

Научный журнал «Костюмология» / Journal of Clothing Science <https://kostumologiya.ru>

2026, Том 11, № 3 / 2026, Vol. 11, Iss. 3 <https://kostumologiya.ru/issue-3-2026.html>

URL статьи: <https://kostumologiya.ru/PDF/13TLKL326.pdf>

2.6.16. Технология производства изделий текстильной и легкой промышленности (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Гетманцева, В. В. Методика калибровки цифровых двойников текстильных материалов на основе коэффициента драпируемости / В. В. Гетманцева, М. Ю. Андриевский, Н. А. Коробцева // Костюмология. — 2026. — Т. 11. — № 3. — URL: <https://kostumologiya.ru/PDF/13TLKL326.pdf>.

For citation:

Getmantseva V.V., Andrievskii M.Yu., Korobtseva N.A. A methodology for calibrating digital twins of textile materials based on the drape coefficient. *Journal of Clothing Science*. 2026;11(3): 13TLKL326. Available at: <https://kostumologiya.ru/PDF/13TLKL326.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 687.016.5:004.94

Гетманцева Варвара Владимировна

ФГБОУ ВО «Российский государственный университет имени А. Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство)», Москва, Россия

Профессор

Доктор технических наук, профессор

E-mail: getmantseva@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0441-3198>

Андриевский Максим Юрьевич

ФГБОУ ВО «Российский государственный университет имени А. Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство)», Москва, Россия

Аспирант

E-mail: maksim31920@gmail.com

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1261930

Коробцева Надежда Алексеевна

ФГБОУ ВО «Российский государственный университет имени А. Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство)», Москва, Россия

Профессор кафедры «Информационных технологий и компьютерного дизайна

Доктор технических наук, профессор

E-mail: rrr-home@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9895-6761>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=351679

Методика калибровки цифровых двойников текстильных материалов на основе коэффициента драпируемости

Аннотация. В статье представлена методика калибровки цифровых двойников нерастяжимых текстильных материалов, предназначенная для повышения достоверности виртуальной оценки формы плечевой одежды. Цель исследования — разработать доступную процедуру настройки цифрового материала по интегральному показателю драпируемости и проверить переносимость найденных параметров из дискового испытания в конструкцию изделия. Исследованы рубашечный оксфорд, джинсовая и пальтовая ткани, охватывающие диапазон поверхностной плотности от 135 до 422 граммов на квадратный метр. Для физических образцов коэффициент драпируемости определяли по оцифрованной горизонтальной проекции круглой пробы. В цифровой среде воспроизводили геометрию испытания, после чего методом

обратного подбора изменяли параметры жесткости при изгибе по основе и утку до достижения расхождения не более пяти процентов. Полученные цифровые двойники независимо проверяли на образцах плечевого изделия, изготовленных по единым лекалам. Одиннадцать экспертов сопоставляли физические и виртуальные образцы по количеству, локализации, направлению и характеру складок в трех контролируемых зонах. Расхождение коэффициентов драпируемости составило 4,35, 4,56 и 2,80 процента. Для джинсовой и пальтовой тканей получено полное совпадение существенных признаков складкообразования; для тонкого оксфорда полностью совпали локализация и направление крупных складок, тогда как различия относились к мелким складкам. Методика может применяться для подготовки цифровых материалов к инженерной оценке баланса, пропорций и класса формы плечевой одежды. Область применимости ограничена нерастяжимыми материалами и требует отдельного расширения для трикотажных полотен.

Ключевые слова: цифровой двойник; текстильный материал; драпируемость; виртуальная примерка; плечевое изделие; складкообразование; жесткость при изгибе; калибровка; валидация; автоматизированное проектирование

Введение

Трехмерные системы проектирования одежды позволяют оценивать силуэт, баланс, распределение объемов и характер складкообразования до изготовления материального образца. Их применение сокращает число натуральных примерок и связывает плоские лекала с прогнозируемой пространственной формой изделия [1]. В условиях цифровой трансформации швейной промышленности виртуальный прототип становится не только средством визуальной коммуникации, но и промежуточным объектом инженерного анализа [2].

Достоверность такого анализа определяется не только геометрией лекал и параметрами цифрового аватара. Существенную роль играет механическая модель материала: при одинаковой конструкции изменение жесткости при изгибе, поверхностной плотности, растяжимости и параметров расчетной сетки изменяет положение и масштаб складок. В отечественных исследованиях отмечается, что недостаточная точность задания свойств материалов остается одним из ограничений трехмерного проектирования [3], а сравнение реальных и виртуальных образцов нередко обнаруживает совпадение общей силуэтной формы при расхождении геометрии фалд и мелких складок [4].

