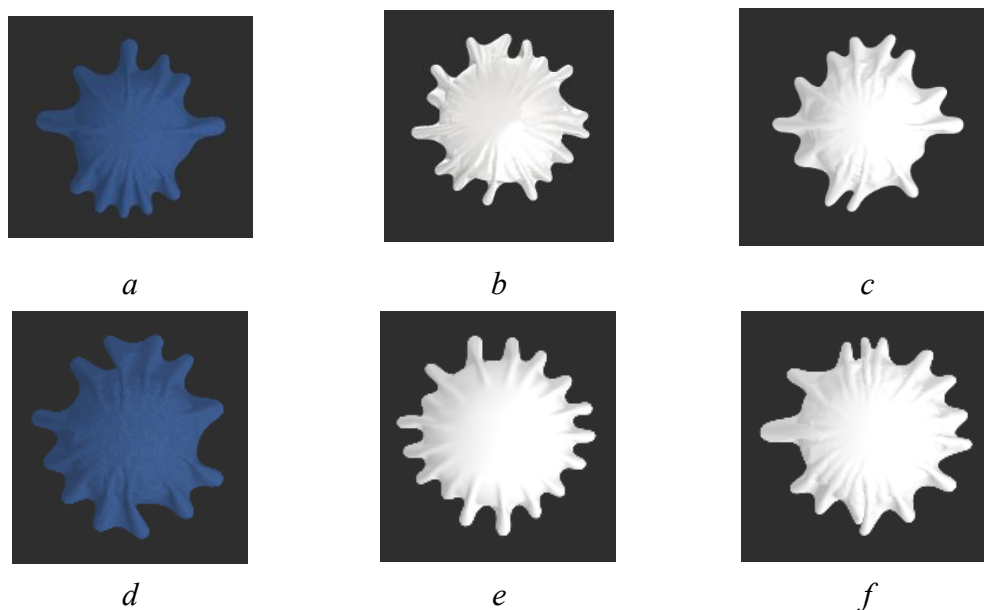


Рисунок 4.11 – Цифровые двойники тканей, сгенерированные в Style3D при двух способах получения параметров: *a* - F1-Lab; *b* - F2-Lab; *c* - F3-Lab; *d* - F1-ИИ; *e* - F2-ИИ; *f* - F3-ИИ

Как показано на рис. 4.11, три ткани формировали различные состояния драпировки при обоих путях получения параметров. Результаты лабораторных параметров на рис. 4.11,а–с показывают явные различия во внешнем контуре, формировании фалд и радиальном распределении складок между F1, F2 и F3. Результаты параметров ИИ на рис. 4.11,д–f также сохранили эти различия на уровне тканей, что указывает на то, что набор параметров, измеренных ИИ, не свёл три ткани к визуально сходным формам.

Для ткани F1 (Рис. 4.11,а и Рис. 4.11,д) видно, что оба способа сформировали компактный радиальный контур драпировки с несколькими фалдами. Однако результат, полученный на основе ИИ, показал немного более упрощенный контур и менее тонкое подразделение складок, чем результат, полученный на основе лабораторных параметров. Это различие согласуется со сравнением между набором параметров, измеренных ИИ, в Таблице 4.21 и лабораторным эталонным значением в Таблице 4.6: значение DC, измеренное ИИ для F1, составило 0.69, что выше лабораторного эталонного значения 0.42. Это отклонение не препятствовало формированию распознаваемого цифрового двойника DT ткани F1, однако показывает, что способ с ИИ изменял локальное проявление складок этой ткани.

Для ткани F2 (Рис. 4.11,б и Рис. 4.11,е) видно, что результаты, полученные на основе лабораторных параметров и на основе ИИ, позволили получить относительно расширенную и мягкую морфологию драпировки. Результат, полученный на основе ИИ, сохранял радиальную тенденцию драпировки, но показывал более округлый и более регулярный внешний контур, что указывает на уменьшение части тонких вариаций фалд. Это наблюдение соответствует более высокому общему MAPE для F2 в Таблице 4.21, которое достигло

35.78%, хотя измеренное ИИ значение DC, равное 0.36, оставалось близким к лабораторному эталонному значению 0.33 в Таблице 4.6. Следовательно, основное отклонение для F2 отражалось не только в DC, но и в совокупном воздействии параметров растяжения и параметров, связанных с изгибом, на локальную морфологию.

Для ткани F3 (Рис. 4.11,с и Рис. 4.11,f) видно, что оба способа формировали радиально складчатое состояние драпировки с четко выраженной волнистой внешней границей. Результат, полученный на основе ИИ, сохранял основную структуру фалд и направление радиальных складок, хотя локальный контур края становился немного более плотным и более фрагментированным. Этот результат согласуется со сравнением между Таблицей 4.21 и Таблицей 4.6, где значение DC, измеренное ИИ для F3, составило 0.43, а лабораторное эталонное значение — 0.45. Сравнение показывает, что путь ИИ сохранял доминирующий отклик драпировки F3 более эффективно, чем в случае F1.

В целом Рис. 4.11 показывает, что оба способа получения параметров способны формировать распознаваемые и сопоставимые DT тканей. Способ с параметрами ИИ сохранял основные различия между F1, F2 и F3, однако локальные отклонения имели место в разделении фалд, регулярности контура и плотности складок. Поэтому параметры, измеренные ИИ, не следует оценивать только по их численной близости к лабораторным эталонным значениям. Их применимость также зависит от того, сохраняют ли полученные DT тканей основную морфологию драпировки при одинаковых условиях моделирования. Сравнение на уровне ткани обеспечивает материальную основу для последующей валидации на уровне изделия, где влияние этих параметрических отклонений может быть дополнительно исследовано через согласованность силуэта и формы.

4.5. Валидация на уровне изделия

Релевантность выбранного фотографического протокола для симуляции на уровне изделия. Чтобы оценить, может ли выбранный фотографический протокол поддерживать симуляцию на уровне изделия, ткань F1 была использована как примерная ткань для генерации цифрового двойника DT юбки в Style3D. Способ Lab использовал набор параметров, измеренных традиционными приборами, а способ с ИИ - набор параметров, измеренных с помощью ИИ на основе выбранного фотографического протокола P1+P2+P6-Warp. Эти два способа обозначены как Lab и ИИ на Рис. 4.12. Обе симуляции выполнены для одинаковых чертежей, аватаре, настройках и материала. Рисунок 4.12 показывает симуляции юбки, сформированные по способам Lab и ИИ.

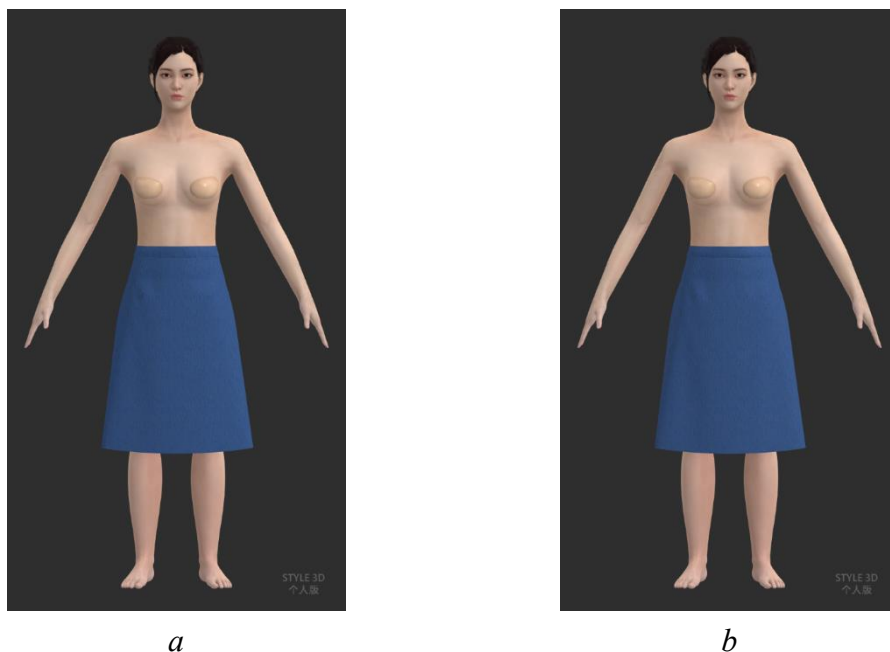


Рисунок 4.12 – Юбки, сгенерированные в Style3D при двух способах получения параметров: *a*- F1-Lab; *b*- F1-ИИ

Как показано на Рис. 4.12, обе симуляции сформировали сходные состояния драпировки в Style3D. Юбка, построенная на основе параметров ИИ, сохранила основной А-образный силуэт, расширение по линии низа и общее вертикальное падение формы, наблюдаемое в симуляции, построенной на основе лабораторных параметров. Незначительные визуальные различия наблюдаются в боковом контуре и нижней части. Однако общее состояние изделия оставалось визуально сопоставимым для двух способов получения параметров.

Контур юбок из F1-Lab и F1-ИИ были наложены друг на друга в стандартизированных видах спереди, сбоку и снизу. Красный контур представляет результат, полученный на основе ИИ, а черный контур представляет лабораторный эталон. Рисунок 4.13 показывает наложенные контуры юбок, использованные для сравнения формы изделий.

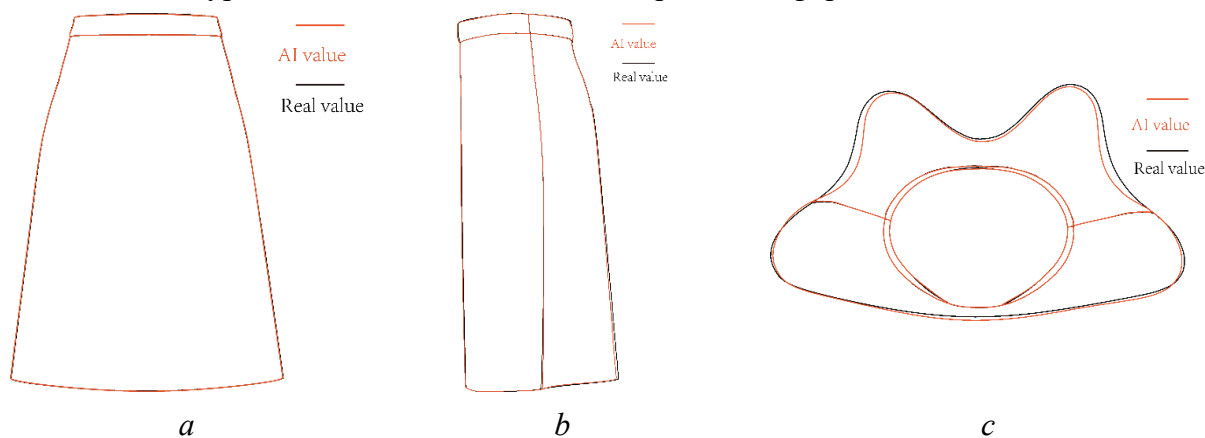


Рисунок 4.13 – Наложённые контуры юбок F1-ИИ и F1-Lab: *a* – вид спереди; *b* – вид сбоку; *c* – вид снизу

Как показано на Рис. 4.13, силуэт, полученный на основе ИИ, показал высокую

геометрическую согласованность с лабораторным эталоном на видах спереди, сбоку и снизу. На Рис. 4.13,а контуры во фронтальном виде почти совпали. На Рис. 4.13,б сравнение боковых контуров показало небольшое отклонение вдоль нижнего контура, что свидетельствует о сохранении влияния локальной жесткости. На Рис. 4.13,с контур на виде снизу сохранял сходную ширину внизу и общую форму раскрытия, хотя локальные различия контура проявлялись в областях с высокой кривизной. Эти результаты показывают, что выбранный фотографический протокол ИИ позволил воспроизвести основной отклик драпируемости ткани F1 в юбке.

Для количественной оценки геометрической согласованности между симуляциями юбки F1-ИИ и F1-Lab из извлеченных силуэтов были рассчитаны IoU, разность площадей и статистические показатели отклонения границы. Статистические показатели отклонения границы включали среднее значение, 95-й процентиль и максимальное отклонение, которые использовали для оценки общего перекрытия и локальных различий контуров. Таблица 4.22 показывает количественную геометрическую согласованность между силуэтами юбок F1-ИИ и F1-Lab.

Таблица 4.22 – Согласованность силуэтов юбок F1-ИИ и F1-Lab

Вид / область	IoU	Различие площади (AI по сравнению с Lab, %)	Отклонение границы, px		
			Среднее	95%	Максимальное
Фронтальный вид	0.9963	-0.010	4.40	11.98	16.00
Боковой вид	0.9872	-0.410	11.22	21.18	28.00
Вид снизу (внешний контур)	0.9654	-2.030	22.89	80.39	91.68
Контур талии (внутренний контур)	0.9210	+3.36	19.34	35.75	48.14

Как показано в Таблице 4.22, силуэт юбки F1-ИИ продемонстрировал высокую геометрическую согласованность с эталоном F1-Lab. Вид спереди достиг наибольшего перекрытия, с IoU 0,9963 и разностью площади всего $-0,010\%$, что указывает на то, что фронтальное расширение и ширина низа почти не изменились под влиянием параметров, измеренных с помощью ИИ. Вид сбоку также сохранил высокую согласованность при IoU 0,9872 и разностью площади $-0,410\%$, хотя среднее отклонение границы увеличилось до 11,22 px. Наибольшее отклонение наблюдалось во внешнем контуре на виде снизу, где IoU снизился до 0,9654, а 95-й процентиль отклонения границы достиг 80,39 px. Это указывает на то, что основная остаточная ошибка была сосредоточена в контуре низа. Контур талии имел самое низкое значение IoU, равное 0,9210, и положительную разность площади $+3,36\%$, что свидетельствует о том, что формообразование в области талии, контролируемое вытачками,

оставалось более чувствительным к различиям параметров, чем общий контур юбки.

Далее были сгенерированы безрукавные платья из трех тканей F1–F3. Рисунок 4.14 показывает области ROI в области опорной поверхности.

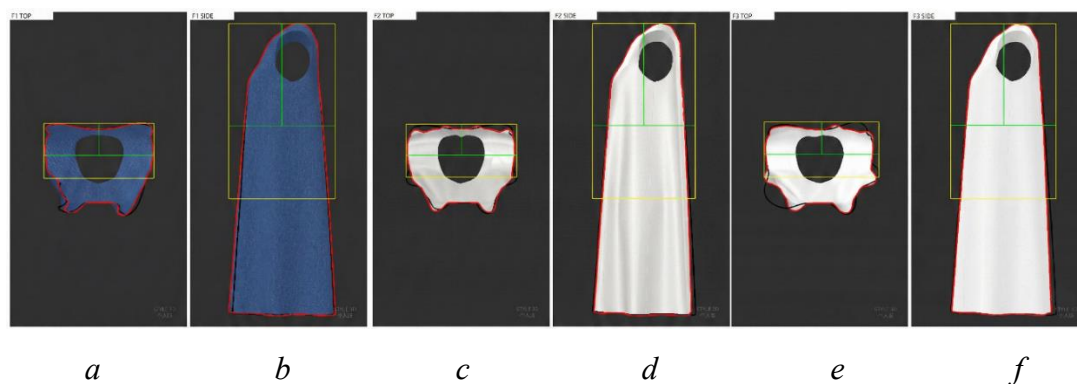


Рисунок 4.14 – Области ROI для анализа платья: *a, b* - F1; *c, d* - F2; *e, f* - F3

Как показано на Рис. 4.14, область ROI на виде сверху фиксируют расширение платья вниз, а область ROI на виде сбоку - изменение бокового контура. Таким образом, данная настройка ROI оценивает горизонтальное расширение и стабильность бокового профиля. ROI в области опорной поверхности фигуры была подразделена на левую и правую части, чтобы определить симметричность силуэта. Для каждой ткани и каждого вида были рассчитаны IoU, разность площадей, среднее отклонение контура, 95-й процентиль отклонения и максимальное отклонение. Таблица 4.23 показывает показатели согласованности ROI для платьев, сгенерированных на основе ИИ-параметров и Lab-параметров.

Таблица 4.23 – Показатели согласованности ROI в области опорной поверхности для платьев на основе ИИ-параметров и Lab-параметров

Ткань	Вид	ROI	IoU	Различие площади (ИИ по сравнению с Lab, %)	Отклонение контуров, px		
					Среднее	95%	Максимальное
F1	сверху	Левая	0,9630	-3,07	0,9	6,68	13,69
		Правая	0,9558	-1,96	1,0	6,14	11,87
		Объединённая	0,9594	-2,51	0,9	6,68	13,69
	сбоку	Левая	0,9824	+1,66	0,60	2,87	13,82
		Правая	0,9838	+0,74	0,28	0,95	13,28
		Объединённая	0,9831	+1,19	0,50	1,91	13,82
F2	сверху	Левая	0,8685	-10,13	3,57	21,01	25,78
		Правая	0,8373	-10,85	4,52	25,72	30,56

		Объединённая	0,8526	-10,49	4,23	22,92	30,56
	сбоку	Левая	0,9923	+0,04	0,14	0,95	1,91
		Правая	0,9875	-0,15	0,22	0,95	2,87
		Объединённая	0,9897	-0,06	0,23	0,95	2,87
F3	сверху	Левая	0,9428	-3,32	1,33	5,73	6,68
		Правая	0,8008	-12,80	5,43	29,48	35,34
		Объединённая	0,8710	-8,05	3,46	21,95	35,34
	сбоку	Левая	0,9960	-0,16	0,06	0,95	0,95
		Правая	0,9863	-1,02	0,28	1,91	4,78
		Объединённая	0,9911	-0,62	0,23	0,95	4,78

Как показано в Таблице 4.23, ROI на виде сбоку показали стабильно высокую согласованность между двумя платьями. Объединенные значения IoU для вида сбоку составили 0,9831 для F1, 0,9897 для F2 и 0,9911 для F3, при этом средние отклонения границы для всех трех тканей были ниже 0,50 px. Это указывает на то, что в способе генерации платья на основе ИИ-параметров сохранен вертикальный боковой контур. ROI на виде сверху были более чувствительны, чем на виде сбоку.

Согласованность между Таблицами 4.22 и 4.23 показывает, что более выраженное расхождение на виде сверху отражает более высокую чувствительность драпируемости к боковому расширению. Следовательно, выбранный фотографический протокол ИИ воспроизводил профиль платья на виде сбоку с высокой точностью, а на виде сверху выявлены остаточные тканезависимые отклонения, особенно для F2 и F3. Этот результат подтверждает целесообразность использования анализа ROI на виде сверху для более строгой проверки релевантности на уровне изделия.

Оптимизация точности измерений с помощью гибридной маршрутизации. Ранее было показано, что разные мультимодальные модели ИИ обладают различными преимуществами по группам параметров. Поэтому была оценена целесообразность применения стратегии гибридной маршрутизации с использованием нескольких моделей для повышения точности оцениваемых параметров. В этой стратегии Gemini 3 Pro была выбрана для толщины ①, Qwen3-Max—для GSM②, GPT-5.1 —для параметров растяжения при малых удлинениях③–⑰, Grok-4.1 —для параметров, связанных с изгибом ⑱–⑳, и коэффициента драпируемости ㉔. Параметры из Таблицы 4.21 использовали как базовый вариант для сравнения. Таблица 4.24 показывает гибридный многомодельный набор параметров и соответствующие значения MAPE для тканей F1–F3 при том же наборе фотографий P1+P2+P6-Warp.

Таблица 4.24 – Значения параметров, полученные разными ИИ с использованием P1+P2+P6-Warp

Модель	Код параметра	Значение параметра для ткани		
		F 1	F 2	F 3
Gemini 3 Pro	①	0,42	0,14	0,18
Qwen3-Max	②	140	97,5	97
GPT-5,1	③	0,2	0,237	0,4
	④	0,42	0,635	1
	⑤	0,7	1,495	1,8
	⑥	1,08	2,485	2,8
	⑦	1,52	3,63	4,24
	⑧	0,036	0,024	0,06
	⑨	0,067	0,046	0,11
	⑩	0,099	0,079	0,17
	⑪	0,132	0,115	0,23
	⑫	0,166	0,157	0,3
	⑬	0,007	0,01	0,02
	⑭	0,009	0,02	0,04
	⑮	0,011	0,03	0,05
	⑯	0,012	0,04	0,07
	⑰	0,015	0,05	0,09
Grok-4,1	⑱	33,5	17	33
	⑲	38,5	36,4	42
	⑳	24,5	13	26
	㉑	38	34,6	39
	㉒	28	17	30
	㉓	37	36,2	40
	㉔	0,58	0,33	0,42
MAPE, %		22,93	9,81	24,6

Как показано в Таблице 4.24, стратегия гибридной маршрутизации с несколькими моделями ИИ снизила общее значение MAPE для всех трех тканей по сравнению с одномодельным набором параметров ИИ, представленным в Таблице 4.21. Для ткани F1

значение MAPE снизилось с 26% до 22,93%, для ткани F2 - с 35,78% до 9,81%, для ткани F3 - с 32,29% до 24,60%. Эти результаты показывают, что наибольший эффект гибридной маршрутизации проявился для ткани F2.

Улучшение было главным образом связано с распределением моделей ИИ по группам параметров. Такое закрепление ИИ за группами параметров снизило зависимость от одной мультимодальной модели и позволило рассматривать выбор модели как часть измерительного протокола. Стратегию гибридной маршрутизации следует интерпретировать как режим повышения точности, а не как стандартный протокол, поскольку она увеличивает процедурную сложность и требует предварительной информации, полученной на этапе отбора моделей. Поэтому одномодельный путь остается подходящим для стандартного построения цифровых двойников тканей, а гибридный многомодельный путь предоставляет вариант с более высокой точностью в тех случаях, когда допустима дополнительная вычислительная и операционная сложность.

Результаты Таблице 4.24 было визуализированы, чтобы наглядно показать масштаб снижения ошибки, достигнутого с помощью гибридной маршрутизации. Рисунок 4.15 показывает сравнение MAPE между одномодельным базовым вариантом и конфигурацией гибридной маршрутизации.

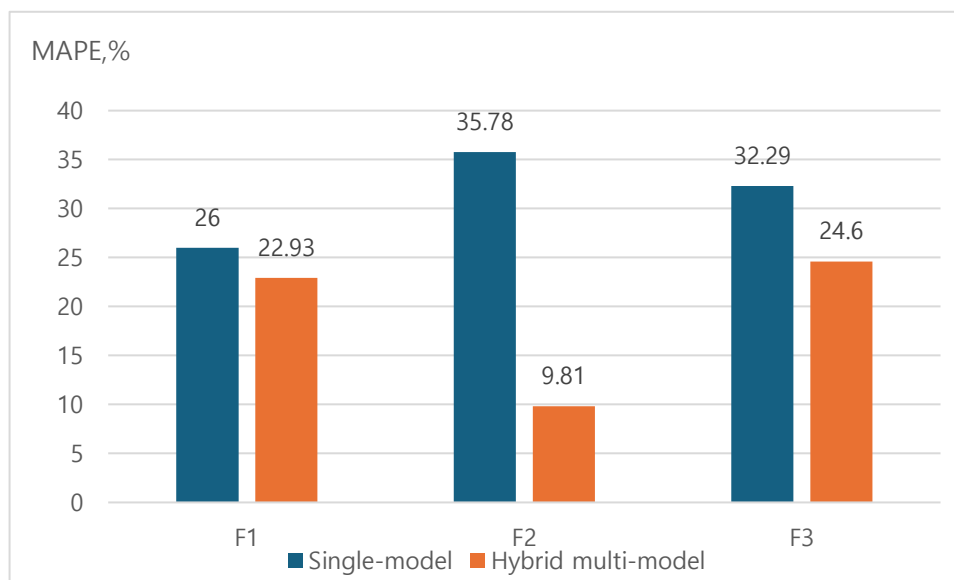


Рисунок 4.15 – Сравнение MAPE для одномодельного базового варианта и гибридной маршрутизации с несколькими моделями для тканей F1–F3

Как показано на Рис. 4.15, гибридная маршрутизация снизила MAPE для всех трех тканей, однако степень снижения была неодинаковой. Это сравнение показало, что гибридная маршрутизация была наиболее эффективной для ткани F2, которая до этого имела наибольшую ошибку при одномодельном базовом варианте. Этот результат подтверждает возможность использования гибридной маршрутизации как дополнительной стратегии

повышения точности.

Гибридный набор параметров для ткани F1 был импортирован в Style3D для генерации DT платья, а полученный результат был сопоставлен с DT платья, сгенерированным на основе набора параметров F1-Lab. Рисунок 4.16 показывает фронтальные виды платьев.



Рисунок 4.16 – Сравнение цифровых двойников платьев, сгенерированных на основе гибридного набора параметров F1 и набора F1-Lab: *a* – F1-hybrid; *b* – F1-Lab; *c* – наложение контуров F1-hybrid и F1-Lab

Как показано на Рис. 4.16, цифровой двойник платья, сгенерированный на основе гибридного набора параметров F1-hybrid, получился очень близким к эталону F1-Lab: он имеет сходные положение горловины, ширину плеч, боковой контур и расширение по линии низа. Это указывает на то, что улучшение параметров, достигнутое за счет гибридной маршрутизации, не ограничилось лишь численным снижением MAPE, но также улучшает моделирование платья.

Наложение контуров на Рис. 4.16,с дополнительно показывает, что центральная часть и внешний контур хорошо совпадают. Видимое отклонение в основном концентрировалось вдоль нижнего бокового контура платья. Следовательно, стратегию гибридной маршрутизации можно интерпретировать как дополнительный путь повышения точности при генерации цифрового двойника изделия. Ее основная ценность заключается в снижении ошибки на уровне параметров при воспроизведении морфологии платья в одинаковых условиях моделирования.

Полученные экспериментальные результаты обобщены на Рис. 4.17 в виде архитектуры протокола-управляемой целостной операционной схемы.

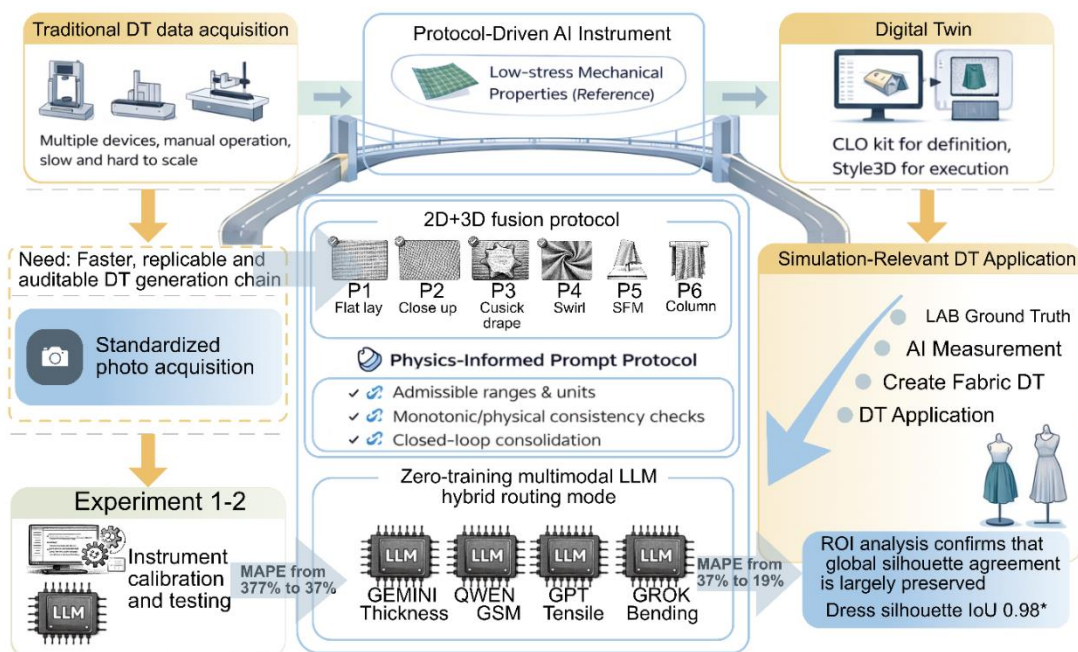


Рисунок 4.17 – Структура протоколо-управляемой схемы измерения на основе ИИ

Как показано на Рис. 4.17, данная структура функционирует как протоколо-управляемый ИИ-инструмент для измерения показателей свойств тканей. Рабочий процесс формирует строгую метрологическую цепочку, которая последовательно проходит от **входных доказательных изображений** через **протокольные ограничения** к получению **вектора параметров** и завершается **проверкой релевантности моделирования**. Эта схема обеспечивает эффективную генерацию цифровых двойников тканей за счет сокращения повторных физических испытаний, при этом лабораторные эталонные значения по-прежнему необходимы для калибровки, оценки ошибок и валидации.

Выводы по главе 4

1. Сформирована схема протоколо-управляемого получения параметров тканей с помощью ИИ с использованием стандартизированного набора фотографий тканей, показывающих плоский вид, текстуру, круговую драпируемость, спиральную складчатую поверхность, драпируемость на антропоморфном стенде и вид в подвешенном состоянии. Выходные параметры были организованы в кодированную систему, которая охватывала толщину, поверхностную плотность, усилия растяжения при малых удлинениях, параметры, связанные с изгибом, и коэффициент драпируемости. Такая система позволила связать

визуальные признаки ткани, лабораторные эталонные значения и параметры, назначаемые в редакторе материалов в программе трехмерной симуляции одежды Style3D, в единую измерительную структуру.

2. Разработан стандартный процесс измерений с помощью ИИ путем последовательной калибровки протокола промпта, выбор модели ИИ и конфигурации фотографических изображений ткани. При фиксированном протоколе промпта GPT-5.1 показал наилучший результат по группам параметров. В итоговую конфигурацию фотографий были включены 2D и 3D изображения.

3. Показано, что цифровые двойники тканей в Style3D можно генерировать по результатам лабораторных контактных испытаний и бесконтактных неинструментальных, полученных путем ИИ оценивания. Отличие между MAPE для двух видов цифровых двойников тканей составляет от 26 до 35,78%. Сравнение внешнего вида цифровых двойников показало их схожесть, включая общую форму драпируемости, характер внешнего контура и распределение складок.

4. Валидация на уровне изделий подтвердила пригодность ИИ-результатов для построения и предварительной валидации цифровых двойников тканей и изделий.

ГЛАВА 5. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФОРМЫ ПЛАТЬЯ

Параметры драпируемости, полученные по новому методу SFM, связывают цифровой двойник ткани с цифровым двойником платья и формируют основу для прогнозирования формы платья и коррекции чертежей. В этой главе эта связь рассмотрена на примере базового платья BD и драпированного платья PLD.

5.1. Измеряемые объекты и система параметров

Прогнозирование формы платья и коррекция чертежей требуют построения непрерывной параметрической цепочки от пробы ткани к одежде. Короткая проба (shortsample, SS), длинная проба (longsample, LS), базовое платье (basicdress, BD) и драпированное платье со складками (pleateddress, PLD) как объекты исследования в этой главе соответствуют разным структурным масштабам и выполняют разные аналитические функции. Проба SS характеризует базовую драпировочную реакцию ткани в условиях плечевой опоры. Проба LS характеризует промежуточную драпировочную реакцию при переходе от локальной пробы к пробе, наиболее близкой по размерам к одежде. Платье BD имеет базовую форму, а платье PLD имеет сложную складчатую поверхность и предоставляет данные для анализа формообразования и драпируемости.

SS, LS и BD не являются объектами с одинаковой геометрической формой. Они представляют собой объекты из одной и той же ткани. SS служит для вычисления базового показателя драпируемости DC_{SFM} . LS получена путем увеличения длины и ширины на основе пробы SS и отражает переход драпировочной реакции от образца к более близкому к одежде масштабу. BD является объектом для извлечения параметров на уровне одежды, а его параметры $P_{dl}-P_{d4}$ отражают совместное влияние ткани, длины и ширины. Связи между коэффициентами драпируемости DC_{SFM} для проб SS и LS и параметрами формы платья BD характеризует возможность использования драпировочной реакции проб к уровню одежды.

На рис. 5.1 показаны объектные связи и основные измерительные позиции SS, LS и BD, используемые для сопоставления DC_{SFM} на уровне образцов с параметрами формы BD.



Рисунок 5.1 - Объекты исследования, используемые для разработки алгоритма прогнозирования формы платья: *a* - пять вариантов пробыSS, *b* - пять вариантов пробыLS, *c* - уровни измерения BD1–BD5 параметров P_{d1} – P_{d4} платьяBD

Как показано на рис. 5.1, SS1–SS5, LS1–LS5 и BD1–BD5 имеют пять соответствующих структурных уровней. Поперечные сечения BD1–BD5 позволяют наблюдать изменение расширения базового платья при переходе между уровнями. Параметры P_{d1} , P_{d2} , P_{d3} и P_{d4} описывают изменение формы BD соответственно через вертикальную длину, фронтальную проекционную ширину, боковой угол наклона и драпировочную реакцию на уровне платья. В исследовании приняты следующие обозначения:

- P_{d1} обозначает вертикальную длину платья BD от плечевой опорной точки до линии низа и характеризует продольное удлинение платья под действием силы тяжести;

- P_{d2} обозначает фронтальную проекционную ширину BD и характеризует поперечное расширение линии низа и общего силуэта;

- P_{d3} обозначает боковой угол наклона, образованный линией от подмышечной точки к краю низа и характеризует боковое распространение и изменение наклонного контура платья;

- P_{d4} обозначает коэффициент драпируемости на уровне BD и является безразмерным параметром, характеризующим общую драпировочную реакцию базового платья. В отличие от P_{d1} , P_{d2} и P_{d3} , P_{d4} не является отдельной линейной геометрической величиной, а рассчитывается на основе морфологии BD как показатель драпируемости на уровне одежды.

Таблица 5.1 показывает соответствие между объектами измерения, источниками параметров и аналитическими функциями, используемыми для прогнозирования формы платья и коррекции чертежей.

Таблица 5.1 - Система параметров для прогнозирования формы платья и коррекции чертежей

Аналитическая задача	Объект измерения	Уровень материала	Параметр	Способ получения	Аналитическая функция
Прогнозирование формы базового платья BD	SS	F1–F3, SS1–SS5	SS DC_{SFM}	Измерение и расчет методом SFM	Входная переменная для прогнозирования $P_{d1}–P_{d4}$
	LS	F1–F3, LS1–LS5	LS DC_{SFM}	Измерение и расчет методом SFM	Промежуточный параметр драпировочной реакции между SS и BD
	BD	F1–F3, BD1–BD5	$P_{d1}, P_{d2},$ P_{d3}, P_{d4}	Геометрическое измерение в Rhinoceros и расчет морфологии BD	Выходные переменные формы на уровне одежды
Валидация прогнозирования формы базового платья BD	VSS и VD	Валидационные образцы F1–F3	VSSDC $SFM,$ $VD P_{d1}–$ P_{d4}	Измерение методом SFM и геометрическое измерение	Проверка ошибки уравнений прогнозирования Pd
Коррекция чертежей драпированного платья PLD	PLD	F1–F3, PLDP1–PLDP5	$\Delta,$ $A_{overall},$ $A_{ROI1},$ A_{ROI2}	Расчет чертежа и градиционный анализ в ImageJ	Построение связи между величиной складок, драпировочной реакцией ткани и градиционной реакцией
Валидация коррекции драпированного платья PLD	Целевое физическое платье В и	Целевая ткань F4 и валидационная	$A_{overall},$ $A_{ROI1},$ $A_{ROI2},$	Градиционный анализ в ImageJ и	Проверка согласованности и градиционной

	валидационное платье V	я ткань F5	SSIM	анализ сходства изображений	реакции PLD после коррекции
--	------------------------	------------	------	-----------------------------	-----------------------------

Как показано в таблице 5.1, параметры сгруппированы по уровням объектов измерения. Такая структура формирует параметрическую цепочку «драпировочная реакция пробы — параметры формы базового платья — коррекция чертежа складчатого платья — валидация реакции одежды в градациях серого».

Для фиксации исходной матрицы данных, используемой при сопоставлении DC_{SFM} для пробы SS и параметров формы BD в таблице 5.2 показаны значения DC_{SFM} и $P_{d1}-P_{d4}$ для трех тканей на пяти уровнях BD.

Таблица 5.2 - Сопоставленная матрица данных SS DC_{SFM} и параметров формы BD $P_{d1}-P_{d4}$

Ткань	Уровень BD	Значение DC_{SFM} для пробы SS	Значения параметров P_d			
			P_{d1}	P_{d2}	P_{d3}	P_{d4}
F1	1	0.07	45.61	42.50	11.270	0.659
	2	0.15	65.95	49.21	10.570	0.568
	3	0.23	85.83	45.37	8.693	0.539
	4	0.38	105.94	48.94	6.790	0.435
	5	0.61	115.93	48.67	5.032	0.394
F2	1	0.10	45.93	35.94	5.932	0.590
	2	0.19	66.04	40.68	5.881	0.520
	3	0.28	86.36	41.73	4.754	0.430
	4	0.47	106.74	42.48	3.890	0.370
	5	0.67	116.83	43.04	3.607	0.350
F3	1	0.12	45.48	42.00	11.626	0.620
	2	0.20	65.87	49.77	10.710	0.580
	3	0.27	85.78	54.90	9.651	0.540
	4	0.46	105.89	56.22	8.841	0.450
	5	0.64	116.02	57.52	7.762	0.430

Как показано в таблице 5.2, матрица фиксирует соответствие между DC_{SFM} на уровне пробы SS и параметрами формы платья BD на уровне одежды. P_{d1} увеличивался с повышением уровня BD, что отражает рост вертикальной длины платья. P_{d2} , P_{d3} и P_{d4} одновременно зависят от драпируемости ткани, поперечного расширения и изменения бокового контура, поэтому связь DC_{SFM} с разными параметрами P_d требует отдельной

корреляционной оценки.

DC_{SFM} для длинной пробы LS характеризует промежуточную по масштабу драпировочную реакцию. Этот показатель используется для проверки того, сохраняется ли направленное изменение драпировочной реакции при переходе от короткой пробы к более длинной пробе. Таблица 5.3 показывает значения DC_{SFM} для пробы LS, среднее значение и CV для тканей F1–F3 на пяти уровнях LS1–LS5.