Вопрос сопоставимости физической и виртуальной драпировки исследовался с применением различных программных систем. Сравнение площади проекции, числа узлов и формы складок показало, что совпадение одного интегрального показателя не всегда обеспечивает тождество всей картины драпировки [5]. В работах с использованием CLO3D подтверждена возможность установить связь между коэффициентом драпируемости физической ткани и ее цифровой модели, однако точность зависит от выбранных входных параметров и способа испытания [6; 7].

Современные подходы развиваются в двух направлениях. Первое связано с прямым измерением набора механических характеристик и их переводом в параметры программной среды. Второе основано на решении обратной задачи, когда параметры симуляции подбираются по наблюдаемому результату стандартного или модифицированного испытания. Для прогноза коэффициента драпируемости используются базы измерений и регрессионные модели [8], а для оценки совпадения реального и виртуального поведения — корреляционный и кластерный анализ [9; 10]. Сложность полной идентификации параметров и высокая стоимость специализированного оборудования делают актуальными упрощенные процедуры, сохраняющие достаточную точность для конкретной инженерной задачи.

В исследовании механических свойств тканых материалов показано, что метод определения исходных данных способен вносить систематическое смещение в результат симуляции [11]. Чувствительный анализ подтверждает преимущественное влияние жесткости при изгибе и поверхностной плотности на форму свободной драпировки, тогда как вклад других параметров зависит от структуры и растяжимости ткани [12]. Развиваются и методы автоматической оценки параметров по двумерному контуру дискового теста и сведениям о материале [13]. Тем не менее для применения виртуального прототипа при оценке плечевой одежды остается важным переход от совпадения круглой пробы к проверке поведения материала непосредственно в конструкции.

Гипотеза исследования заключается в том, что калибровка цифрового материала по интегральному коэффициенту драпируемости обеспечивает переносимость параметров при моделировании формы плечевой одежды без дополнительной настройки материала.

Цель исследования — разработать и апробировать методику калибровки цифровых двойников нерастяжимых текстильных материалов по интегральному показателю драпируемости и подтвердить пригодность откалиброванных моделей для виртуальной оценки формы плечевой одежды.

В отличие от процедур, ограниченных сопоставлением дисковых проб, предлагаемая методика включает независимую валидацию на изделии по признакам складкообразования в конструктивно обусловленных зонах.

Научная новизна состоит в разработке двухэтапной процедуры, объединяющей обратную калибровку цифрового материала по коэффициенту драпируемости и независимую валидацию на конструкции плечевого изделия.

1. Материалы и методы

1.1 Объекты исследования

Исследовали три нерастяжимых или малорастяжимых тканых материала, различающихся назначением и поверхностной плотностью: рубашечный оксфорд, джинсовую и пальтовую ткани. Такой набор позволил проверить процедуру на материалах, формирующих мелкие мягкие складки, складки среднего масштаба и крупные устойчивые складки. Перед испытанием образцы выдерживали 24 часа при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$ и относительной влажности $65 \pm 2\%$.

Поверхностную плотность определяли по трем пробам размером 100×100 мм, толщину — в пяти точках каждой пробы с последующим осреднением. Для каждого материала дисковое испытание выполняли трижды, поворачивая пробу относительно опорного диска. Характеристики материалов и результаты физического испытания приведены в таблице 1.

При подготовке проб фиксировали направление основы и утка. Первое испытание проводили при совмещении направления основы с условной продольной осью установки, последующие — после поворота пробы.

Такой порядок позволил учесть проявление анизотропии изгиба в интегральном контуре драпировки, не смешивая его с различиями положения камеры и опорного диска. Во всех сериях сохраняли высоту съемки, положение оптической оси и освещение. Контур выделяли после масштабирования изображения, поэтому ошибки, связанные с различием расстояния до камеры, не переносились в расчет площади.

Три повторных испытания не образуют выборку, достаточную для вывода о распределении показателя в генеральной совокупности, поэтому статистическая обработка имела описательный характер. Наряду со средним значением рассчитывали стандартное отклонение.