Таблица 5.3 - Изменение DC_{SFM} для пробы LS на пяти уровнях

Ткань	Значение $LSDC_{SFM}$						CV
	LS1	LS2	LS3	LS4	LS5	среднее	
F1	0.039	0.044	0.058	0.073	0.099	0.063	0.389
F2	0.132	0.131	0.148	0.161	0.171	0.149	0.116
F3	0.045	0.051	0.074	0.096	0.129	0.079	0.412

Как показано в таблице 5.3, $LSDC_{SFM}$ в целом увеличивался с повышением уровня LS. Среднее значение $LSDC_{SFM}$ для ткани F2 составило 0,149, что выше значений 0,063 для F1 и 0,079 для F3. Это указывает на более высокую драпировочную реакцию F2 для длинной пробы. Значения CV для F1 и F3 составили 0,389 и 0,412 соответственно, что выше значения 0,116 для F2. Следовательно, $LSDC_{SFM}$ для F1 и F3 был более чувствителен к изменению уровней длины и ширины, тогда как уровневая реакция F2 была более стабильной.

Матрица данных для прогнозирования формы базового платья BD включает три ткани и пять уровней. Выборка для корреляционного анализа составляет 15 наблюдений. Корреляции между $SSDC_{SFM}$, $LSDC_{SFM}$ и P_{d4} характеризуют непрерывность драпировочной реакции между SS, LS и BD. Наличие корреляции между $SSDC_{SFM}$ и параметрами P_{d1} , P_{d2} , P_{d3} и P_{d4} характеризуют возможность применения $SSDC_{SFM}$ как входного параметра для прогнозирования формы базового платья.

Регрессионные уравнения строили отдельно для каждой ткани. $SSDC_{SFM}$ служил входной переменной, а P_{d1} – P_{d4} — выходными переменными. Среднее значение входной переменной (\bar{x}) в уравнениях регрессии соответствует среднему измеренному значению $SSDC_{SFM}$ для конкретной ткани и конкретного уровня. Каждая тканеспецифическая регрессионная модель основана на пяти сопряженных уровнях данной ткани и характеризует способность $SSDC_{SFM}$ прогнозировать параметры формы BD.

Коррекция чертежей PLD основана на параметрах изображения в градациях серого, характеризующих реакцию формы складок. PLDP1–PLDP5 обозначают пять уровней величины складок. Положения складок в этих уровнях остаются неизменными, а величина складок последовательно увеличивается. Коэффициент складкообразования Δ (уравнение 2.1, Глава 2) служит параметром управления величиной складок на уровне чертежа. После

удаления фона, очистки границ, выделения области анализа и преобразования фронтального изображения PLD в 8-битное изображение в градациях серого в программе ImageJ выполняли пороговую сегментацию. Порог серого тона (T) задает границу выделения светлой области в пикселях: значения серого тона, равные T или превышающие T , определены как светлая область.

В программе ImageJ результат `percentagearea (%Area)` обозначает площадь выделенных пикселей в пределах заданной области анализа, измеренную в процентах. Этот показатель является исходным программным термином ImageJ. Для математического описания и последующего моделирования доля площади светлой области (A) в общей выделенной области использована была рассчитана по формуле:

$A_r = \frac{N_{b,r}}{N_r} \times 100\%$	(5.1)
--	-------

где A_r — доля площади светлой области в области r , %; $N_{b,r}$ — число пикселей светлой области в области r , для которых значение серого тона больше или равно порогу T ; N_r — общее число пикселей в области r ; r — индекс области анализа. При $r = \text{overall}$ показатель A_r соответствует A_{overall} , при $r = \text{ROI-1}$ — A_{ROI1} , а при $r = \text{ROI-2}$ — A_{ROI2} .

Для разных областей анализа были выбраны три показателя: A_{overall} , A_{ROI1} и A_{ROI2} . A_{overall} обозначает долю площади светлой области на фронтальном изображении платья и характеризует складчатую зону в градациях серого. A_{ROI1} обозначает долю площади светлой области в зоне интереса ROI-1, соответствующей первой верхней зоне концентрации плотных коротких складок вдоль шва. A_{ROI2} обозначает долю площади светлой области в зоне интереса ROI-2, соответствующей второй зоне диагонального распространения складок и характеризует изменения светлой области, вызванные диагональным распространением складок, локальным провисанием и боковой деформацией. A_{overall} использовали для построения общей модели прогнозирования коэффициента складчатости Δ , A_{ROI1} и A_{ROI2} — для оценки согласованности локальной реакции в градациях серого.

Целевое платье В и валидационное платье V использовали для проверки результата коррекции чертежа. Платье В задает целевую реакцию складкообразования в градациях серого, а платье V представляет форму, полученную из валидационной (контрольной) ткани после корректировки чертежа. Сравнение A_{overall} , A_{ROI1} и A_{ROI2} для платьев В и V позволяет оценить, позволяет ли скорректированный чертеж добиться желаемого эффекта складкообразования на валидационном платье.

Индекс структурного сходства (SSIM) использовали для сравнения структуры изображения платьев В и V в локальных областях. Поэтому параметры изображения в

градациях серого при анализе PLD не являются параметрами измерения цвета, а представляют собой морфологические показатели, сформированные гребнями складок, линиями сгиба, освещенными поверхностями и распределением теней.

Таким образом, разработанная система параметров связывала три аналитических уровня. На первом уровне параметры DC_{SFM} короткой SS и длинной LS проб и параметры P_d платья ВД использованы для поиска связей между драпируемостью пробы и формой базового платья. На втором уровне доли площади светлых областей $A_{overall}$, A_{ROI1} и A_{ROI2} характеризовали складчатость поверхности платья PLD в градациях серого при изменении величины складок. На третьем уровне драпируемость пробы ткани DC_{SFM} , $A_{overall,B}$ целевого платья В и прогнозируемое значение коэффициента складчатости Δ использовали для коррекции исходного чертежа PLD и получения желаемого эффекта на валидационном платье V.

5.2. Прогнозирование параметров формообразования базового платья

5.2.1. Связь драпируемости проб с параметрами формы базового платья

Поперечные профили базового платья использовали для изучения влияния уровня платья и типа ткани на расширение формы в горизонтальном направлении [173]. На рис. 5.2 показаны поперечные профили BD1–BD5 при использовании тканей F1–F3.

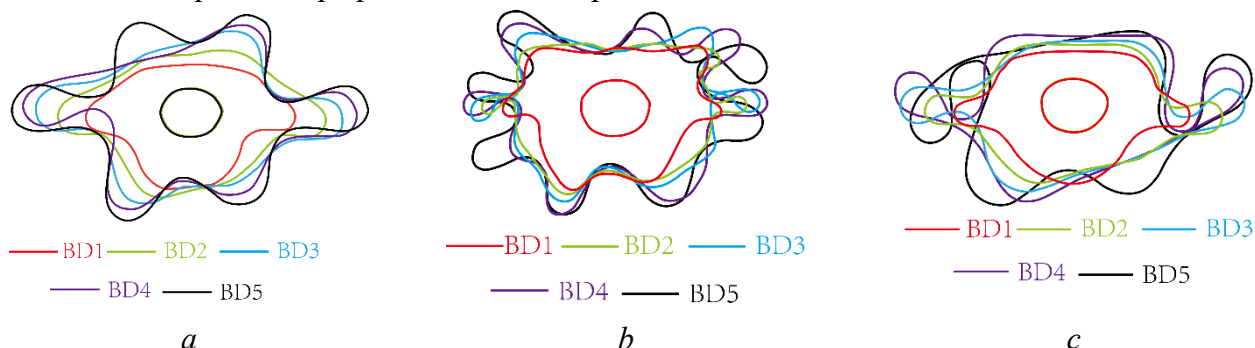


Рисунок 5.2 - Поперечные профили базового платья на уровнях BD1–BD5 при использовании разных тканей: *a* - F1, *b* - F2, *c* - F3

Как показано на рис. 5.2, поперечные профили платья из всех тканей расширились при переходе по мере приближения к низу платья, однако характер расширения различается между материалами. Для ткани F1 наблюдаются более заметные колебания ширины между уровнями, ткань F2 демонстрирует более компактное поперечное расширение, а ткань F3 показывает более выраженное боковое расширение внизу. Следовательно, с увеличением длины платья происходит фронтальное и боковое расширения.

Связь между DC_{SFM} для проб SS и LS, с одной стороны, и P_d , с другой стороны, характеризует изменение драпируемости от короткой пробы к длинной и к уровню базового

платья. Таблица 5.4 показывает коэффициенты корреляции между $SSDC_{SFM}$, $LSDC_{SFM}$ и P_{d4} .

Таблица 5.4– Коэффициенты корреляции между DC_{SFM} и P_{d4}

Показатель	$SS DC_{SFM}$	$LS DC_{SFM}$	P_{d4}
$SS DC_{SFM}$	1		
$LS DC_{SFM}$	0.946**	1	
P_{d4}	0.880**	0.939**	1

Примечание: $n = 15$; ** означает $p < 0,01$.

Как показано в таблице 5.4, $SSDC_{SFM}$ имеет значимую положительную корреляцию с $LSDC_{SFM}$, а $LSDC_{SFM}$ — с P_{d4} . Корреляция между $SSDC_{SFM}$ и P_{d4} также значима и положительна. Эти результаты показывают, что драпируемость короткой пробы SS имеет тесную связь с драпируемостью длинной пробы LS и драпируемостью платья BD. Следовательно, такой вывод закладывает основу для прогнозирования формы платьев, используя результаты лабораторных испытаний.

Применимость входной переменной $SSDC_{SFM}$ для прогнозирования всех параметров P_{d1} – P_{d4} формы платья оценивали методом корреляционного анализа. Таблица 5.5 показывает значения коэффициентов корреляции между $SSDC_{SFM}$ и P_{d1} – P_{d4} .

Таблица 5.5– Коэффициенты корреляции между показателями короткой пробы $SS DC_{SFM}$ и параметрами базового платья BD

Показатель	$SS DC_{SFM}$	P_{d1}	P_{d2}	P_{d3}	P_{d4}
$SS DC_{SFM}$	1				
P_{d1}	-0.834**	1			
P_{d2}	-0.563*	0.779*	1		
P_{d3}	0.818**	-0.992**	-0.799**	1	
P_{d4}	0.880**	-0.946**	-0.697**	0.942**	1

Примечание: $n = 15$; * означает $p < 0,05$, а ** означает $p < 0,01$.

Как показано в таблице 5.5, $SSDC_{SFM}$ имеет статистически значимые связи со всеми четырьмя параметрами формы BD. Наиболее сильная связь наблюдается с P_{d4} , что указывает на способность короткой пробы отражать изменение драпируемости на любом уровне платья. $SSDC_{SFM}$ также имел значимые отрицательные связи с P_{d1} и P_{d2} и положительную связь с P_{d3} . Это показывает, что изменение формы BD определяется не только драпировочной способностью ткани, но и уровнем платья, фронтальной шириной, боковым распространением и изменением поперечного профиля. Следовательно, $SSDC_{SFM}$ лучше объясняет P_{d1} , P_{d3} и P_{d4} , тогда как P_{d2} имеет более сложную зависимость от ширины платья и тканевой реакции.

5.2.2 Модель прогнозирования и валидация параметров формообразования базового платья

Регрессионные уравнения строили отдельно для каждой ткани. $SSDC_{SFM}$ служил входной переменной, а $P_{d1}-P_{d4}$ — выходными переменными. Среднее значение входной переменной (\bar{x}) в уравнениях регрессии соответствует среднему измеренному значению $SSDC_{SFM}$ для конкретной ткани и конкретного уровня, а не общему среднему значению, полученному объединением пяти уровней одной ткани. Для тканей F1, F2 и F3 были построены тканеспецифические регрессионные уравнения. Ниже представлены уравнения для прогнозирования параметров формы базового платья BD:

$\overline{P_{d1F1}} = -342 \bar{x}_1 + 292$	$R^2 = 0.980$	(5.2)
$\overline{P_{d2F1}} = -27 \bar{x}_1 + 65$	$R^2 = 0.821$	(5.3)
$\overline{P_{d3F1}} = 34 \bar{x}_1 - 18$	$R^2 = 0.986$	(5.4)
$\overline{P_{d4F1}} = 1.16 \bar{x}_1 - 0.2$	$R^2 = 0.999$	(5.5)
$\overline{P_{d1F2}} = -204 \bar{x}_2 + 179$	$R^2 = 0.979$	(5.6)
$\overline{P_{d2F2}} = -17 \bar{x}_2 + 50$	$R^2 = 0.773$	(5.7)
$\overline{P_{d3F2}} = 12 \bar{x}_2 - 0.7$	$R^2 = 0.916$	(5.8)
$\overline{P_{d4F2}} = 0.6 \bar{x}_2 + 0.2$	$R^2 = 0.906$	(5.9)
$\overline{P_{d1F3}} = -293 \bar{x}_3 + 251$	$R^2 = 0.926$	(5.10)
$\overline{P_{d2F3}} = -54 \bar{x}_3 + 83$	$R^2 = 0.685$	(5.11)
$\overline{P_{d3F3}} = 21 \bar{x}_3 - 2$	$R^2 = 0.989$	(5.12)
$\overline{P_{d4F3}} = 1.2 \bar{x}_3 - 0.1$	$R^2 = 0.823$	(5.13)

Проверка уравнений (5.2-5.13) была выполнена следующим образом. Средние значения DC_{SFM} для виртуальной короткой пробы VSS были подставлены в уравнения, а полученные значения были сравнены со значениями $P_{d1}-P_{d4}$ для виртуального базового платья VD. На рис. 5.3 показаны гистограммы для теоретических и фактических значений.

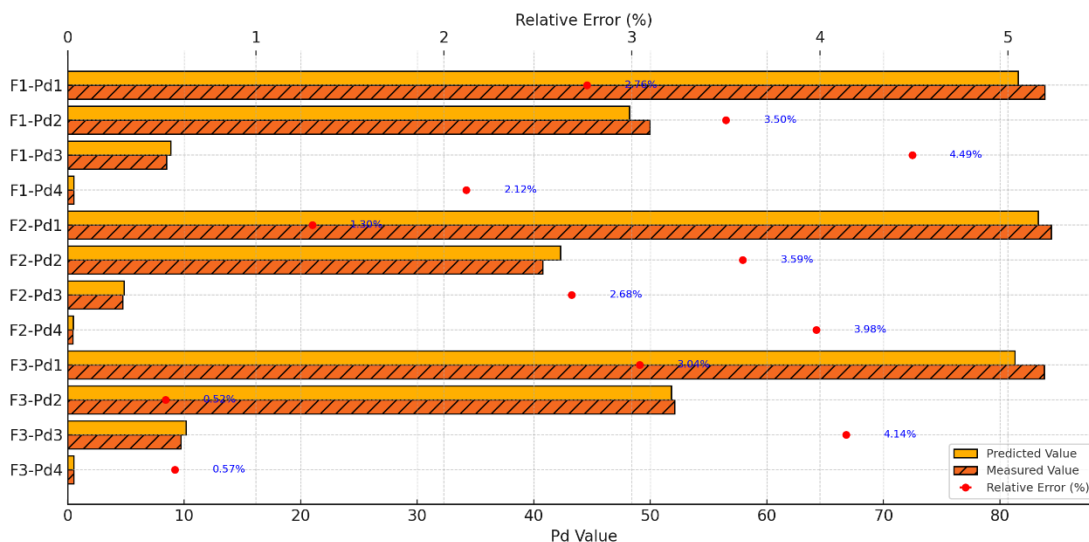


Рисунок 5.3 - Сравнение ошибок прогнозирования параметров формы виртуального базового платья VD

Как показано на рис. 5.3, прогнозируемые и измеренные значения P_{d1} – P_{d4} для тканей F1–F3 были близкими, а относительные ошибки были ниже 5%. Наибольшая ошибка наблюдалась для показателя P_{d3} у ткани F1 и составила 4,49%. Столь низкая ошибка подтверждает адекватность полученных уравнений.

Таким образом, коэффициент драпируемости короткой пробы $SSDC_{SFM}$ может использоваться как входной показатель для прогнозирования параметров формы базового платья BD. Следовательно, тканеспецифические регрессионные уравнения на основе $SSDC_{SFM}$ пригодны для прогнозирования параметров формообразования BD и могут служить основой для дальнейшей коррекции лекал [171].

5.3. Исследование драпируемости платьев

5.3.1. Выбор светлой области для анализа складок

Формообразование складок на поверхности платья в градациях серого использовали для количественного описания видимых морфологических изменений, возникающих после выполнения приемов конструктивного моделирования[175]. В соответствии с системой параметров, установленной в разделе 5.1, **показатель A характеризует долю пикселей, выделенных после пороговой сегментации в заданной области анализа.** Этот показатель не описывает цвет ткани напрямую, а отражает интенсивность визуальной реакции на площадь, занятой складками.

На изображениях драпированного платья PLD светлые и темные области несут разную визуальную информацию о складках. Светлые области в основном связаны с гребнями складок, линиями сгиба и освещенными участками. Темные области преимущественно соответствуют впадинам складок, их локальным перекрытиям, в которых происходит

накопление теней. Поскольку ткани F1–F3 различаются по цвету, фактуре и светопрозрачности, темные области могут дополнительно зависеть от фона черного манекена, на котором фотографировали платья. Поэтому темные и светлые области в пределах общей области расположения складок были сопоставлены для выбора основного объекта извлечения показателя A . На рис. 5.4 показаны темные и светлые кандидатные области, сформированные на платьях из тканей F1–F3 при одинаковых условиях анализа.

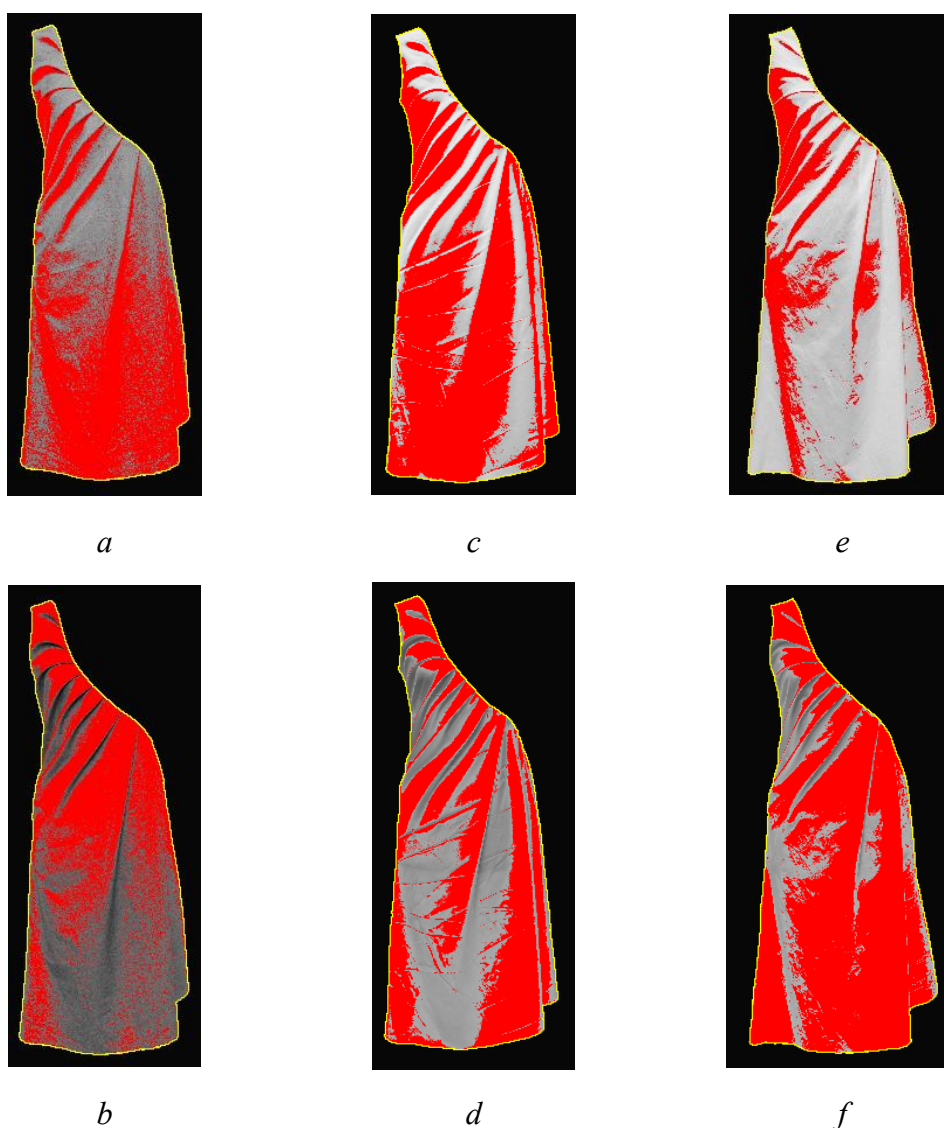


Рисунок 5.4 - Кандидатные области для исследования: *a* - темная F1, *b* - светлая F1, *c* - темная F2, *d* - светлая F2, *e* - темная F3, *f* - светлая F3. Красный цвет обозначает пиксели, выделенные как кандидатная область реакции складок после пороговой сегментации.

Как показано на рис. 5.4, темные кандидатные области в основном распределены в зонах впадин складок, теней и локального перекрытия, их границы зависят от глубины тени, светопрозрачности ткани и фона черного манекена. В светлых или локально более тонких

участках низкие значения градации серого могут включать фоновое влияние, не связанное со структурой складок. Светлые кандидатные области, напротив, располагаются преимущественно вдоль гребней складок и линий сгиба и у трех тканей формируют более непрерывную высокую реакцию в градациях серого. Это показывает, что светлая область более непосредственно соответствует видимой форме, создаваемой складками поверхности ткани.

Стабильность темных и светлых кандидатных областей оценивали по A , CV , среднему нормированному значению серого тона и среднему внутригрупповому CV градаций серого. Таблица 5.6 показывает количественные показатели, использованные для выбора более стабильной области реакции складок - темной или светлой.

Таблица 5.6 - Сравнение стабильности кандидатных областей реакции

Кандидатная область	A , %, для тканей			Межтканевый CV для A	Средне нормированное значение серого	Средний внутригрупповой CV градаций серого
	F1	F2	F3			
Темная	7,48	14,61	10,03	0,337	0,114	1,080
Светлая	21,76	15,14	19,03	0,179	0,874	0,127

Как показано в таблице 5.6, межтканевой CV для A темной кандидатной области составил 0,337, что выше значения 0,179 для светлой кандидатной области, что указывает на более сильную зависимость площади темной области от драпировочной способности тканей. Средний внутригрупповой CV градаций серого темной области составил 1,080, что значительно выше значения 0,127 для светлой области. Следовательно, распределение серого тона внутри темной области было менее стабильным. Светлая кандидатная область имела более высокое среднее нормированное значение серого тона, равное 0,874, и более низкие внутренние колебания серого тона. Этот результат согласуется с визуальным наблюдением на рис. 5.4, что послужило основанием для выбора **светлой области** в качестве основного объекта для анализа складок на драпированном платье PLD. Поэтому для анализа реакции складок использовали показатели A , извлеченные из светлых областей. Для общей области, на которой расположены складки, применяли $A_{overall}$, а для локальных областей — A_{ROI1} и A_{ROI2} . Такой выбор локальных областей устраняет влияние фоновых теней и светопроницаемости ткани и позволяет связать показатель площади светлой области с видимой морфологией складок.

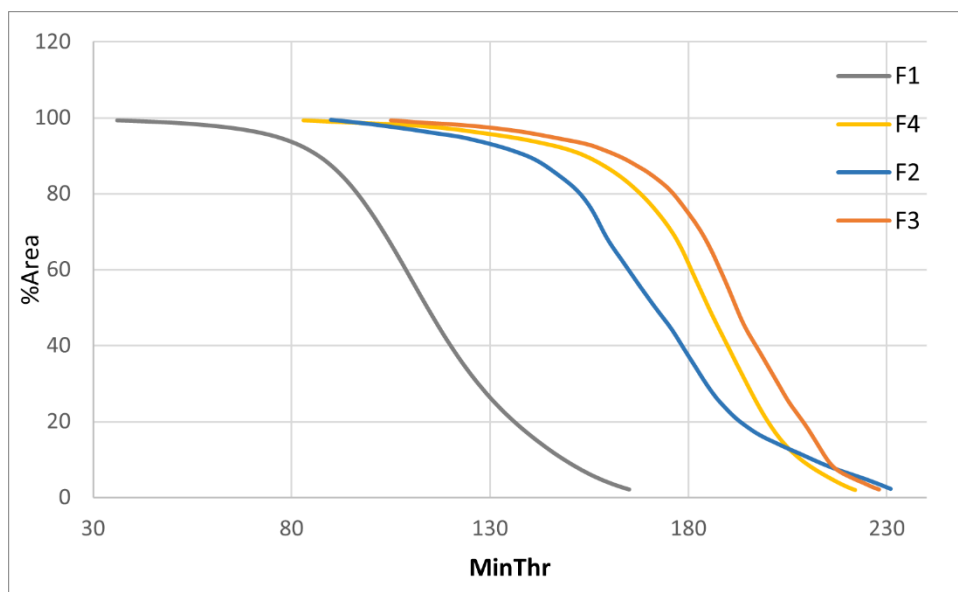
5.3.2 Изменение площади светлой области при увеличении величины складок

Значение показателя A зависит от выбранного порога серого тона T . Ткани F1–F4 (ткань F4 использовали для изготовления драпированного платья) различаются по глубине цвета, отражательной способности поверхности, яркости фактуры и распределению теней, поэтому установление для них единого фиксированного порога может привести к неоправданному чрезмерному расширению или сужению светлой области. Пороговое сканирование позволяет определить эффективный диапазон извлечения светлой реакции, а порог Оцу [165] использовали как объективное опорное значение.

Кривые порогового сканирования применяли для выбора тканеспецифических порогов, позволяющих сохранить сопоставимость A между тканями с разной визуальной яркостью. На рис. 5.5 показаны изображения платья, последовательно иллюстрирующие изменение A при повышении порога серого тона T на примере ткани F1, и зависимости A от T для тканей F1–F4.



а

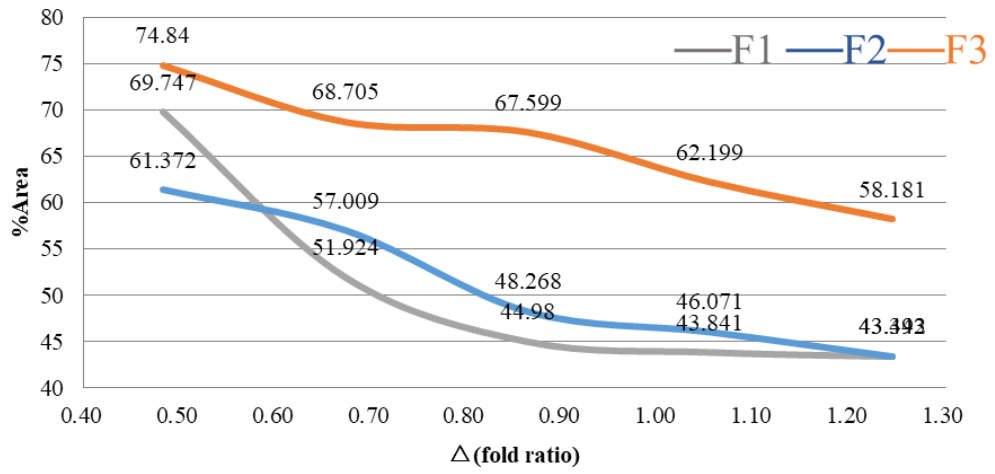


б

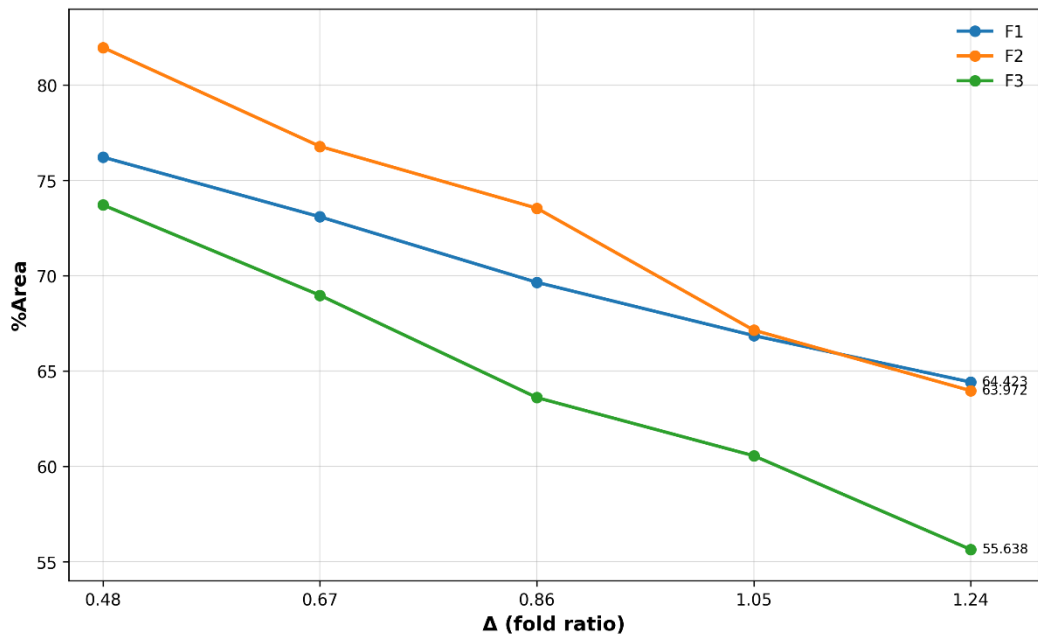
Рисунок 5.5 - Изменение внешнего вида платья из ткани F1 при повышении порога серого цвета (а) и кривые уменьшения площади светлой области A при изменении порога $MinThrT$ (б)

Как показано на рис. 5.5, для всех тканей площадь A уменьшается с повышением порога T , однако эффективные диапазоны реакции заметно различаются между тканями. Кривая для темной ткани F1 расположена в более низком диапазоне порогов $MinThr$, что показывает необходимость более низкого порога для темной ткани, чтобы сохранить светлые области, образованные гребнями складок и линиями сгиба. Кривые для тканей F2, F3 и F4 располагаются в более высоком диапазоне порогов, что указывает на распределение светлой реакции светлых тканей в более высоких серых уровнях. На основе диапазонов реакции кривых для тканей F1, F2, F3 и F4 значения порогов были определены как 112, 174, 191 и 180 соответственно. Тканеспецифические пороги снизили влияние различий в цвете тканей и отражения на выделение светлой области, поэтому значения A , полученные для разных тканей, стали более пригодными для анализа складок.

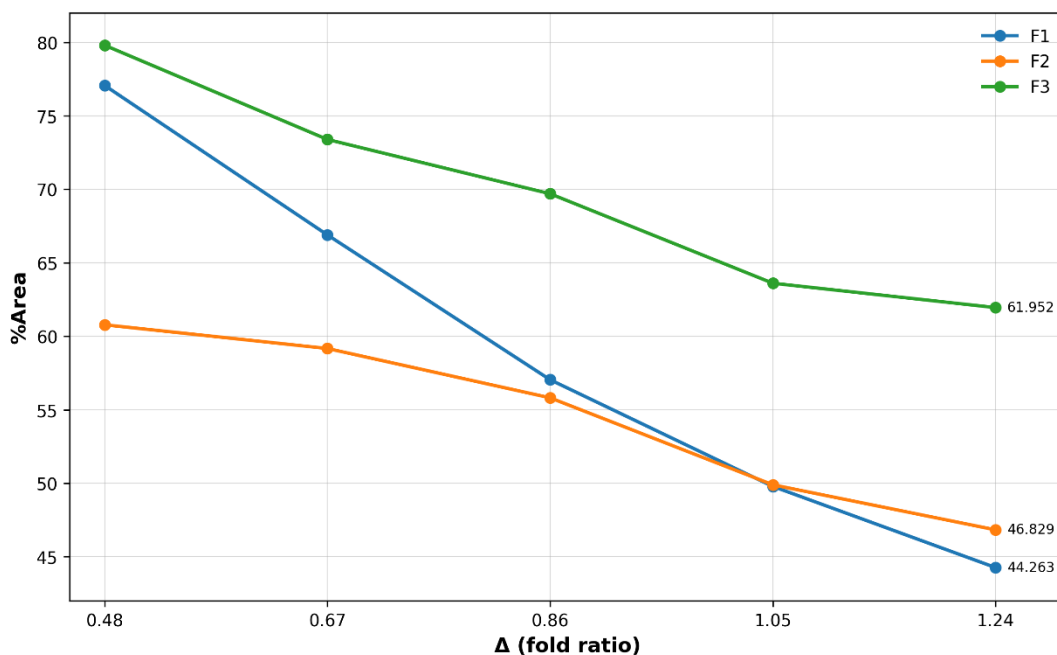
Коэффициент складкообразования Δ для платьев PLDP1–PLDP5 увеличивался от 0,48 до 1,24 (Таблица 2.4), что соответствовало постепенному увеличению величины складок при фиксированных положениях складок. Поскольку положения складок в платьях PLDP1–PLDP5 оставались неизменными, то изменение Δ использовали для анализа влияния увеличения складчатости на реакцию в градациях серого. На рис. 5.6 показаны тенденции изменения $A_{overall}$, A_{ROI1} и A_{ROI2} при увеличении Δ .



a



b



c

Рисунок 5.6 - Изменение площади светлой области A при увеличении Δ : a -

$A_{overall}$, b - A_{ROI1} , c - A_{ROI2}

Как показано на рис. 5.6, при увеличении Δ от 0,48 до 1,24 значения $A_{overall}$, A_{ROI1} и A_{ROI2} в целом уменьшались. Это изменение показывает, что с увеличением глубины складок их гребней, линии сгиба и освещенные поверхности сжимаются, а исходные светлые участки замещаются более плотной складчатой структурой. $A_{overall}$ отражает общее сокращение светлой области в основной зоне складок; A_{ROI1} отражает локальную уровневую реакцию в верхней зоне концентрации складок; A_{ROI2} отражает чувствительность в области диагонального распространения складок к локальной деформации и различиям между тканями.

В общей области складок наиболее сильное сокращение светлой области наблюдалось у ткани F2: $A_{overall}$ уменьшилось с 69,747% до 43,443%, то есть на 26,304 п.п.; для ткани F1 - с 61,372% до 43,392%, что соответствует снижению на 17,980 п.п.; для F3 — с 74,840% до 58,181%, то есть на 16,659 п.п. Эти данные показывают, что $A_{overall}$ отражает суммарное сокращение светлой области в основной зоне складок.

A_{ROI} показало близкие величины для F2 и F3, что указывает на относительно устойчивую уровневую реакцию в верхней зоне концентрации складок при увеличении складчатости. Для A_{ROI2} различия между тканями были более выраженными: для F1 снижение достигло 32,799 п.п., для F2, 13,950 п.п., для F3, 17,846 п.п. Следовательно, область диагонального распространения складок была более чувствительна к локальной деформации, различиям драпируемости ткани и способности сохранять светлую область.

Результаты $A_{overall}$, A_{ROI1} и A_{ROI2} совместно показывают, что площадь светлой области может отражать изменение формы складок на платье PLD на общем и локальном уровнях.

5.4. Коррекция чертежей складчатого платья на основе реакции в градациях серого и коэффициента драпируемости ткани

Полная матрица данных, основанная на 15 наблюдениях, сформированных тканями F1–F3 на пяти уровнях PLDP1–PLDP5, приведена в ПРИЛОЖЕНИИ В. Ткани F4 и F5 не использовали в матрице, а применяли только для корректировки валидационного чертежа и последующей проверки. В модели для прогнозирования коэффициента складкообразования Δ использовали DC_{SFM} ткани и $A_{overall}$ в качестве входных переменных, ее уравнение имеет вид

$$\Delta = 1.4934 + 1.2866DC_{SFM} - 0.0230A_{overall} \quad (5.14)$$

где Δ — прогнозируемый коэффициент складкообразования; DC_{SFM} — коэффициент драпируемости ткани, измеренный методом SFM; $A_{overall}$ — доля площади светлой области в общей области складок, %.

В (5.14) коэффициент при $A_{overall}$ имеет отрицательное значение, что означает увеличение прогнозируемого значения Δ при уменьшении доли общей светлой области, что соответствует тенденции, выявленной в разделе 5.3.2, когда площадь светлой области A уменьшалась при увеличении величины складок. Коэффициент при DC_{SFM} имеет положительное значение, что показывает на увеличение прогнозируемого значения Δ при увеличении DC_{SFM} ткани.

Локальные модели разработаны для проверки сохранения связи между реакцией в градациях серого и коэффициентом Δ в разных структурных зонах расположения складок. A_{ROI1} обозначает долю площади светлой области в ROI-1, а A_{ROI2} обозначает долю площади светлой области в ROI-2. Таблица 5.7 показывает коэффициенты регрессии, показатели аппроксимации и уровень ошибки для двух локальных моделей прогнозирования Δ .

Таблица 5.7 - Результаты регрессии локальных моделей прогнозирования Δ

Зона	Свободный член	Коэффициент при DC	Коэф. A	R ²	Adj. R ²	RMSE
ROI-1	4,5908	-1,4505	-0,0436	0,918	0,904	0,086
ROI-2	1,6988	1,6867	-0,0275	0,796	0,763	0,136

Примечание: RMSE — среднеквадратическая ошибка. ; коэффициент при A в модели ROI-1 соответствует A_{ROI1} , а в модели ROI-2 — A_{ROI2} ; для обеих моделей $p < 0,001$.

Локальная модель для ROI-1 описывается уравнением

$$\Delta = 4.5908 - 1.4505DC_{SFM} - 0.0436A_{ROI1} \quad (5.15)$$

где A_{ROI1} — доля площади светлой области в ROI-1, %;

локальная модель для ROI-2 имеет вид

$$\Delta = 1.6988 + 1.6867DC_{SFM} - 0.0275A_{ROI2} \quad (5.16)$$

где A_{ROI2} — доля площади светлой области в ROI-2, %.