Таблица 1

Характеристики материалов и коэффициенты драпируемости физических образцов

№	Материал	Состав	Плотность, г/м ²	Толщина, мм	К _{ср} , %	s, %	V, %
1	Рубашечный оксфорд	хлопок 100 %	135	0,31	45,29	1,2786	2,82
2	Джинсовая ткань	хлопок 100 %	284	0,93	36,36	0,6798	0,62
3	Пальтовая ткань	шерсть / полиэстер 60/40	422	2,23	48,16	0,7780	1,46

К_{ср} — средний коэффициент драпируемости; s — стандартное отклонение; V — коэффициент вариации. Составлено автором

Низкие значения коэффициента вариации подтверждают воспроизводимость принятой процедуры на исследованных пробах.

1.2 Определение коэффициента драпируемости

Круглую пробу диаметром 200 мм укладывали на горизонтальный опорный диск диаметром 100 мм. Свисающая под действием собственного веса часть материала образовывала складки. Пробу фотографировали в плане после стабилизации, масштаб изображения устанавливали по видимому контуру диска, а площадь горизонтальной проекции определяли по оцифрованному контуру. Использование цифрового измерения площади вместо весового способа обеспечило единство измеряемой величины для физического и виртуального этапов.

Коэффициент драпируемости K определяли по выражению

$$K = (S_1 - S_2) / S_1 \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где:

S_1 — площадь исходного круга пробы;

S_2 — площадь горизонтальной проекции драпированной пробы.

В расчет включалась площадь опорного диска как для физического, так и для виртуального образца. Поэтому теоретический максимум принятого показателя при полном обвисании пробы равен 75 %, однако это не влияет на сопоставимость двух этапов, поскольку геометрия и формула остаются одинаковыми.

1.3 Калибровка цифрового двойника

В среде CLO3D для каждого материала выбирали библиотечный пресет, ближайший по типу ткани. В пресет вводили измеренные значения поверхностной плотности и толщины. Расстояние между частицами расчетной сетки устанавливали равным 7. Геометрию физического дискового испытания воспроизводили без масштабного изменения: цифровая круглая проба диаметром 200 мм размещалась на диске диаметром 100 мм, после чего выполнялась симуляция при включенной гравитации до достижения устойчивого состояния.

В качестве управляемых параметров приняли жесткость при изгибе по основе Bending-Warp и по утку Bending-Weft. Выбор связан с тем, что именно изгиб и поверхностная плотность в наибольшей степени определяют свободную драпировку нерастяжимых тканей [10–12]. Остальные параметры на калибровочном цикле не изменяли, что уменьшило размерность обратной задачи и сделало результат воспроизводимым.

Параметр Buckling Ratio сохраняли на уровне выбранного библиотечного пресета. Он влияет на характер потери устойчивости при сжатии и, следовательно, на очертание углов складок, однако его одновременное варьирование с двумя параметрами изгиба привело бы к неоднозначности обратного подбора: одинаковая площадь проекции могла быть получена

разными комбинациями трех переменных. Поэтому процедура построена иерархически. Сначала по измеренным плотности и толщине выбирается физически близкий пресет, затем по коэффициенту драпируемости уточняются только две направленные характеристики изгиба. Такая схема не претендует на полную идентификацию всех свойств ткани, но обеспечивает однозначный и повторяемый алгоритм в пределах заявленной задачи.

После каждой итерации измеряли площадь проекции виртуальной пробы, вычисляли Квирт по выражению (1) и относительное расхождение δK :

$$\delta K = |K_{\text{вирт}} - K_{\text{физ}}| / K_{\text{физ}} \cdot 100 \% \quad (2)$$

Если δK превышало 5 %, значения Bending-Warp и Bending-Weft изменяли с шагом 5 условных единиц и испытание повторяли. При $\delta K \leq 5 \%$ калибровочный цикл завершали, а набор параметров фиксировали как цифровой двойник конкретного материала. Порог 5 % выбран как инженерный критерий сопоставимости и является более строгим, чем расхождения, допускаемые в ряде исследований динамической деформации цифровой одежды [11]. Последовательность методики представлена на рисунке 1.

Направление изменения параметров определяли по знаку расхождения и наблюдаемой форме контура. Если виртуальная проба образовывала чрезмерно мягкую драпировку с уменьшенной площадью проекции, жесткость при изгибе увеличивали; при недостаточном прогибе и увеличенной площади — уменьшали. Раздельное изменение значений по основе и утку выполняли, когда контур демонстрировал выраженную направленность. После достижения порога сохраняли не только итоговый коэффициент, но и изображение проекции, поскольку две пробы с близкими площадями могут различаться количеством и направлением выступов. Визуальный контроль контура служил дополнительным условием приемки, хотя не использовался как числовой критерий остановки.