В уравнениях (5.15) и (5.16) коэффициенты при A_{ROI1} и A_{ROI2} имеют отрицательные значения, что означает увеличение прогнозируемого значения Δ при уменьшении локальной доли светлой области. Абсолютное значение коэффициента при A в ROI-1 больше, чем в ROI-2, что показывает более высокую чувствительность показателя Δ к изменению светлой области в верхней зоне концентрации складок. Разные знаки коэффициентов при DC_{SFM} в двух локальных моделях указывают на неодинаковую роль драпируемости тканей в разных локальных структурных зонах.

Полученные уравнения использовали для построения чертежей по следующему алгоритму.

1. Целевое платье В было изготовлено из светлой ткани F4 для определения всех показателей в трех зонах, изменяющихся под влиянием коэффициента складчатости Δ .

2. Для ткани F4 был вычислен коэффициент драпируемости DC_{SFM} .

3. На изображении целевого платья В был изменен $A_{overall,B} = 54,76\%$.

4. Для валидационного платья V была выбрана ткань F5 с коэффициентом драпируемости $DC_{SFM} = 0,46$.

5. Исходные данные для конструктивного моделирования чертежа для валидационного платья V рассчитывали по $A_{overall,B}$ целевого платья В и коэффициента драпируемости DC_{SFM} для ткани F5. После подстановки этих двух значений в уравнение (5.14) был получен коэффициент складкообразования Δ , необходимый для модифицирования (конического разведения) чертежа

$$\Delta = 1.4934 + 1.2866 \times 0.46 - 0.0230 \times 54.76 = 0.826 \approx 0.83$$

6. Необходимое значение $\Delta = 0,83$ находится между было ближе к PLDP3. Это показывает, что для приближения общей светлой реакции к целевому платью В, изготовленного из ткани F4, валидационный чертеж платья V для ткани F5 должен использовать уровень величины складок, близкий к третьему уровню. Поскольку прогнозируемое значение не совпадает полностью с существующими уровнями PLD, то величины складок P_1-P_{10} рассчитывали методом интерполяции между соседними уровнями.

Поскольку координаты складок P_1-P_{10} в чертеже PLD являются постоянными, то при конструктивном моделировании чертежа изменяли только величину складки в каждой фиксированной позиции. Для прогнозируемого Δ , расположенного между соседними

уровнями, величину складки в i -й позиции рассчитывали по уравнению (5.17)

$$P_i(\Delta) = P_{i,k} + \frac{\Delta - \Delta_k}{\Delta_{k+1} - \Delta_k} (P_{i,k+1} - P_{i,k}) \quad (5.17)$$

где $P_i(\Delta)$ — величина складки в i -й позиции при прогнозируемом Δ ; $P_{i,k}$ и $P_{i,k+1}$ — величины складки в i -й позиции на двух соседних уровнях PLD; Δ_k и Δ_{k+1} — коэффициенты складкообразования для двух соседних уровней PLD; $i = 1, 2, \dots, 10$.

Скорректированные значения P_1 – P_{10} были получены методом линейной интерполяции между PLDP2 и PLDP3. От PLDP2 к PLDP3 величина складки в каждой позиции увеличивается на 1 см, поэтому интерполированные значения в целом близки к PLDP3, но немного ниже PLDP3. В таблице 5.8 представлены результаты коррекции чертежа для валидационного платья V из ткани F5.

Таблица 5.8 - Параметры складок для валидационного чертежа платья V из ткани F5

Валидационная ткань	Δ	Скорректированная величина складки, см									
		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}
F5	0.83	3.5	4.0	4.4	3.5	3.1	3.5	5.3	7.2	6.1	3.1

Скорректированные значения P_1 – P_{10} находятся в диапазоне от 3,1 до 7,2 см. Более крупные величины складок были сосредоточены в P_7 – P_9 : P_8 составило 7,2 см, P_9 — 6,1 см, а P_7 — 5,3 см. Это показывает, что зона диагонального распространения складок остается областью с большей величиной раскрытия лекала. Значения P_1 – P_6 были сравнительно меньшими и главным образом поддерживали локальные линии сгиба и структуру гребней складок в верхней зоне концентрации складок.

7. Корректировали чертеж с сохранением исходного основного контура PLD, фиксированные положения складок и направление раскрытия складок, изменяя только величину каждой фиксированной складки на основе прогнозируемого Δ (как показано на рис.2.3).

Таким образом, общая реакция в градациях серого целевого платья F4 и коэффициент драпируемости ткани F5 были преобразованы в параметры чертежа, непосредственно используемого для изготовления валидационного платья V из ткани F5.

5.5. Валидация результата коррекции чертежа складчатого платья

Целевое платье В и валидационное платье V использовали для проверки морфологического соответствия после коррекции чертежа.

Валидацию проводили на трех уровнях. Первый уровень был основан на сравнении

силуэтов. Второй уровень был основан на сравнении эквивалентных порогов и характеризовал близость реакции площади светлой области в общей области складок, ROI-1 и ROI-2. Третий уровень был основан на индексе структурного сходства (structural similarity index measure, SSIM) и характеризовал локальную структуру изображения в градациях серого в зонах ROI-1 и ROI-2. На рис. 5.7 показаны целевое платье В, валидационное платье V и результат наложения силуэтов после выравнивания по центру, чтобы определить область общего совпадения и локальные зоны отклонения границ.

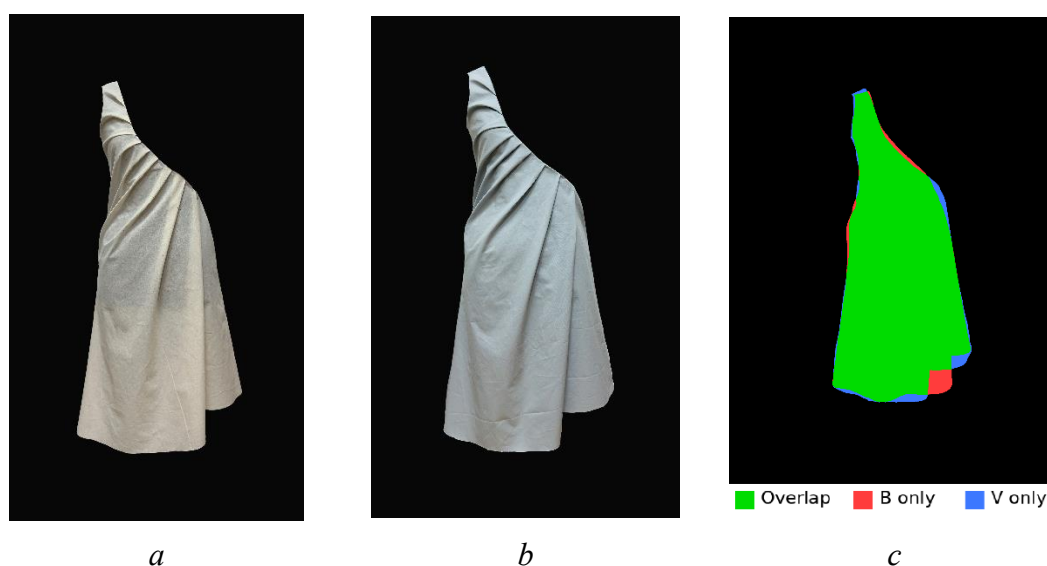


Рисунок 5.7 - Сравнение силуэтов целевого В и валидационного V платьев: *a* - целевое платье В, *b* - валидационное платье V, *c* - результат совмещения силуэтов после выравнивания по центру

Как показано на рис. 5.7, основные области контуров платьев В и V имеют большую зону совпадения. Различия в основном сосредоточены в верхней области плеча, по правому внешнему контуру, вдоль линии низа и около локальной границы раскрытия складок. Такое распределение показывает близость силуэтов, однако свободный низ, краевое провисание и локальное раскрытие складок все еще вызывают граничные отклонения. Несовпадающие области в основном расположены вдоль внешнего контура и локальных свободных границ, а не в основной зоне платья.

Степень перекрытия бинарных силуэтов, различие площади и отклонение границы использовали для количественной оценки согласованности силуэтов. Таблица 5.9 показывает показатели согласованности фронтальных силуэтов.

Таблица 5.9 - Показатели согласованности фронтальных силуэтов

Вид	IoU	Dice	Различие площади, %	Отклонение границы, px		
				Среднее	95-й	Максимальное

					процентиль	
Фронтальный	0.9336	0.9657	+0.656	10.064	36.024	97.739

Как показано в таблице 5.9, IoU между В и V во фронтальном виде составил 0,9336, а Dice — 0,9657, что указывает на высокую степень перекрытия областей. Фронтальная проекционная площадь валидационного платя близка к площади целевого платя. Среднее отклонение границы составило 10,064 px, что указывает на небольшой пространственный сдвиг большинства граничных точек. Значение 95-го перцентиля отклонения границы составило 36,024 px, то есть большая часть граничных отклонений сохранялась в относительно низком диапазоне. Максимальное отклонение границы составило 97,739 px и соответствовало локальным несовпадающим областям в зоне плеча, правого внешнего контура и низа, показанным на рис. 5.7. Результаты анализа силуэта показывают, что валидационное платя V из ткани F5 близко к целевому платю В из ткани F4 на уровне основной общей формы, а остаточные различия в основном выражены как локальные смещения края.

Согласованность силуэта отражает только близость общего внешнего контура и не показывает, насколько близка реакция площади светлой области в складках. Сравнение эквивалентной реакции в градациях серого дополнительно использовали для оценки того, формируют ли платя В и V близкую реакцию светлой области в общей области складок, ROI-1 и ROI-2. Полные данные порогового сопоставления приведены в ПРИЛОЖЕНИИ В. Таблица 5.10 показывает различия эквивалентной реакции в трех областях.

Таблица 5.10 - Результаты валидации эквивалентной реакции в градациях серого

Анализируемая область	Различия реакции, п.п.			
	Диапазон	Среднее	Минимальное	Максимальное
Общая	0,021–0,619	0,232	0,021	0,619
ROI-1	0,015–0,314	0,192	0,015	0,314
ROI-2	0,086–0,643	0,417	0,086	0,643

Как показано в таблице 5.10, во всех трех областях была получена интерпретируемая связь эквивалентной реакции в градациях серого, однако уровень согласованности различался по областям. Среднее различие реакции в общей области складок составило 0,232 п.п., что показывает схожесть платя В и V в основной зоне складок. Реакция площади светлой области в верхней зоне ROI-1 концентрации складок была наиболее стабильной. Среднее различие реакции в ROI-2 составило 0,417 п.п., что выше значений общей области складок и ROI-1. Следовательно, зона диагонального распространения складок более чувствительна к провисанию ткани, боковому раскрытию и локальной границе линий сгиба. Результаты эквивалентной реакции показывают, что прогнозируемые величины складок

P_1-P_{10} позволяют платью V приблизиться к общей реакции площади светлой области и верхней локальной реакции платья B .

На рис. 5.8 показаны фрагменты изображения в градациях серого платьев B и V в ROI-1 и ROI-2.

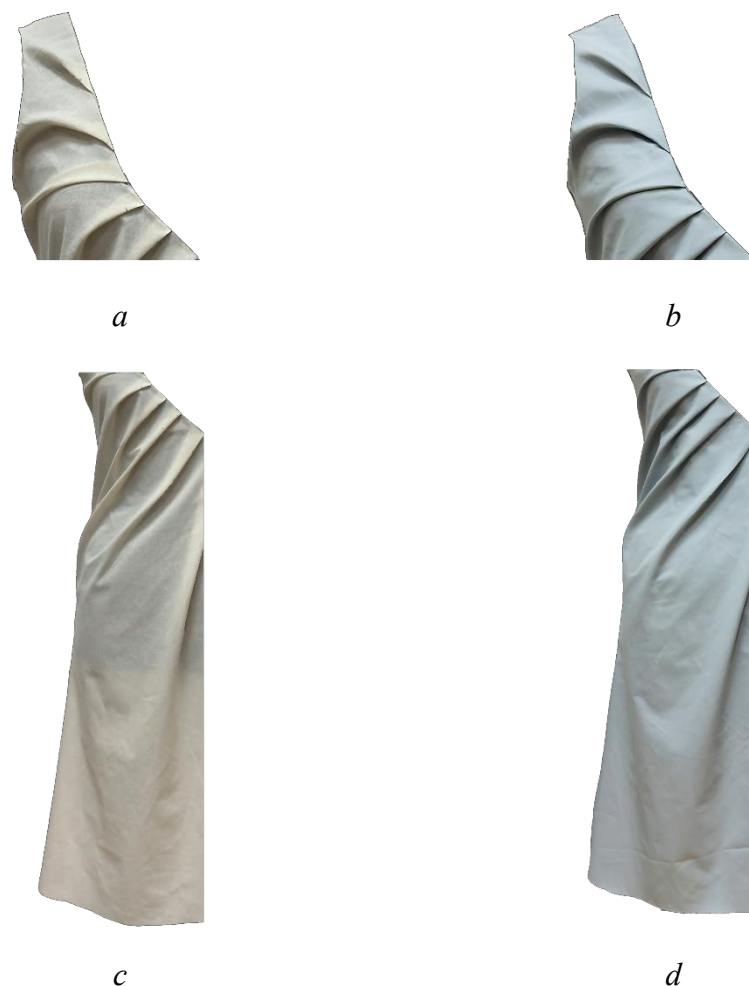


Рисунок 5.8 - Сравнение локальной структуры: a - ROI-1 для платья B , b - ROI-1 для платья V , c - ROI-2 для платья B , d - ROI-2 для платья V

Как показано на рис. 5.8, платья B и V в зоне ROI-1 имеют близкое направление складок, границы линий сгиба и характер перехода между светлыми и темными участками. Оба изображения показывают близкую складчатую форму, концентрирующуюся от плечевой области к области груди, а основные гребни складок и локальные границы светлых зон имеют хорошее соответствие. В ROI-2 платья B и V сохраняют сходное диагональное направление распространения, однако локальные границы линий сгиба, серый градиент и текстура мелких морщин различаются сильнее.

Локальное структурное сходство дополнительно количественно оценивали с помощью SSIM и его компонентов яркости, контраста и структуры. Таблица 5.11 показывает

результаты декомпозиции SSIM для платьев В и V в зонах ROI-1 и ROI-2.

Таблица 5.11 - Результаты проверки локального структурного сходства

Область	Сходствояркости	Сходствоконтраста	Структурноесходство	SSIM
ROI-1	0,9591	0,9062	0,8382	0,7690
ROI-2	0,9210	0,8674	0,7232	0,6096

Как показано в таблице 5.11, SSIM в ROI-1 составил 0,7690, что выше значения 0,6096 в ROI-2. Это показывает, что локальная структура изображения в градациях серого верхней зоны концентрации складок была более близкой. Платья В и V в зоне ROI-1 были близки не только по общему уровню серого тона, но и по амплитуде локальных светло-темных переходов и организации складчатой структуры. В зоне ROI-2 отличия в основном связаны с локальной текстурой складок, расположением линий сгиба и организацией структуры изображения в градациях серого.

Таким образом, совпадение силуэтов, эквивалентная реакция в градациях серого и локальный SSIM совместно показывают, что валидационное платье V из ткани F5 близко к целевому платью В из ткани F4 по силуэту, реакции площади светлой области в основной и локальной ROI-1 зонах. Различия в основном сосредоточены в зоне ROI-2 и на локальных внешних границах, что показывает более высокую чувствительность зоны диагонального распространения складок, свободного нижнего среза и боковых границ к различиям ткани. Прогнозируемые величины складок, полученные на основе нового коэффициента драпируемости DC_{SFM} , подтверждают применимость расчетной схемы коррекции чертежа.

Выводы по главе 5

1. Разработана система унифицированных параметров лабораторных проб (SS и LS) и двух видов платьев (BD и PLD), позволившая связать новый коэффициент драпируемости с параметрами формы платья и схемой конструктивного моделирования чертежа. Коэффициент драпируемости DC_{SFM} , измеренный на разработанном антропоморфном стенде для короткой пробы SS, характеризует базовую драпируемость, а параметры $P_{d1}-P_{d4}$ описывают форму платья. Показатели светлой площади $A_{overall}$, A_{ROI1} и A_{ROI2} характеризуют реакцию складок в градациях серого. Такая параметрическая цепочка обеспечивает переход от измерения ткани к прогнозированию драпированной формы платья.

2. Тканеспецифические регрессионные уравнения на основе нового коэффициента драпируемости DC_{SFM} позволяют прогнозировать параметров формы платьев с ошибкой ниже 5%. Это подтверждает применимость нового коэффициента драпируемости DC_{SFM} как важнейшего входного параметра и показывает возможность его использования на уровне платья.

3. Для анализа драпируемости платьев была выбрана светлая область как основной объект реакции в градациях серого. По сравнению с темной кандидатной областью она показала более низкий межтканевой коэффициент вариации, более высокое среднее нормированное значение серого тона и меньший внутригрупповой коэффициент вариации для градаций серого. Пороговое сканирование позволило определить тканеспецифические пороги для исследованных тканей 112, 174, 191 и 180 соответственно.

4. Модель коррекции чертежа была разработана на основе нового коэффициента драпируемости DC_{SFM} и показателя светлой области $A_{overall}$, выбранного в качестве универсального показателя, обеспечивающего одинаковое восприятие драпированной складчатой поверхности.

5. Валидация скорректированного чертежа показала близость валидационного платья V, построенного по модифицированному чертежу, к целевому платью В, построенного по исходному чертежу, на уровне силуэта, реакции площади светлой области и локальной структуры верхней зоны складок. Алгоритм корректировки исходного чертежа при замене одной ткани другой позволил сохранить силуэт и локальную структуру складок.

6. Результаты исследований подтвердили, что новый коэффициент драпируемости DC_{SFM} можно использовать как показатель драпируемости ткани, расчетный параметр для прогнозирования формы платья и управляющий фактор для параметризации приемов конструктивного моделирования. Связь между DC_{SFM} , параметрами формы платья и параметрами складок в градациях серого формирует новую основу для построения цифровых двойников одежды.

ИТОГИ ИССЛЕДОВАНИЯ

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 типа соединительного 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 полутонового отклика складчатой поверхности, антропоморфный коэффициент драпируемости ткани и коэффициент складчатости и обеспечивающий визуальное подобия 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%

попоказателю MARE при схожести трехмерной формы, драпируемости, внешнего контура и распределения складок.