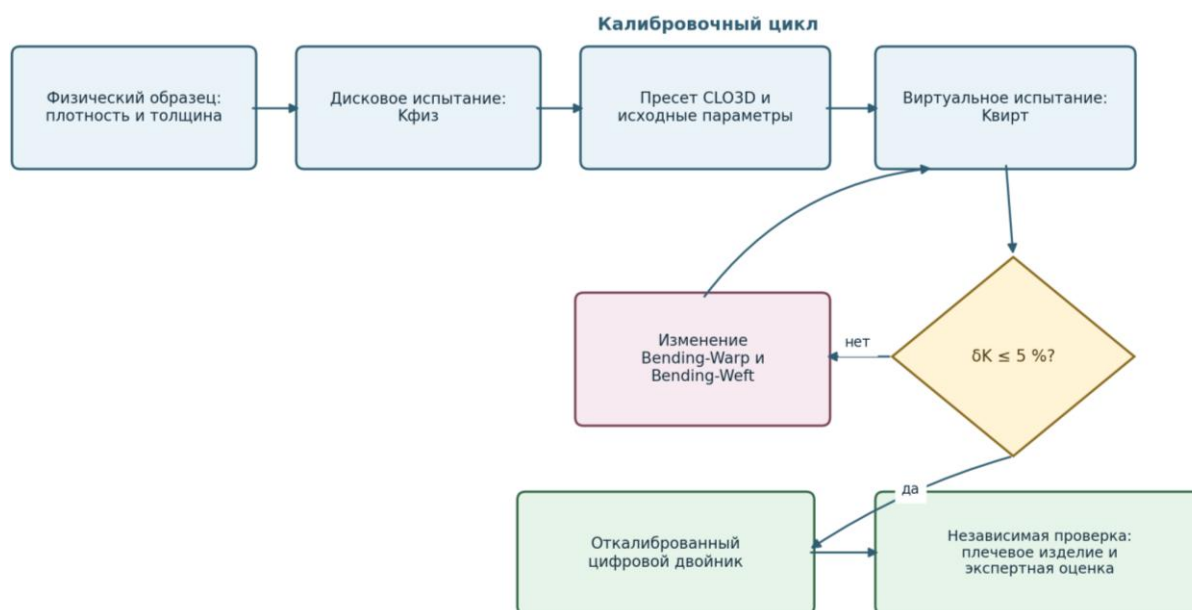


Рисунок 1. Алгоритм калибровки и независимой проверки цифрового двойника материала (разработано автором)

1.4 Независимая проверка на плечевом изделии

Совпадение коэффициента драпируемости круглой пробы подтверждает поведение материала при свободном изгибе, но не гарантирует совпадение формы в изделии. В конструкции на складкообразование дополнительно влияют конфигурация и соединение

деталей, направление нитей, краевые условия и взаимодействие с фигурой. Поэтому второй этап выполняли на плечевом изделии минимальной конструктивной сложности, состоящем из переда, спинки и втачного рукава.

По единым лекалам изготовили физические образцы из трех исследуемых материалов. Те же лекала импортировали в CLO3D и размещали на цифровом аватаре мужской фигуры 182-100-84. Для каждого материала применяли только параметры, полученные по дисковому тесту, без дополнительной подгонки по результату примерки. Физические и виртуальные образцы фиксировали спереди, сзади и сбоку при сопоставимом положении изделия.

Оценку проводили по трем контролируемым зонам: вертикальной складке у проймы переда, вертикальной складке у проймы спинки и наклонной складке в верхней части рукава. Эти зоны отражают распределение избыточной ширины стана и несовпадение направления верхнего среза рукава с направлением свободно опущенной руки. Для каждой зоны сравнивали четыре признака: количество складок, локализацию основания, направление оси и характер складки.

Под локализацией понимали положение основания складки относительно линии проймы, плечевого шва и уровня груди или спины. Направление задавали ориентацией видимой оси складки относительно вертикали изделия. Характер разделяли на мягкий и напряженный по совокупности очертаний: мягкая складка имеет криволинейную ось и плавную границу, напряженная — более прямолинейную ось между зонами приложения усилий и резко выраженную границу. Такое описание делает экспертную оценку операциональной и ограничивает произвольное понимание признаков.

В экспертной оценке участвовали 11 специалистов в области проектирования одежды с опытом работы от 5 до 20 лет (3 преподавателя профильных дисциплин и 8 практикующих конструкторов). Им предъявляли пары изображений физического и виртуального образцов, полученные с одинакового направления наблюдения; порядок пар был рандомизирован. Использовали трехбалльную порядковую шкалу: 2 балла — признак воспроизведен без наблюдаемых отличий; 1 балл — имеются отличия, не изменяющие общую картину складкообразования; 0 баллов — отличие изменяет общую картину либо признак отсутствует. Поскольку шкала порядковая, результат по признаку определяли медианой, а не средним арифметическим.

2. Результаты

2.1 Результаты дисковой калибровки

Для рубашечного оксфорда ближайшим библиотечным пресетом оказался Cotton_Oxford, для джинсовой ткани — Denim_Lightweight, для пальтовой — Wool. Калибровка потребовала соответственно пяти, двух и трех итераций. Итоговые значения параметров и полученные коэффициенты представлены в таблице 2.

Таблица 2

Итоговые параметры калибровки цифровых двойников

№	Пресет	Итерации	B-Warp	B-Weft	Buckling Ratio	Кфиз, %	Квирт, %	δК, %
1	Cotton Oxford	5	45	45	55	45,29	47,31	4,35
2	Denim Lightweight	2	70	20	25	36,36	38,06	4,56
3	Wool	3	30	30	55	48,16	49,42	2,80

Составлено автором

Во всех случаях заданный критерий выполнен: δК составило 4,35 % для рубашечного оксфорда, 4,56 % для джинсовой и 2,80 % для пальтовой ткани. На рисунке 2 сопоставлены

проекции физической и виртуальной драпировки. Совпадает не только интегральная площадь проекции, но и общий масштаб складок. Наиболее выраженное различие наблюдается у тонкого оксфорда, формирующего большее число мелких складок.

Число итераций не связано напрямую с поверхностной плотностью материала: оно определяется близостью выбранного пресета к реальному образцу и направлением требуемой корректировки. Для джинсовой ткани достаточно двух итераций, несмотря на наиболее выраженную разницу итоговых Bending-Warp и Bending-Weft. Для оксфорда потребовалось пять итераций при равных итоговых значениях по двум направлениям. Это показывает, что количество шагов не следует интерпретировать как характеристику сложности или качества ткани; оно является технологическим показателем конкретного начального приближения.