7. 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

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Peirce F. T. The handle of cloth as a measurable quantity // *Journal of the Textile Institute.* – 1930. – Vol. 21, no. 9. – P. T377–T416.
2. Booth J. E. *Principles of Textile Testing.* – 3rd ed. – London : Butterworths, 1969.
3. Abbott G. M. The measurement of stiffness in fabrics // *Journal of the Textile Institute.* – 1951. – Vol. 42. – P. T213–T224.
4. Chu C. C., Cummings C. L., Teixeira N. A. Mechanics of elastic performance of textile materials Part V: A study of the factors affecting the drape of fabrics—the development of a drape meter // *Textile Research Journal.* – 1950. – Vol. 20, no. 8. – P. 539–548.
5. Cusick G. E. *A study of fabric drape : dissertation.* – Manchester : University of Manchester, 1962.
6. Cusick G. E. The dependence of fabric drape on bending and shear stiffness // *Journal of the Textile Institute.* – 1965. – Vol. 56, no. 11. – P. T596–T606.
7. Cusick G. E. The measurement of fabric drape // *Journal of the Textile Institute.* – 1968. – Vol. 59, no. 6. – P. 253–260.
8. British Standards Institution. BS 5058: 1973 Method for the assessment of drape of fabrics. – London : BSI, 1973.
9. British Standards Institution. BS EN ISO 9073-9: 1998 Textiles—Test methods for nonwovens—Part 9: Determination of drape coefficient. – London : BSI, 1998.
10. International Organization for Standardization. ISO 9073-9: 2008 Textiles—Test methods for nonwovens—Part 9: Determination of drapability including drape coefficient. – Geneva : ISO, 2008.
11. Hearle J. W. S., Amirbayat J. Analysis of drape by means of dimensionless groups // *Textile Research Journal.* – 1986. – Vol. 56, no. 11. – P. 727–733.
12. Kawabata S. *The Standardization and Analysis of Hand Evaluation.* – Osaka : The Textile Machinery Society of Japan, 1980.
13. Kawabata S., Niwa M. Fabric performance in clothing and clothing manufacture // *Journal of the Textile Institute.* – 1989. – Vol. 80, no. 1. – P. 19–50.
14. Morooka H., Niwa M. Relation between drape coefficient and mechanical properties of fabrics // *Journal of the Textile Machinery Society of Japan.* – 1976. – Vol. 22, no. 3. – P. 67–73.
15. Niwa M., Seto F. Relationship between drapeability and mechanical properties of fabrics // *Journal of Textile Machinery Society of Japan.* – 1986. – Vol. 39, no. 11. – P. 161–168.
16. Gaucher C., King M. W., Johnston R. D. The relationship between fabric mechanical properties and drape in knitted fabrics // *Textile Research Journal.* – 1983. – Vol. 53, no. 5. – P. 294–300.
17. Collier B. J., Paulins V. A., Collier J. R. Effects of interfacing type on shear and drape behavior of apparel fabrics // *Clothing and Textiles Research Journal.* – 1989. – Vol. 7, no. 3. – P. 51–56.

18. Vangheluwe L., Kiekens P. Time dependence of the drape coefficient of fabrics // *International Journal of Clothing Science and Technology*. – 1993. – Vol. 5, no. 5. – P. 5–8.
19. Robson D., Long C. C. Drape analysis using imaging techniques // *Clothing and Textiles Research Journal*. – 2000. – Vol. 18, no. 1. – P. 1–8.
20. Jeong Y. J. A study of fabric-drape behaviour with image analysis Part I: Measurement, characterisation, and instability // *Journal of the Textile Institute*. – 1998. – Vol. 89, no. 1. – P. 59–69.
21. Yang M., Qin L., Matsudaira M. Measurement of drape coefficients of fabrics and description of those hanging shapes, Part 6: Evaluation of dynamic drape behavior of fabrics in swinging motion // *Journal of the Textile Machinery Society of Japan*. – 2001. – Vol. 54, no. 3. – P. T57–T64.
22. Tamás P., Geršák J., Halász M. Sylvie 3D drape tester—new system for measuring fabric drape // *Tekstil*. – 2006. – Vol. 55, no. 10. – P. 497–502.
23. Kenkare N. S. Three-Dimensional Modeling of Garment Drape : dissertation. – Raleigh : North Carolina State University, 2007.
24. Breen D. E., House D. H., Wozny M. J. Predicting the drape of woven cloth using interacting particles // *Computer Graphics*. – 1994. – Vol. 28. – P. 365–372.
25. Volino P., Thalmann N. M. *Virtual Clothing: Theory and Practice*. – Berlin : Springer, 2000.
26. Buyukaslan E., Kalaoglu F., Jevsnik S. Drape simulation and subjective assessment of virtual drape // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 254. – Article 162005.
27. Magnenat-Thalmann N. [et al.]. From measured fabric to the simulation of cloth // 2007 10th IEEE International Conference on Computer-Aided Design and Computer Graphics. – IEEE, 2007. – P. 449–452.
28. Sanchez H. Hem finishes and digital drape evaluation : dissertation. – Ithaca : Cornell University, 2022.
29. Kenkare N., Lamar T. A. M., Pandurangan P., Eischen J. Enhancing accuracy of drape simulation. Part I: Investigation of drape variability via 3D scanning // *The Journal of the Textile Institute*. – 2008. – Vol. 99, no. 3. – P. 211–218.
30. Jevsnik S., [et al.]. The study of fabric drape behaviour in the virtual environment // *International Istanbul Textile Congress*. Istanbul, 2013.
31. Fozzard G. J. W., Rawling A. J. Simulation of dressing and drape for garment CAD // *Proceedings of the 6th International Forum on CAD*. – 1991. – P. 157–162.
32. Hardaker C. H. M., Fozzard G. J. W. Towards the virtual garment: three-dimensional computer environments for garment design // *International Journal of Clothing Science and Technology*. – 1998. – Vol. 10, no. 2. – P. 114–127.

33. Spanlang B., Vassilev T., Walters J., [et al.]. A virtual clothing system for retail and design // *Research Journal of Textile and Apparel*. – 2005. – Vol. 9, no. 1. – P. 74–87.
34. Sayem A. S. M., Kennon R., Clarke N. 3D CAD systems for the clothing industry // *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*. – 2010. – Vol. 3, no. 2. – P. 45–53.
35. Lee S. Y., Kang I. A. A comparative study of the shapes of 3D virtual skirts and actually made skirts // *Journal of the Korean Society of Costume*. – 2009. – Vol. 59, no. 8. – P. 26–36.
36. Kim H. A., Ryu H. S., Lee J. H., [et al.]. A study on the comparing visual images between the actual garment and the 3D garment simulation of flare skirts // *Science of Emotion and Sensibility*. – 2011. – Vol. 14, no. 3. – P. 385–394.
37. Lee J., Kim H. A., Nam Y. J., [et al.]. Drape Evaluation of 3D Garment Simulations for Flared Skirts // *The Korean Fashion and Textile Research Journal*. – 2014. – Vol. 16, no. 1. – P. 128–136.
38. Buyukaslan E., Jevsnik S., Kalaoglu F. Drape of virtual garments on body models: impact of mechanical properties of the fabrics // *Proceedings of the 6th International Conference on 3D Body Scanning Technologies*. – Lugano, 2015. – P. 127–133.
39. Buyukaslan E., Jevsnik S., Kalaoglu F. Comparative analysis of drape characteristics of actually and virtually draped fabrics // *International Journal of Clothing Science and Technology*. – 2018. – Vol. 30, no. 3. – P. 286–301.
40. Shim E., Koo D. S., An J. S., [et al.]. Comparison of the silhouette of virtual clothes by fabric characteristics of nylon fabric for the utilization of virtual clothes // *ACS Omega*. – 2022. – Vol. 7, no. 50. – P. 47156–47164.
41. Bell S., Upchurch P., Snavely N., Bala K. Material recognition in the wild with the Materials in Context Database // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – 2015. – P. 3479–3487.
42. Schwartz G., Nishino K. Automatically discovering local visual material attributes // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. – 2015. – P. 3565–3573.
43. Li J., Wang W., Deng N., Xin B. A novel digital method for weave pattern recognition based on photometric differential analysis // *Measurement*. – 2020. – Vol. 152. – Article 107336.
44. Hussain M. A. I., Khan B., Wang Z. J., [et al.]. Woven fabric pattern recognition and classification based on deep convolutional neural networks // *Electronics*. – 2020. – Vol. 9, no. 6. – P. 1048.
45. Meng S., Pan R., Gao W., Zhou J., Wang J., He W. A multi-task and multi-scale convolutional neural network for automatic recognition of woven fabric pattern // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 2021. – Vol. 32, no. 4. – P. 1147–1161.

46. Wu H., Chen X., Zhang C., Zhou B., Zhao Q. Modeling yarn-level geometry from a single micro-image // *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*. – 2019. – Vol. 20. – P. 1165–1174.
47. Wang X., Georganas N. D., Petriu E. M. Fabric texture analysis using computer vision techniques // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2011. – Vol. 60, no. 1. – P. 44–56.
48. Bouman K. L., Xiao B., Battaglia P., Freeman W. T. Estimating the material properties of fabric from video // *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*. – 2013. – P. 1984–1991.
49. Mamun A. A., Nabi M. M., Islam F., Bappy M. M., Uddin M. A., Hossain M. S., Talukder A. Streamline video-based automatic fabric pattern recognition using Bayesian-optimized convolutional neural network // *The Journal of The Textile Institute*. – 2024. – Vol. 115. – P. 1878–1891.
50. Mahanta L. B., Mahanta D. R., Rahman T., Chakraborty C. Handloomed fabrics recognition with deep learning // *Scientific Reports*. – 2024. – Vol. 14. – P. 7974.
51. Chaka K. T., Shiferaw A. A., Sharew S. T. Inspection of cotton woven fabrics produced by Ethiopian textile factories through a real-time vision-based system // *Journal of Natural Fibers*. – 2023. – Vol. 20. – Article 2286615.
52. Das A. Deep learning to authenticate traditional handloom textile // *Information*. – 2024. – Vol. 15, no. 8. – P. 465.
53. Dominguez-Elvira H., Nicás A., Cirio G., Rodríguez A., Garcés E. Practical methods to estimate fabric mechanics from metadata // *Computer Graphics Forum*. – 2024. – Vol. 43, no. 2. – Article e15029.
54. Tu Y. F., Kwan M. Y., Yick K. L. A systematic review of AI-driven prediction of fabric properties and handfeel // *Materials*. – 2024. – Vol. 17, no. 20. – P. 5009.
55. Güder O., Işık Ş, Anagun Y. Fabric defects identification for textile industry with a deep learning approach // *Journal of the Textile Institute*. – 2025. – Vol. 116, no. 8. – P. 1493–1502.
56. Li J., Li D., Savarese S., Hoi S. BLIP-2: Bootstrapping language-image pre-training with frozen image encoders and large language models // *Proceedings of the 40th International Conference on Machine Learning*. – 2023.
57. Liu H., Li C., Wu Q., Lee Y. J. Visual instruction tuning // *Advances in Neural Information Processing Systems*. – 2023. – Vol. 36.
58. Dai W., Li J., [et al.]. InstructBLIP: Towards general-purpose vision-language models with instruction tuning // *Advances in Neural Information Processing Systems*. – 2023. – Vol. 36.
59. OpenAI. GPT-4V(ision) system card : report. – 2023.
60. Wu W., Zhang T., [et al.]. GPT4Vis: What Can GPT-4 Do for Zero-shot Visual Recognition? // *arXiv preprint arXiv:2311.15732*. – 2024.

61. Lei G., Gkoumas K., [et al.]. Materials science in the era of large language models: a perspective // *Digital Discovery*, 2024, 3:. – DOI: 10.1039/D4DD00074A.
62. Yu S., Ran N., Liu J. Large-language models: The game-changers for materials science research // *Artificial Intelligence Chemistry*. – 2024. – Vol. 2, no. 2. – Article 100076.
63. Korolev V., Protsenko P. Accurate, interpretable predictions of materials properties within transformer language models // *Patterns*. – 2023. – Vol. 4, no. 10. – Article 100803.
64. Rubungo A. N., Arnold C., Rand B. P., Dieng A. B. LLM-Prop: Predicting physical and electronic properties of crystalline solids from their text descriptions // *arXiv preprint arXiv:2310.14029*. – 2023.
65. Choudhary K. AtomGPT: Atomistic Generative Pre-trained Transformer for Forward and Inverse Materials Design // *The Journal of Physical Chemistry Letters*. – 2024. – Vol. 15, no. 27. – P. 6909–6917.
66. Welty C., Paritosh P., Aroyo L. Metrology for AI: From benchmarks to instruments // *arXiv preprint arXiv:1911.01875*. – 2019.
67. National Institute of Standards and Technology. Artificial Intelligence Measurement and Evaluation at the National Institute of Standards and Technology : report. – NIST Draft, 2021.
68. Hatakeyama-Sato K., [et al.]. Perspective on utilizing foundation models for laboratory automation in materials research // *Materials Research Communications*. – 2025.
69. Stach E., Blaiszik B., Foster I., [et al.]. Autonomous experimentation systems for materials development: a community perspective // *Matter*. – 2021. – Vol. 4, no. 9. – P. 2702–2726.
70. Litzinger J., Neumann J., Peters D., Thiel F. Streamlining conformity assessment of software applying large language models // *Measurement: Sensors*. – 2024. – Vol. 38. – Article 101792.
71. Schmelter S., Fortmeier I., Heißelmann D. Metrology for Virtual Measuring Instruments Illustrated by Three Applications // *Metrology*. – 2025. – Vol. 5, no. 3. – P. 54.
72. Barbosa C. R. H., Sousa M. C., Almeida M. F. L., Calili R. F. Smart Manufacturing and Digitalization of Metrology: A Systematic Literature Review and a Research Agenda // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, no. 16. – P. 6114.
73. Xiong X. C., Zhu Y., Li J., Duan Y., Fang X. A digital framework for metrological information // *Measurement: Sensors*. – 2021. – Vol. 18. – Article 100122.
74. JCGM. Evaluation of Measurement Data—Guide to the Expression of Uncertainty of Measurement (JCGM 100:2008). – Paris : BIPM, 2008.
75. JCGM. International Vocabulary of Metrology—Basic and General Concepts and Associated Terms (JCGM 200:2012). – Paris : BIPM, 2012.
76. Taylor B. N., Kuyatt C. E. Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results : report. – NIST Technical Note 1297, 1994.
77. Possolo A. Simple Guide for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results : report. – NIST Technical Note 1900, 2015.

78. Puig R. B., Gallegos J. G., Mohino Herranz I., Pérez Sanz F. J., Vicente Mussons T. Digital transformation: Ensuring metrological traceability // *Measurement: Sensors*. – 2025. – Vol. 38, suppl. – Article 101801.
79. Bilson S., Cox M., Pustogvar A., Thompson A. A metrological framework for uncertainty evaluation in machine learning classification models // *Metrologia*. – 2025. – Vol. 62, no. 6. – Article aelbae.
80. Adel T., Bilson S., Levene M., Thompson A. Trustworthy artificial intelligence in the context of metrology // *arXiv preprint arXiv:2406.10117*. – 2024.
81. Fung Y. W., Lim K. H., Phang J. T. S. Review on three-dimensional clothing modelling and digital human reconstruction for virtual try-on applications // *Multimedia Tools and Applications*. – 2026. – Vol. 85. – P. 359. – DOI: 10.1007/s11042-026-21423-2.
82. Jung G., Kang M., Kim S. Development and evaluation of accurate 3D human models using scan data: a comparison with SMPL and CLO models // *Fashion and Textiles*. – 2025. – Vol. 12. – P. 17. – DOI: 10.1186/s40691-025-00427-w.
83. He J., Cao Y., Guo T., Liang W., Huang J., Liu Q., Yang H., Liu S., He R. From physically-based to learning-based in cloth simulation: evolution and future—a scoping review // *The Visual Computer*. – 2025. – Vol. 41. – P. 12711–12742. – DOI: 10.1007/s00371-025-04182-3.
84. Kim J. H., Lee J. S. Investigating parameters affecting the real and virtual drapability of silk fabrics for traditional Hanbok // *Fashion and Textiles*. – 2024. – Vol. 11. – P. 21. – DOI: 10.1186/s40691-024-00388-6.
85. Wang H., O'Brien J. F., Ramamoorthi R. Data-driven elastic models for cloth: modeling and measurement // *ACM Transactions on Graphics*. – 2011. – Vol. 30, no. 4. – P. 71.
86. Miguel E., Bradley D., Thomaszewski B., Bickel B., Matusik W., Otaduy M. A. Data-driven estimation of cloth simulation models // *Computer Graphics Forum*. – 2012. – Vol. 31, no. 2pt2. – P. 519–528.
87. Nealen A., Müller M., Keiser R., Boxerman E., Carlson M. Physically based deformable models in computer graphics // *Computer Graphics Forum*. – 2006. – Vol. 25, no. 4. – P. 809–836.
88. Bridson R., Marino S., Fedkiw R. Simulation of clothing with folds and wrinkles // *Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*. – 2003. – P. 28–36.
89. Liu Y. M., Jang H. K. A study on the functional characteristics of apparel 3D CAD system // *Advanced Materials Research*. – 2013. – Vol. 627. – P. 501–505.
90. Choi K. H. 3D dynamic fashion design development using digital technology and its potential in online platforms // *Fashion and Textiles*. – 2022. – Vol. 9. – P. 9.

91. Wetherell S. V., Nicholson T. R., James A. M. Utilising 3D fashion design software to enable remanufacturing in sportswear // *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*. – 2024. – Vol. 17, no. 2. – P. 249–259.
92. Lim H., Istook C. L. Drape simulation of three-dimensional virtual garment enabling fabric properties // *Fibers and Polymers*. – 2011. – Vol. 12, no. 8. – P. 1077–1082.
93. Power J. Fabric objective measurements for commercial 3D virtual garment simulation // *International Journal of Clothing Science and Technology*. – 2013. – Vol. 25, no. 6. – P. 423–439.
94. Luible C., Magnenat-Thalmann N. Suitability of standard fabric characterisation experiments for the use in virtual simulations // *Proceedings of World Textile Conference AUTEX 2007*. – Tampere, 2007.
95. Kuijpers S., Luible-Bär C., Gong R. H. The Measurement of Fabric Properties for Virtual Simulation—A Critical Review : report. – IEEE Standards Association, 2020. – P. 1–43.
96. Jung U., Istook C. L. Comparison of objective measurement methods of fabric tensile properties for 3D virtual garment software // *ITAA Proceedings*. – 2020. – DOI: 10.31274/itaa.12158.
97. Dai X., Hong Y. Fabric mechanical parameters for 3D cloth simulation in apparel CAD: A systematic review // *Computer-Aided Design*. – 2024. – Vol. 167. – Article 103638.
98. Duong P. D., Phuong L. T. T., Phan D. N., Thang V. T. Correlation between material properties and actual-simulated drape of textile products // *Results in Engineering*. – 2024. – Vol. 22. – Article 102077.
99. Wang R., Fang F., Chen Q. A Sustainable Framework for Realism Evaluation and Optimization of Virtual Fabric Drape Effect // *Sustainability*. – 2025. – Vol. 17, no. 12. – P. 5550. – DOI: 10.3390/su17125550.
100. Mahnić Naglič M., Petrak S., Tomljenović A. Analysis of woven fabric mechanical properties in the context of sustainable clothing development process // *Polymers*. – 2025. – Vol. 17, no. 15. – P. 2013.
101. Grieves M., Vickers J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems // *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems* / ed. by F. J. Kahlen, S. Flumerfelt, A. Alves. – Cham : Springer, 2017. – P. 85–113.
102. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification // *IFAC-PapersOnLine*. – 2018. – Vol. 51, no. 11. – P. 1016–1022.
103. Tao F., Cheng J., Qi Q., Zhang M., Zhang H., Sui F. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2018. – Vol. 94. – P. 3563–3576.