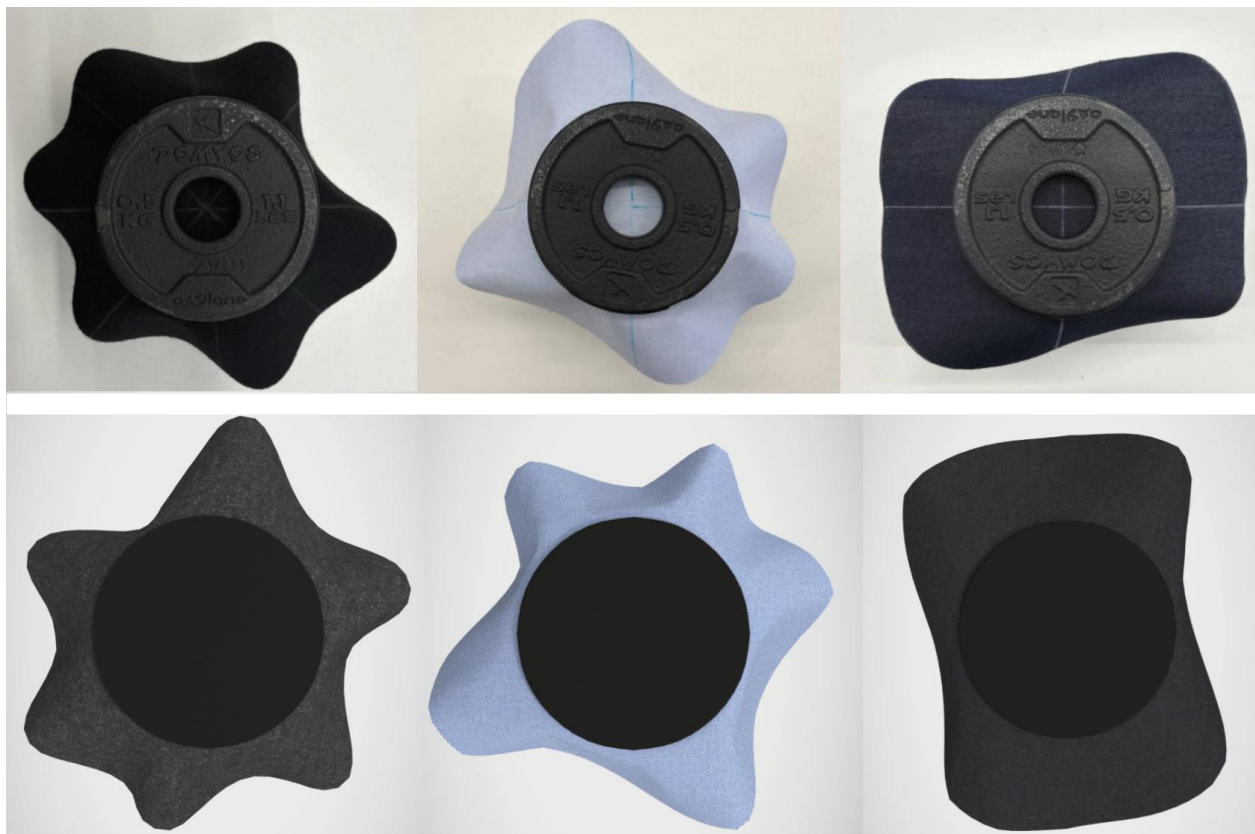


Рисунок 2. Сравнение драпировки физических (верхний ряд) и виртуальных (нижний ряд) образцов: а — пальтовая ткань; б — рубашечный оксфорд; в — джинсовая ткань (фото и виртуальные визуализации автора)

2.2 Результаты проверки в конструкции изделия

Медианные оценки по трем контролируемым зонам для каждого материала оказались одинаковыми, поэтому в таблице 3 они представлены компактно по материалам. Для джинсовой и пальтовой тканей все четыре признака получили по 2 балла. Для рубашечного оксфорда локализация и направление крупных складок совпали полностью, а количество и характер — частично. Доля оценок, совпавших с медианой, составила 73 % для количества складок, 91 % для локализации, 91 % для направления и 82 % для характера. Наибольшая вариативность экспертных суждений связана с подсчетом мелких складок тонкого материала. Локализация и направление определяются крупными формообразующими складками, поэтому по этим признакам согласованность максимальна.

Таблица 3

Медианные оценки сходства картины складкообразования

Материал	Количество	Локализация	Направление	Характер	Средний балл по зоне
Рубашечный оксфорд	1	2	2	1	1,5
Джинсовая ткань	2	2	2	2	2,0
Пальтовая ткань	2	2	2	2	2,0

Составлено авторами

Таблица 4

Согласованность экспертных оценок

Признак	Совпали с медианой	Отклонились от медианы	Доля совпадений, %
Количество складок	8	3	73
Локализация	10	1	91
Направление	10	1	91
Характер складки	9	2	82

Составлено авторами

Визуальное сопоставление образцов приведено на рисунке 3. Для джинсовой ткани совпадение достигнуто по всем признакам без дополнительной корректировки параметров после дискового теста. Пальтовая ткань дала аналогичный результат. У рубашечного оксфорда воспроизведены крупные вертикальные складки у пройм и наклонная складка рукава, но виртуальный образец содержит меньше мелких складок.

Физический образец	Виртуальный образец
Рубашечный оксфорд: физический образец	Рубашечный оксфорд: виртуальный образец
	
Джинсовая ткань: физический образец	Джинсовая ткань: виртуальный образец
	
Пальтовая ткань: физический образец	Пальтовая ткань: виртуальный образец
	

Рисунок 3. Сопоставление физических и виртуальных образцов плечевого изделия в трех проекциях (фото и виртуальные визуализации автора)

3. Обсуждение результатов

Полученные данные подтверждают, что интегральный коэффициент драпируемости может служить целевой функцией при обратном подборе изгибных параметров цифрового материала. Однако его следует рассматривать не как исчерпывающее описание механики ткани, а как компактный критерий, достаточный для настройки доминирующего поведения нерастяжимого материала под действием собственного веса. Подход согласуется с исследованиями, где изгибная жесткость названа одним из основных факторов виртуальной драпировки [7; 8; 10; 12].

Принципиальное значение имеет независимый этап на плечевом изделии. В известных работах сопоставление часто выполняется на свободно драпированной пробе или на изделии другого типа, например юбке, платье или рубашке [6; 9; 14]. В предлагаемой процедуре критерий калибровки и критерии валидации различаются: параметры подбираются по площади проекции круглой пробы, а проверяются по складкам, возникающим в результате взаимодействия материала, лекал и фигуры. Тем самым снижается риск получить цифровую модель, совпадающую с исходным тестом, но непригодную для оценки формы одежды.

Разделение калибровки и валидации также предотвращает скрытую подгонку. Если после просмотра виртуального изделия параметры материала корректировать до визуального совпадения с физическим образцом, итоговый результат будет описывать только проверяемую конструкцию и не позволит оценить переносимость настроек. В настоящем эксперименте все значения фиксировались до импорта лекал плечевого изделия. Поэтому оценки таблиц 3 и 4 характеризуют не качество ручной доводки конкретной примерки, а способность независимо настроенного цифрового материала воспроизводить формообразование в новых краевых условиях.

Лучшие результаты для джинсовой и пальтовой тканей объясняются масштабом их складок. При большей поверхностной плотности и жесткости формируется меньшее число крупных складок, размеры которых существенно превышают расстояние между частицами расчетной сетки. Для тонкого оксфорда часть складок имеет размер, сопоставимый с шагом сетки, поэтому сглаживается в симуляции. Подобная зависимость точности от массы ткани и дискретизации отмечалась в исследованиях физической и виртуальной драпировки [7; 10].

Частичное несовпадение мелких складок не препятствует решению заявленной задачи. При оценке формы объемного плечевого изделия ключевыми являются крупные складки, показывающие распределение объема, положение основания складки и направление ее оси. Именно эти признаки определяют баланс, пропорции и класс формы. Если задача требует воспроизведения фактуры, локальных заломов или визуального качества рекламного изображения, расчетную сетку следует сделать более плотной и расширить набор калибруемых параметров.

Практическое преимущество методики состоит в доступности. Для настройки не требуется полный комплекс испытаний. Необходимы измерения плотности и толщины, простой дисковый тест, оцифровка контура и последовательный подбор двух изгибных параметров. При этом методика не заменяет лабораторное определение свойств материала, если требуется расчет растяжения, давления, динамического поведения или контактного теплообмена. Исследования показывают, что область инженерной применимости виртуальной одежды должна задаваться отдельно для каждой измеряемой характеристики [15].

5. Ограничения исследования

Работоспособность методики подтверждена на трех материалах, поэтому полученные результаты не следует переносить на все тканые материалы без дополнительной проверки. Выборка охватывает характерный диапазон плотности для рубашечных, джинсовых и пальтовых

изделий, но не включает материалы со специальными покрытиями, выраженной анизотропией, ворсом или сложной многослойной структурой.

Методика разработана для нерастяжимых и малорастяжимых материалов. Для трикотажных полотен и эластичных тканей необходимо отдельно определять параметры растяжения по основе, утку и диагонали, а также учитывать нелинейность деформации. Значение Particle Distance, равное 7, обеспечивает приемлемый баланс точности и вычислительных затрат для оценки крупных складок, но ограничивает воспроизведение мелкого складкообразования.

Валидация выполнена в статическом положении и основана на экспертном сопоставлении изображений. В последующих исследованиях целесообразно дополнить ее инструментальным анализом трехмерных поверхностей, оценкой устойчивости складок при движении и повторной проверкой на расширенной выборке материалов и конструкций плечевой одежды.

Заключение

Разработана двухэтапная методика калибровки цифровых двойников нерастяжимых текстильных материалов. На первом этапе параметры жесткости при изгибе по основе и утку подбираются по условию соответствия коэффициента драпируемости физической и виртуальной круглых проб. На втором этапе откалиброванный материал независимо проверяется в конструкции плечевого изделия по четырем признакам складкообразования.

Для рубашечного оксфорда, джинсовой и пальтовой тканей расхождение коэффициентов драпируемости составило соответственно 4,35, 4,56 и 2,80 %, то есть во всех случаях не превысило заданного порога 5 %. Для джинсовой и пальтовой тканей достигнуто полное совпадение количества, локализации, направления и характера складок во всех контролируемых зонах. Для тонкого оксфорда полностью совпали локализация и направление крупных складок; различия ограничены их количеством и мелкомасштабным характером.

Результаты дают основание применять откалиброванные цифровые двойники исследованной группы материалов для виртуальной оценки баланса, пропорций и класса формы плечевой одежды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sayem A.S.M., Kennon R., Ahmed H. 3D garment simulation technology and its application in fashion and textiles // Textiles. 2021. Vol. 1, no. 2. P. 322–347. DOI: 10.3390/textiles1020016.
2. Akhtar W., Watanabe C., Tou Y., Neittaanmaki P. A new perspective on the textile and apparel industry in the digital transformation era // Textiles. 2022. Vol. 2, no. 4. P. 633–656. DOI: 10.3390/textiles2040037.
3. Никитина Л. Л., Гаврилова О. Е. Проблемы и перспективы в 3D-проектировании одежды с применением современных цифровых технологий // Костюмология. 2025. Т. 10. № 1. URL: <https://kostumologiya.ru/PDF/03TLKL125.pdf>.
4. Евдущенко Е. В., Фот Ж. А. Апробация методики оценки визуализации свойств текстильных материалов в САПР Assyst // Костюмология. 2022. Т. 7. № 3. EDN: MJTRNE.
5. Buyukaslan E., Jevšnik 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. DOI: 10.1108/IJCST-06-2017-0085.