104. Riedelsheimer T., Dorfhuber L., Stark R. User centered development of a Digital Twin concept with focus on sustainability in the clothing industry // *Procedia CIRP*. – 2020. – Vol. 90. – P. 660–665.
105. Alam M. D., Kabir G., Mirmohammadsadeghi S. A digital twin framework development for apparel manufacturing industry // *Decision Analytics Journal*. – 2023. – Vol. 7. – Article 100252.
106. Papachristou E., Kalaitzi D., Pissas V. A methodological framework for the integration of 3D virtual prototyping into the design development of laser-cut garments // *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. – 2023. – Vol. 18. – DOI: 10.1177/15589250231194621.
107. Dountap S., Petchhan J., Phanichraksaphong V., Wang J. H. Towards digital twins of 3D reconstructed apparel models with an end-to-end mobile visualization // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13, no. 15. – P. 8571.
108. Angelova R. A. Digital twins for a sustainable textile industry: A critical analysis of unexplored applications and future directions // *Textiles*. – 2025. – Vol. 5, no. 4. – P. 49.
109. Yoon K., Lim S. C. Real-to-sim high-resolution cloth modeling: Physical parameter optimization using particle-based simulation with robot manipulation data // *Journal of Computational Design and Engineering*. – 2025. – Vol. 12, no. 8. – P. 29–44. – DOI: 10.1093/jcde/qwaf065.
110. Kenkare N., May-Plumlee T. Evaluation of drape characteristics in fabrics // *International Journal of Clothing Science and Technology*. – 2005. – Vol. 17, no. 2. – P. 109–123.
111. Sayem A. S. M. Objective analysis of the drape behaviour of virtual shirt, part 2: technical parameters and findings // *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*. – 2017. – Vol. 10, no. 2. – P. 180–189. – DOI: 10.1080/17543266.2016.122381.
112. Pandurangan P., Eischen J., Kenkare N., Lamar T. A. M. Enhancing accuracy of drape simulation. Part II: Optimized drape simulation using industry-specific software // *The Journal of the Textile Institute*. – 2008. – Vol. 99, no. 3. – P. 219–226.
113. Mahnić Naglič M., Petrak S., Tomljenović A. Analysis of woven fabric mechanical properties in the context of sustainable clothing development process // *Polymers*. – 2025. – Vol. 17, no. 15. – P. 2013.
114. Papachristou E., Kalaitzi D., Pissas V. A methodological framework for the integration of 3D virtual prototyping into the design development of laser-cut garments // *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. – 2023. – Vol. 18. – Article 15589250231194621. – DOI: 10.1177/15589250231194621.
115. Dountap S., Petchhan J., Phanichraksaphong V., Wang J. H. Towards digital twins of 3D reconstructed apparel models with an end-to-end mobile visualization // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13, no. 15. – P. 8571. – DOI: 10.3390/app13158571.

116. Song H. K., Ashdown S. P. Investigation of the validity of 3-D virtual fitting for pants // *Clothing and Textiles Research Journal*. – 2015. – Vol. 33, no. 4. – P. 314–330.
117. Angelova R. A. Digital twins for a sustainable textile industry: A critical analysis of unexplored applications and future directions // *Textiles*. – 2025. – Vol. 5, no. 4. – P. 49.
118. Lagè A., Ancutienė K., Pukienė R., Lapkovska E., Dāboliņa I. Comparative study of real and virtual garments appearance and distance ease // *Materials Science*. – 2020. – Vol. 26, no. 2. – P. 233–239.
119. Kim H. A., Lim H. S. Measurement of drape appearance similarity between real and digital stretch fabric // *Fashion & Textile Research Journal*. – 2021. – Vol. 23, no. 5. – P. 645–654.
120. Brubacher K., Tyler D., Apeagyei P., Venkatraman P., Brownridge A. M. Evaluation of the Accuracy and Practicability of Predicting Compression Garment Pressure Using Virtual Fit Technology // *Clothing and Textiles Research Journal*. – 2023. – Vol. 41, no. 2. – P. 107–124.
121. Hu J., Chung S., Lo M. T. Effect of seams on fabric drape // *International Journal of Clothing Science and Technology*. – 1997. – Vol. 9, no. 3. – P. 220–227. – DOI: 10.1108/09556229710168351.
122. Orzada B. T., Moore M. A., Collier B. J. Grain alignment: effects on fabric and garment drape // *International Journal of Clothing Science and Technology*. – 1997. – Vol. 9, no. 4. – P. 272–284. – DOI: 10.1108/09556229710175515.
123. Chen B., Govindaraj M. A physically based model of fabric drape using flexible shell theory // *Textile Research Journal*. – 1995. – Vol. 65, no. 6. – P. 324–330. – DOI: 10.1177/004051759506500603.
124. Chen B., Govindaraj M. A parametric study of fabric drape // *Textile Research Journal*. – 1996. – Vol. 66, no. 1. – P. 17–24. – DOI: 10.1177/004051759606600103.
125. Park C. K., Kim S., Yu W. R. Quantitative fabric drape evaluation system using image processing technology (Part 1): Measurement system and geometric model // *Journal of Testing and Evaluation*. – 2004. – Vol. 32, no. 2. – P. 131–137. – DOI: 10.1520/JTE11755.
126. Kown E. S., Yoon S. Y., Sul I. H., Kim S., Park C. K. A quantitative fabric drape evaluation system using image-processing technology, Part 2: Effect of fabric properties on drape parameters // *Journal of Testing and Evaluation*. – 2010. – Vol. 38, no. 3. – P. 263–270. – DOI: 10.1520/JTE102361.
127. Sun M. N. A new tester and method for measuring fabric stiffness and drape // *Textile Research Journal*. – 2008. – Vol. 78, no. 9. – P. 761–770. – DOI: 10.1177/0040517507084284.
128. Issa M., Elgholmy S., Sheta A., Fors M. N. A new method for measuring the static and dynamic fabric/garment drape using 3D printed mannequins // *The Journal of The Textile Institute*. – 2021. – Vol. 112, no. 1. – P. 1–13. – DOI: 10.1080/00405000.2020.1748803.

129. Hussain A., Zhong Y., Naveed T., Yu Z., Xi Z., Ge W. A new approach to evaluate fabric hand based on three-dimensional drape model // *Autex Research Journal*. – 2020. – Vol. 20, no. 2. – P. 155–167. – DOI: 10.2478/aut-2019-0011.
130. Demir M., Balci Kilic G. A research for the effectiveness of stitch type and stitch direction on dynamic drape behaviors // *International Journal of Clothing Science and Technology*. – 2023. – Vol. 35, no. 6. – P. 971–985. – DOI: 10.1108/IJCST-04-2023-0053.
131. ASTM International. ASTM D1388-18: Standard test method for stiffness of fabrics. – West Conshohocken, PA : ASTM International, 2018.
132. ASTM International. ASTM D1777: Standard test method for thickness of textile materials. – West Conshohocken, PA: ASTM International.
133. ASTM International. ASTM D5034: Standard test method for breaking strength and elongation of textile fabrics (grab test). – West Conshohocken, PA: ASTM International.
134. ASTM International. ASTM D4032-08(2016): Standard test method for stiffness of fabric by the circular bend procedure. – West Conshohocken, PA : ASTM International, 2016.
135. CLO Virtual Fashion. How accurate are virtual fabrics? [Электронный ресурс]. – CLOHelpCenter. – Updated May 16, 2023. – URL: <https://support.clo3d.com/hc/en-us/articles/115013660747-How-accurate-are-virtual-fabrics> (дата обращения: 29.05.2026). – Текст : электронный.
136. CLO Virtual Fashion. Emulator [Электронный ресурс]. – CLOHelpCenter. – Updated May 29, 2024. – URL: <https://support.clo3d.com/hc/en-us/articles/115015983027-Emulator> (дата обращения: 29.05.2026). – Текст : электронный.
137. CLO Virtual Fashion. Fabric Kit Manual [Электронный ресурс]. – CLOHelpCenter. – Updated May 29, 2024. – URL: <https://support.clo3d.com/hc/en-us/articles/360041074334-Fabric-Kit-Manual> (дата обращения: 29.05.2026). – Текст : электронный.
138. CLO Virtual Fashion. How are fabrics simulated in CLO? [Электронный ресурс]. – CLOHelpCenter. – Updated August 12, 2021. – URL: <https://support.clo3d.com/hc/en-us/articles/115013821448-How-are-fabrics-simulated-in-CLO> (дата обращения: 29.05.2026). – Текст : электронный.
139. CLO Virtual Fashion. Does CLO come with a fabric database? [Электронный ресурс]. – CLOHelpCenter. – Updated October 13, 2025. – URL: <https://support.clo3d.com/hc/en-us/articles/115013821388-Does-CLO-come-with-a-fabric-data-base> (дата обращения: 29.05.2026). – Текст : электронный.
140. Style3D. 3D fabrics scanning & real-time simulation [Электронный ресурс]. – Style3D official website. – URL: <https://www.style3d.com/products/fabric> (дата обращения: 29.05.2026). – Текст : электронный.

141. Yang Y. C., Zhang W. Y., Cong S. Investigating the development of digital patterns for customized apparel // *International Journal of Clothing Science and Technology*. – 2007. – Vol. 19, no. 3/4. – P. 167–177. – DOI: 10.1108/09556220710741632.
142. Bye E., LaBat K., McKinney E., Kim D. E. Optimized pattern grading // *International Journal of Clothing Science and Technology*. – 2008. – Vol. 20, no. 2. – P. 79–92. – DOI: 10.1108/09556220810850469.
143. Hernández N., Mattila H., Berglin L. A systematic model for improving theoretical garment fit // *Journal of Fashion Marketing and Management*. – 2018. – Vol. 22, no. 4. – P. 527–539. – DOI: 10.1108/JFMM-10-2017-0112.
144. Kim S. Simulation of bespoke garments using parametrically designed patterns // *International Journal of Clothing Science and Technology*. – 2012. – Vol. 24, no. 5. – P. 350–362. – DOI: 10.1108/09556221211259000.
145. Kim S. H., Kim S., Park C. K. Development of similarity evaluation method between virtual and actual clothing // *International Journal of Clothing Science and Technology*. – 2017. – Vol. 29, no. 5. – P. 743–750. – DOI: 10.1108/IJCST-01-2017-0001.
146. Zulkifli S. Z. B., Kim K., Takatera M. Similarities and differences between virtual and actual pants // *International Journal of Clothing Science and Technology*. – 2021. – Vol. 33, no. 2. – P. 199–217.
147. Gong D. X., Hinds B. K., McCartney J. Progress towards effective garment CAD // *International Journal of Clothing Science and Technology*. – 2001. – Vol. 13, no. 1. – P. 12–23. – DOI: 10.1108/09556220110384833.
148. Yan J., Kuzmichev V. E. A virtual e-bespoke men's shirt based on new body measurements and method of pattern drafting // *Textile Research Journal*. – 2020. – Vol. 90, no. 19-20. – DOI: 10.1177/0040517520913347.
149. McKinney E., Gill S., Dorie A., Roth S. Body-to-pattern relationships in women's trouser drafting methods: Implications for apparel mass customization // *Clothing and Textiles Research Journal*. – 2017. – Vol. 35, no. 1. – P. 16–32. – DOI: 10.1177/0887302X16664406.
150. Jin P., Fan J., Zheng R., Chen Q., Liu L., Jiang R., Zhang H. Design and research of automatic garment-pattern-generation system based on parameterized design // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15, no. 2. – P. 1268. – DOI: 10.3390/su15021268.
151. Lee M.-J., Sohn H.-S., Kim J.-J. A Study on Representation of 3D Virtual Fabric Simulation with Drape Image Analysis II - Focus on the Comparison between Real Clothing and 3D Virtual Clothing - // *Journal of Fashion Business*. – 2011. – Vol. 15, no. 3. – P. 97–111. – DOI: 10.12940/jfb.2011.15.3.097.
152. Seçkin M., Seçkin AÇ., Demircioglu P., Bogrekci I. FabricNET: A Microscopic Image Dataset of Woven Fabrics for Predicting Texture and Weaving Parameters through Machine Learning // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15, no. 21. – Article 15197. – DOI: 10.3390/su152115197.

153. Lee S., Han Y., Yun C. Development of a fabric classification system using drapability and tactile characteristics // *Fashion and Textiles*. – 2024. – Vol. 11. – Article 2. – DOI: 10.1186/s40691-023-00368-2.
154. Yun E., Yun C. Development of a test method for the dynamic drapability of fabrics using reciprocating motion // *Fashion and Textiles*. – 2023. – Vol. 10. – Article 35. – DOI: 10.1186/s40691-023-00355-7.
155. Kim H. S., Choi H. E., Park C. K. [et al.]. Standardization of the size and shape of virtual human body for apparel products // *Fashion and Textiles*. – 2019. – Vol. 6. – Article 33. – DOI: 10.1186/s40691-019-0187-z.
156. Wang R., Fang F., Chen Q. A Sustainable Framework for Realism Evaluation and Optimization of Virtual Fabric Drape Effect // *Sustainability*. – 2025. – Vol. 17, no. 12. – P. 5550.
157. Chen J., Guo Z., Li T., [et al.]. Construction of Pattern Optimization Model Driven by Fabric Parameters in 3D Garment Development Using Artificial Neural Networks // *Technologies*. – 2025. – Vol. 13, no. 11. – P. 487.
158. Winn L. J., Schwarz E. R. Technical Evaluation of Textile Finishing Treatments // *Textile Research Journal*. – 1939. – Vol. 10, no. 1. – P. 5–16.
159. Sanad R., Cassidy T., Cheung V. Fabric and Garment Drape Measurement - Part 1 // *Journal of Fiber Bioengineering and Informatics*. – 2012. – Vol. 5, no. 4. – P. 341–358. – DOI: 10.3993/jfbi12201201.
160. Sanad R., Cassidy T., Cheung V., Evans E. Fabric and garment drape measurement - Part 2 // *Journal of Fiber Bioengineering and Informatics*. – 2013. – Vol. 6, no. 1. – P. 1–22. – DOI: 10.3993/jfbi03201301.
161. Kuzmichev V., Yan J. The application of digital twins in the field of fashion // *Digital twins: basics and applications*. – Cham : Springer International Publishing, 2022. – P. 45–57.
162. ASTM International. ASTM D5034-21. Standard Test Method for Breaking Strength and Elongation of Textile Fabrics (Grab Test). – West Conshohocken, PA : ASTM International, 2021. – DOI: 10.1520/D5034-21.
163. ASTM International. ASTM D1388-23. Standard Test Method for Stiffness of Fabrics. – West Conshohocken, PA : ASTM International, 2023. – DOI: 10.1520/D1388-23.
164. International Organization for Standardization. ISO 9073-9:2008. Textiles — Test methods for nonwovens — Part 9: Determination of drapability including drape coefficient. – Geneva : ISO, 2008.
165. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. – 1979. – Vol. 9, no. 1. – P. 62–66. – DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076.

166. Wang Z., Bovik A. C., Sheikh H. R., Simoncelli E. P. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity // *IEEE Transactions on Image Processing*. – 2004. – Vol. 13, no. 4. – P. 600–612. – DOI: 10.1109/TIP.2003.819861.
167. Taha A. A., Hanbury A. Metrics for evaluating 3D medical image segmentation: analysis, selection, and tool // *BMC Medical Imaging*. – 2015. – Vol. 15. – P. 29. – DOI: 10.1186/s12880-015-0068-x.
168. Nai Y. H., Teo B. W., Tan N. L., O’Doherty S., Stephenson M. C., Thian Y. L., Chiong E., Reilhac A. Comparison of metrics for the evaluation of medical segmentations using prostate MRI dataset // *Computers in Biology and Medicine*. – 2021. – Vol. 134. – Article 104497. – DOI: 10.1016/j.combiomed.2021.104497.
169. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China; Standardization Administration of China. GB/T 1335.2-2008. Standard sizing systems for garments — Women. – Beijing : Standards Press of China, 2008.
170. 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.– 0,81п.л./0,6 п.л.
171. ChenChengyu, KuzmichevVictor. DigitalTwinofTextileFabricinDrapingTest 2025 IEEE SmartWorldCongress (SWC).18-22 Aug 2025, Calgary, Canada. 2025. С.1591-1598. - DOI 10.1109/SWC65939.2025.00250. – 0,5п.л./0,4 п.л.
172. ЧэньЧэнюй, 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.
173. Чэнь Чэнюй, Кузьмичев В.Е. Прогнозирование параметров формы женского платья с использованиемнового 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.
174. Chen Chengyu, KuzmichevVictor. Virtual simulation of Apparel Draping: IFFTI Annual Proceedings, London, 2025, Vol. 4, March 2025, pp.1406-1424 <https://iffti.org/downloads/iffti-publication/annual-proceedings/lcf-2025/1406-1424%20394,%20Virtual%20Simulation%20of%20Apparel%20Draping.pdf> – 1.1 п.л./ 0.7 п.л.
175. 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.230-245. - 1 п.л./0,8 п.л.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- 3D - трёхмерный; трёхмерное моделирование или трёхмерная технология
- AI / ИИ - искусственный интеллект
- ANOVA - дисперсионный анализ
- APE - absolute percentage error; абсолютная процентная ошибка
- $A_{overall}$ - процент светлой области в общей области складок
- A_{ROI1} - процент светлой области в ROI-1
- A_{ROI2} - процент светлой области в ROI-2
- ASTM - American Society for Testing and Materials; система стандартов ASTM
- B - базовый элемент протокола промпта; в разделе валидации также целевое платье B
- BD - basic dress; базовое платье
- BD1–BD5 - пять размерно-конструктивных уровней базового платья
- CAD - computer-aided design; автоматизированное проектирование
- C1–C3 - дополнительные виртуальные ткани из библиотеки Style3D
- CLO3D - программная среда трёхмерной симуляции одежды
- CV - coefficient of variation; коэффициент вариации
- DC - drapecoefficient; коэффициент драпируемости, полученный традиционным дисковым методом
- DC_{SFM} - коэффициент драпируемости, измеренный методом SFM
- DT - digital twin; цифровой двойник
- E01–E15 - элементы протокола промпта
- F1–F5 - коды реальных тканей, использованных в исследовании
- FAST - Fabric Assurance by Simple Testing; система испытания свойств ткани
- G - поверхностная плотность ткани
- GSM - grams per square metre; поверхностная плотность, г/м²
- GPT - Generative Pre-trained Transformer; мультимодальная модель OpenAI
- IoU - intersection over union; коэффициент пересечения по объединению
- KES - Kawabata Evaluation System; система оценки механических свойств ткани
- Lab - лабораторные эталонные значения или набор параметров, полученный лабораторными измерениями

- LS - long sample; длинная проба
- LS1–LS5 - пять уровней длинной пробы
- LSDC_{SFM} - DCSFM, полученный для длинной пробы LS
- MAE - mean absolute error; средняя абсолютная ошибка
- MAPE - mean absolute percentage error;
средняя абсолютная процентная ошибка
- T - минимальный порог серого уровня T
- OBJ - формат файла трёхмерной геометрии OBJ
- P1–P6 - шесть типов фотографических доказательств для ИИ-измерений
- P₁–P₁₀ - фиксированные положения складок в конструкции PLD
- P_{d1}–P_{d4} - параметры формы базового платья BD
- PLD - pleated/draped dress; платье со складками или драпированное платье
- PLDP1–PLDP5 - пять уровней чертежа платья PLD со складками
- RE - relative error; относительная ошибка
- RMSE - root mean square error; среднеквадратичная ошибка
- ROI - region of interest; область интереса
- ROI-1 - локальная область верхней зоны концентрации складок
- ROI-2 - локальная область диагонального распространения складок
- SD - standard deviation; стандартное отклонение
- SFM - Shoulder Fitting Method; метод плечевой посадки
- SNP - side neck point; боковая точка шеи
- SP - shoulder point; плечевая точка
- SPSS - IBM SPSS Statistics; программное обеспечение статистической обработки
- SS - short sample; короткая проба
- SS1–SS5 - пять уровней короткой пробы
- SSDC_{SFM} - DCSFM, полученный для короткой пробы SS
- SSIM - structural similarity index measure; индекс структурного сходства
- Tf - толщина ткани
- V - валидационный объект; в разделе промпта также переменный элемент протокола
- VD - валидационное базовое платье
- VF1–VF5 - виртуальные ткани из библиотеки Style3D
- VSS - валидационная короткая проба
- Δ - коэффициент складчатости

- $\Delta 1$ - нормализованный параметр расширения в передне-заднем направлении
- $\Delta 2$ - нормализованный параметр изменения средней ширины
- α - суммарный угол наклона передней и задней частей пробы SS
- Dd - максимальное передне-заднее расстояние пробы после драпировки
- Wm - эффективная ширина драпометра SFM
- $W0$ - средняя ширина пробы до драпировки
- Wd - средняя ширина пробы после драпировки
- L_{sh} - длина плечевого среза
- L_{SS} - длина короткой пробы SS
- W_{SS} - ширина короткой пробы SS
- L_{LS} - длина длинной пробы LS
- W_{LS} - ширина длинной пробы LS
- s_1-s_3 - типы плечевых швов
- o_1-o_3 - направления раскроя пробы
- h_1-h_3 - варианты обработки нижнего края
- $R1-R5$ - радиусные параметры поперечного сечения плечевой опорной поверхности
- $X1-X5$ - кодированные факторы в модели влияния на DCSFM
- ①-⑳ - коды физико-механических параметров ткани

СПИСОК ТАБЛИЦ

- 1.1 - репрезентативные традиционные методы оценки жесткости и драпируемости и их основные расчетные параметры.
- 1.2 - Эволюция методов оценивания драпируемости
- 1.3 - Структура и содержание разработанных процессов виртуального испытания драпируемости
- 1.4 - Содержание направлений исследования и получаемые результаты
- 1.5 - Основные различия между регрессионной оценкой и ИИ-измерением
- 1.6 - Метрологические элементы ИИ-измерения текстиля
- 1.7 - Применение показателей свойств тканей в виртуальном моделировании
- 1.8 - Основные уровни и индексы валидации цифровых двойников текстиля и одежды
- 1.9 - Ограничения традиционных методов испытаний
- 1.10 - Узкие места в генерации цифровых двойников тканей
- 1.11 - Ограничения в прогнозировании формы одежды
- 2.1 - Основная информация о реальных тканях
- 2.2 - Виртуальные ткани из библиотеки тканей Style3D, использованные для разработки метода тестирования драпируемости
- 2.3 - Параметры чертежей BD
- 2.4 - Параметры складок для пяти вариантов чертежей PLDP
- 2.5 - Параметры выхода, полученные в ходе тестирования физических свойств
- 3.1 - Значения DC и CV проб на виртуальных геометрических опорах
- 3.2 - Усреднённые геометрические параметры виртуальной поверхности плечевой опоры
- 3.3 - Функции проб
- 3.4 - Кандидатные методики измерения SS
- 3.5 - Значения DCSFM для пробы SS из виртуальной ткани VF3
- 3.6 - Сравнение значений DC для разных методов расчёта
- 3.7 - Значения DCSFM для LS для четырех кандидатных схем измерения
- 3.8 - Соответствие операций SFM в виртуальных и физических тестах
- 3.9 - CV для DCSFM короткой пробы при различных направлениях раскроя и типах шва
- 3.10 - DCSFM короткой пробы при различных углах наклона плечевого среза и ширине пробы внизу
- 3.11 - Коэффициенты корреляции между DCSFM, геометрическими

параметрами короткой пробы SS и показателями физико-механических свойств тканей и ($n = 270$)

- 3.12 - Проверка прогнозирования DCSFM на контрольных тканях
- 3.13 - Парное сравнение измеренных и прогнозируемых значений DCSFM
- 3.14 - Значения DCSFM для виртуальных и физических проб SS
- 3.15 - Результаты t-теста для независимых выборок между виртуальными и физическими SS
- 3.16 - Виртуально-физические различия и межтканевой CV для дискового и нового методов
- 4.1 - Визуальные сигналы и группы физических свойств в наборе изображений для ИИ измерений
- 4.2 - Библиотека элементов промпта
- 4.3 - Структура промптов
- 4.4 - Связь между входными и выходными требованиями
- 4.5 - Настройки выполнения и вывода для версий промпта
- 4.6 - Лабораторные эталонные значения физико-механических свойств тканей F1–F3
- 4.7 - Показатели свойств, оцененные по промптам 1–5, и соответствующие им результаты контактных лабораторных измерений для F1
- 4.8 - Изменения протокола и эволюция ошибок на уровне параметров между соседними версиями подсказок
- 4.9 - Результаты оценивания показателей свойств ткани F1 с помощью разных ИИ
- 4.10 - Сравнение MAPE для входных данных P1, P2 и P1+P2 для F1
- 4.11 - Влияние угла вращения на фотографии P4 на ошибку измерения для ткани F1
- 4.12 - Влияние направления раскрытия пробы на фотографии P6 на ошибку измерения для ткани F1
- 4.13 - MAPE для всех параметров при включении в промпт одной фотографии P1–P6
- 4.14 - Результаты статистической обработки влияния фотографий на точность оценивания показателей всех тканей F1–F3
- 4.15 - Дисперсионный анализ влияния типа фотографии, ткани и эффектов их взаимодействия
- 4.16 - Сравнение значений DC, полученных GPT-5.1 при использовании одной фотографии, с лабораторными эталонными значениями

- 4.17 - Визуальное сравнение лабораторной пробы и виртуальных проб, сгенерированных на основе параметров ИИ
- 4.18 - Значения MAPE для конфигураций из 3D и 2D+3D фотографий в сравнении с 2D-базовой конфигурацией
- 4.19 - Сходимость и дрейф DC между 2D-базовой конфигурацией и гибридными входами
- 4.20 - Визуальное сравнение морфологических отклонений, вызванных гибридными фотографическими входами с максимальным отклонением
- 4.21 - Набор ИИ параметров материала для генерации и оценки цифрового двойника ткани
- 4.22 - Согласованность силуэтов юбок F1-ИИ и F1-Lab
- 4.23 - Показатели согласованности ROI в области опорной поверхности для платьев на основе ИИ-параметров и Lab-параметров
- 4.24 - Значения параметров, полученные разными ИИ с использованием P1+P2+P6-Warp
- 5.1 - Система параметров для прогнозирования формы платья и коррекции чертежей
- 5.2 - Сопоставленная матрица данных SSDCSFM и параметров формы BDPd1-Pd4
- 5.3 - Изменение DCSFM для пробы LSна пяти уровнях
- 5.4 - Коэффициенты корреляции между DCSFM и Pd4
- 5.5 - Коэффициенты корреляции между показателями короткой пробы SSDCSFM и параметрами базового платья BD
- 5.6 - Сравнение стабильности кандидатных областей реакции
- 5.7 - Результаты регрессии локальных моделей прогнозирования Δ
- 5.8 - Параметры складок для валидационного чертежа платья V из ткани F5
- 5.9 - Показатели согласованности фронтальных силуэтов
- 5.10 - Результаты валидации эквивалентной реакции в градациях серого
- 5.11 - Результаты проверки локального структурного сходства

СПИСОК РИСУНКОВ

- 1.1 - Ранние приборы для оценки драпируемости ткани: а - драпометр Беллинсона, б - сравнение контуров сверху, с - оптический драпометр F.R.L., d - усовершенствованный драпометр F.R.L. [4, 158, 159]
- 1.2 - Измерение драпируемости по Кьюсику: а - прибор, б - контур [4]
- 1.3 - Драпируемость проб ткани и одежды: а - платье на манекене, б - изображения драпированных проб (проекций) ткани, с – горизонтальные сечения (проекции) платьев на уровне низа [160]
- 1.4 - Рабочий процесс виртуального испытания драпируемости: а - проектирование чертежей, б - параметры материала, с - создание аватара, d - извлечение контура, е - симуляция и отображение [151, 98]
- 1.5 - 3D-валидация морфологии виртуальной драпируемости: а - оснастка для сканирования драпируемой пробы, б - обработка облака точек, с - извлечение коэффициента драпируемости [29]
- 1.6 - Динамические визуальные доказательства и ИИ-вывод: а - динамическое измерение драпируемости, б - рамка ИИ-прогнозирования грифа [154, 54]
- 1.7 - Регрессионная оценка свойств ткани: а - регрессия на основе видео, б - вывод на основе метаданных [48, 53]
- 1.8 - Требования к ИИ-измерению на основе протокола [80]
- 1.9 - Оценка достоверности ИИ-измерения ткани
- 1.10 - Параметры ткани в 3D-симуляции одежды [97]
- 1.11 - Преобразование одежды из 2D в 3D: а - 3D-виртуальная одежда, б - вид 2D-лекал [106]
- 1.12 - Развертывание поверхности и оптимизация лекал [157]
- 1.13 - Общая исследовательская рамка
- 2.1 - Внешний вид тканей: а – F1, б – F2, с – F3, d – F4, е – F5
- 2.2 - Схема чертежа базового платья BD и параметры его объёмно-силуэтной формы: а – схема чертежа, б – схема измерения параметров, , и
- 2.3 - Схема построения чертежа платья со складками PLD и задания уровней складчатости: а – чертёж базового платья BD и линии разреза; б – чертёж PLD после разведения вдоль линий разреза; в – фиксированные положения складок и определение , на объёмной форме PLD; г – наложение пяти вариантов чертежей платья со складками PLDP1–PLDP5.

- 2.4 - Объекты изображения и области анализа для характеристики отклика PLD по градациям серого: а – складки у шва соединения верхней и нижней частей платья как ROI-1, б – складки в зоне диагонального распространения к низу и вбок как ROI-2, с – общая плиссированная область целевого PLD, объединяющая зоны ROI-1 и ROI-1, d – оригинальное изображение целевого PLD до кадрирования, е – платье PLD из ткани F1, f – платье PLD из ткани F2, g – платье PLD из ткани F3
- 2.5 - Размеры физических образцов, подготовленных для тестов GSM, толщины, растяжения, изгиба
- 2.6 - Приборы и принципы измерений, использованные в тестах: а – измерение GSM, б – измерение толщины, с – тест на растяжение, d – тест на изгиб, е – тест круговой драпируемости
- 3.1 - Геометрические виртуальные опоры, использованные для предварительного сравнения драпируемости: а - сферическая опора в CLO3D, б - цилиндрическая опора в Style3D, с - коническая опора в Style3D
- 3.2 - Извлечение и параметрическое определение виртуальной поверхности плечевой опоры: а – виртуальные фигуры разных размерных градаций и выделенная плечевая область, б – определение геометрических параметров опорной поверхности
- 3.3 - Новая виртуальная плечевая опора, сгенерированная в Style3D: а – вид спереди; б – вид слева; с – вид сзади; d – вид справа
- 3.4 - Физический прототип драпометра и вспомогательное измерительное устройство: а - вид спереди; б - вид сбоку; с - вспомогательное лазерное опорное устройство
- 3.5 - Геометрические формы и локальные конструктивные переменные проб: а – SS, б – LS, с – s₁ стачной шов, d – s₂ накладной с закрытыми срезами, е – s₃ запошивочный шов, f – h₁ нижний край без подгиба, g – h₂ нижний край с подогнутым срезом, h – h₃ нижний край со швом подгибку
- 3.6 - Фиксированное положение для размещения и стабилизированное драпированное состояние SS: а – исходное размещение SS в фиксированном положении; б – стабилизированное драпированное состояние SS
- 3.7 - Процесс испытания по методу SFM и традиционным методам, основанных на проекционной площади, в Style3D и Rhino 7: а - симуляция пробы SS на опоре SFM, б - симуляция круглой пробы на

- сферической опоре, с - проекционный контур пробы SS, d - проекционный контур круглой пробы
- 3.8 - Размещение образцов для теста драпировки SFM: a – размещение SS в виртуальном тесте, b – размещение LS в виртуальном тесте, с – размещение физического образца SS
- 3.9 - Схема измерений параметров для расчета DCSFM: a – измерение плоской ширины SS до драпировки, b – измерение ширины SS после драпировки, с – измерение ширины LS после драпировки, d – виртуальное измерение Dd и Wm для SS, e – физическое измерение Dd и Wm для SS, f – физическое измерение ширины SS после драпировки
- 3.10 - Кандидатные схемы измерения DCSFM для средней пробы LS в Rhinoceros 7: a - схема 1, b - схема 2, с - схема 3, d - схема 4
- 3.11 - CV для DCSFM короткой пробы при различных направлениях раскроя и стачного шва
- 3.12 - Влияние конструкции плечевого шва и обработки нижнего края цельнокроеной пробы на DCSFM
- 3.13 - Репрезентативная зависимость между углом X_4 и DCSFM короткой пробы для ткани F3
- 3.14 - Репрезентативная зависимость между шириной нижнего края X_5 и DCSFM короткого образца для F2
- 3.15 - Виртуальные и физические круглых пробы из тканей F1–F3, полученные дисковым методом: a - виртуальная драпировка F1; b - физическая драпировка F1; с - виртуальная драпировка F2; d - физическая драпировка F2; e - виртуальная драпировка F3; f - физическая драпировка F3
- 4.1 - Структура набора изображений для ИИ-измерений показателей свойств тканей
- 4.2 - Типы фотографий: a – плоское изображение P1, b – текстура поверхности крупным планом P2, с – круговая драпировка Касика P3, d – спиральная закручиваемость P4, e – драпируемость по новому методу SFMP5, f – вертикальное подвешивание P6
- 4.3 - Значения MAPE для показателей, оцененных ИИ, для промптов 1–5
- 4.4 - Радарная диаграмма для разных моделей ИИ
- 4.5 - Влияние объединения фотографий на точность измерений ИИ
- 4.6 - Ранжирование групп параметров свойств текстильных материалов по среднему MAPE для тканей F1–F3

- 4.7 - Распределение точности и стабильности различных конфигураций доказательств
- 4.8 - Влияние количества фотографий и типа одиночной фотографии на локальную отборочную ошибку для F1: a – средняя локальная отборочная ошибка при разном количестве фотографий; b – ранжирование одиночных входных данных P1–P6 по локальной отборочной ошибке
- 4.9 - Рабочий процесс построения цифрового двойника ткани (DT) на основе ИИ измерений
- 4.10 - Интерфейс Style3D для ввода параметров
- 4.11 - Цифровые двойники тканей, сгенерированные в Style3D при двух способах получения параметров: a - F1-Lab; b - F2-Lab; c - F3-Lab; d - F1-ИИ; e - F2-ИИ; f - F3-ИИ
- 4.12 - Юбки, сгенерированные в Style3D при двух способах получения параметров: a- F1-Lab; b- F1-ИИ
- 4.13 - Наложённые контуры юбок F1-ИИ и F1-Lab: a – вид спереди; b – вид сбоку; c – вид снизу
- 4.14 - Области ROI для анализа платья: a, b - F1; c, d - F2; e, f - F3
- 4.15 - Сравнение MAPE для одномодельного базового варианта и гибридной маршрутизации с несколькими моделями для тканей F1–F3
- 4.16 - Сравнение цифровых двойников платьев, сгенерированных на основе гибридного набора параметров F1 и набора F1-Lab: a – F1-hybrid; b – F1-Lab; c – наложение контуров F1-hybrid и F1-Lab
- 4.17 - Структура протоколо-управляемой схемы измерения на основе ИИ
 - 5.1 - Объекты исследования, используемые для разработки алгоритма прогнозирования формы платья: a - пять вариантов пробыSS, b - пять вариантов пробыLS, c - уровни измерения BD1–BD5 параметров Pd1–Pd4 платьяBD
 - 5.2 - Поперечные профили базового платья на уровнях BD1–BD5 при использовании разных тканей: a - F1, b - F2, c- F3
 - 5.3 - Сравнение ошибок прогнозирования параметров формы виртуального базового платья VD
 - 5.4 - Кандидатные области для исследования: a - темная F1, b - светлая F1, c - темная F2, d - светлая F2, e - темная F3, f - светлая F3. Красный цвет обозначает пиксели, выделенные как кандидатная область реакции складок после пороговой сегментации.

- 5.5 - Изменение внешнего вида платья из ткани F1 при повышении порога серого цвета (а) и кривые уменьшения площади светлой области А при изменении порога MinThrT (б)
- 5.6 - Изменение площади светлой области А при увеличении Δ : а - Aoverall, б - AROI1, с - AROI2
- 5.7 - Сравнение силуэтов целевого В и валидационного V платьев: а - целевое платье В, б - валидационное платье V, с - результат совмещения силуэтов после выравнивания по центру
- 5.8 - Сравнение локальной структуры: а - ROI-1 для платья В, б - ROI-1 для платья V, с - ROI-2 для платья В, d - ROI-2 для платья V

*Bias**Table 3 Bending behavior in a cantilever test from 25 mm*

<i>Direction</i>	<i>Contact distance (range)</i>	<i>Horizontal travel (range)</i>	<i>Unit</i>	<i>Confidence</i>	<i>Reasoning (visual cues)</i>
<i>Warp</i>					
<i>Weft</i>					
<i>Bias</i>					

Table 4 Drape coefficient

<i>Parameter</i>	<i>Estimated value (range)</i>	<i>Unit</i>	<i>Confidence</i>	<i>Reasoning (visual cues)</i>
<i>DC</i>				

- E08: Answer only with Markdown tables, no extra text before or after the tables*
- E09: All numeric values must be ranges in the form min–max, not single exact numbers.
All forces must be ranges, e.g. 0.01–0.05.*
- E10: Reasoning (visual cues)
In the reasoning, briefly explain which folds, curl, or stiffness cues you used to estimate each direction.
Explain briefly which aspects of the shape (number and depth of folds, silhouette, fullness, etc.) led to your estimate.*

ПРИЛОЖЕНИЕ В**Результаты измерений светлой области в общей складчатой поверхности на пяти уровнях лекал
PLD**

Ткань	Уровень чертежа PLD	Коэффициент складчатости Δ	Доля светлой области %Area, %
F1	1	0.48	61.372
F1	2	0.67	51.924
F1	3	0.86	44.980
F1	4	1.05	43.841
F1	5	1.24	43.392
F2	1	0.48	69.747
F2	2	0.67	57.009
F2	3	0.86	48.268
F2	4	1.05	46.071
F2	5	1.24	43.443
F3	1	0.48	74.840
F3	2	0.67	68.705
F3	3	0.86	67.599
F3	4	1.05	62.199
F3	5	1.24	58.181