6. Ashmawi B.A., Hassouna A.G., Nasr Eldine N., El-Newashy R.F. CLO3D simulation versus real drape test for assessment of garment drape coefficient // Journal of Textiles, Coloration and Polymer Science. 2021. Vol. 18, no. 2. P. 263–271. DOI: 10.21608/jtcps.2022.151108.1130.
7. Youn S., Knowles C.G., Mills A.C., Mathur K. Comparative study of physical and virtual fabric parameters: physical versus virtual drape test using commercial 3D garment software // The Journal of The Textile Institute. 2025. Vol. 116, no. 1. P. 33–46. DOI: 10.1080/00405000.2024.2314273.
8. Kim H., Kim S., Park C.K. Prediction of fabric drape coefficient using simple measurement method // Journal of Engineered Fibers and Fabrics. 2023. Vol. 18. DOI: 10.1177/15589250231174610.
9. 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. Art. 21. DOI: 10.1186/s40691-024-00587-1.
10. 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. Art. 102077. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102077.
11. Mahnić Naglić 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. Art. 2013. DOI: 10.3390/polym17152013.
12. Schiller M., Flohr S., Delmas J.M. et al. Evaluating material parameter influence on drapability using VStitcher // Engineering Proceedings. 2025. Vol. 67. Art. 83. DOI: 10.3390/engproc2025067083.
13. Ju E., Kim K.-Y., Yoon S. et al. Estimating cloth simulation parameters from tag information and Cusick drape test // Computer Graphics Forum. 2024. Vol. 43, no. 2. Art. e15027. DOI: 10.1111/cgf.15027.
14. Koo D.S., An J.S., Yoon H.J. Classification and analysis of fabric types for shirts: a comparison between virtual and real fabrics // Journal of Engineered Fibers and Fabrics. 2024. Vol. 19. DOI: 10.1177/15589250241262318.
15. Psikuta A., Jaeger M.-H., Mark A. et al. CLO3D fashion design software — a perspective for virtual thermal modelling of garments // Proceedings of 3DBODY.TECH 2019. 2019. P. 126-133. DOI: 10.15221/19.126.

Getmantseva Varvara Vladimirovna

Russian State University named A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art), Moscow, Russia
E-mail: getmantseva@inbox.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0441-3198>

Andrievskii Maksim Yurevich

Russian State University named A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art), Moscow, Russia
E-mail: maksim31920@gmail.com
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=1261930

Korobtseva Nadezhda Alekseevna

Russian State University named A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art), Moscow, Russia
E-mail: rrr-home@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9895-6761>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=351679

A methodology for calibrating digital twins of textile materials based on the drape coefficient

Abstract. The article presents a calibration method for digital twins of non-stretch textile materials intended to improve virtual assessment of upper-body garment shape. The study aimed to develop an accessible procedure for adjusting a digital material by an integral drape indicator and to test whether the calibrated parameters remain valid when transferred from a disk test to a garment. Cotton Oxford shirting, denim, and coating fabrics with surface densities from 135 to 422 grams per square meter were investigated. The physical drape coefficient was determined from a digitized horizontal projection of a circular sample. The test geometry was reproduced in a virtual environment, and warp and weft bending parameters were adjusted by inverse selection until the discrepancy did not exceed five percent. The digital twins were independently verified using upper-body garment samples made from identical patterns. Eleven experts compared physical and virtual samples by the number, location, direction, and character of folds in three controlled zones. The drape coefficient discrepancies were 4,35, 4,56, and 2,80 percent. Denim and coating fabrics showed full agreement for all essential fold features. For the lightweight Oxford fabric, the location and direction of major folds coincided, while differences were limited to small-scale folds. The method supports evaluation of garment balance, proportions, and shape class. Its scope is limited to non-stretch materials and requires separate extension for extensible textiles.

Keywords: digital twin; textile material; drapability; virtual fitting; upper-body garment; fold formation; bending stiffness; calibration; validation; computer-aided design