

ПРОБЛЕМЫ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ ТКАНЕЙ ДЛЯ РЕАЛИСТИЧНОЙ ЦИФРОВОЙ ОДЕЖДЫ

PROBLEMS OF VIRTUAL FABRICS GENERATING FOR REALISTIC DIGITAL CLOTHING

В.Е. КУЗЬМИЧЕВ¹, Е.В. РУМЯНЦЕВ¹, В.М. БУЗНИК²

V.E. KUZMICHEV¹, E.V. RUMYANTSEV¹, V.M. BUZNIK²

¹Ивановский государственный политехнический университет,

²Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова Российской академии наук)

(Ivanovo State Polytechnic University,

²Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences)

E-mail: wkd37@list.ru

Рассмотрены два направления в проектировании виртуальных двойников текстильных материалов: для получения необходимой объемно-пространственной формы одежды и достижения эстетического эффекта в статических условиях (3D симуляция) и для обеспечения нейропсихологического комфорта в динамических условиях (4D симуляция). Показано, что существующие 3D САПР достаточно полно воспроизводят поведение виртуальных тканей в пространстве с помощью набора из единичных показателей физико-механических свойств. Для 4D проектирования необходимы показатели свойств текстильных материалов, измеренные в условиях непосредственного контакта с участками фигур. Такая база данных, формализующая обратную реакцию человека на воздействие текстильных материалов, составит основу проектирования дружественной человеку комфортной одежды.

Two directions in virtual twins of textile materials designing are considered: firstly, to obtain the necessary three-dimensional shape of clothing and to achieve an aesthetic effect in static (3D simulation) and secondly, to provide neuropsychological comfort in dynamic (4D simulation). It is shown that existing 3D CAD systems sufficiently reproduce the behaviour of virtual textiles using a set of single indicators of physical and mechanical properties. For 4D design, indicators of textile materials properties, measured under conditions of direct contact with areas of the figures, are required. Such a database, which formalizes a person's feedback on the impact of textile materials, will form the basis for designing comfortable, human-friendly clothing.

Ключевые слова: текстильный материал, одежда, виртуальный двойник, свойства, 3D, 4D.

Keywords: textile material, clothing, virtual twin, properties, 3D, 4D.

Трехмерная симуляция цифровой одежды включает использование сразу нескольких виртуальных двойников мягкотельных объектов: человеческой фигуры,

текстильных материалов и плоских разверток деталей, из которых будет состоять одежда, а также некоторых твердотельных аксессуаров типа пуговиц, молний и др.

Современные системы 3D проектирования одежды предлагают примерно одинаковые сценарии генерирования систем «аватар фигуры - одежда» с различной степенью реалистичности и адекватности материальным системам [1]. В зависимости от областей применения эти системы ориентированы на разные ситуации:

- поисковое дизайн-проектирование несуществующей одежды (т.н. цифровая одежда);

- презентация созданной одежды (перевод реально существующей одежды в виртуальную форму);

- стилизованная условная одежда для индустрии игр.

К этим виртуальным объектам предъявляют разные требования.

Процессы развития систем 3D проектирования активизируются под влиянием нескольких факторов, основными из которых являются: кастомизация (потребность в одежде индивидуального дизайна с качественной посадкой на фигуре), потребность проведения примерок перед онлайн-покупкой, а также развитие компьютерных игр. Во всех случаях необходимо генерирование сначала цифровых, а затем на их основе виртуальных двойников текстильных материалов как важного элемента будущей системы. Данный процесс является одним из самых сложных ввиду структурной неоднородности исходного текстильного материала, анизотропии свойств и разнообразия вариантов его поведения во время перехода из плоского состояния в объемное. Ткань на поверхности человеческой фигуры приобретает сложную объемно-пространственную форму под влиянием целого комплекса физико-механических свойств и действия гравитации. Результирующая форма может включать несколько зон:

- 1) зона, повторяющая пластику фигуру и находящаяся на ее опорной поверхности. Для формообразования в этой зоне используют разные виды виртуальных двойников человеческих фигур (сканатары, аватары типовых фигур или стилизованные);

- 2) зона, повторяющая принудительно измененную пластику фигуры под влия-

нием компрессионной одежды;

- 3) зона свободного формообразования, лежащая ниже опорной поверхности, в которой форма одежды не зависит от пластики и морфологии фигуры.

Чтобы воспроизвести поведение одежды из конкретной ткани в виртуальной среде, помимо характеристик исходной ткани, необходимы характеристики новых образований, которые возникают в местах соединения деталей (например, жесткость швов) или их усиления дополнительными слоями (например, формуемость и формоустойчивость).

Целью данной статьи является анализ нынешнего состояния научных и прикладных исследований в области генерирования цифровых двойников тканей и трикотажных полотен и определение направления их совершенствования на основе комплексных исследований, выполненных на кафедре конструирования

Современное состояние получения виртуальных двойников тканей в 3D среде

Нынешние требования к виртуальному двойнику текстильного материала включают следующий перечень характеристик, которые должны быть аналогичны характеристикам материальных прототипов: колористическое оформление; фактура поверхности, включая переплетение; внешний вид в момент драпирования на поверхности шара (самый распространенный прием визуального представления материальной и виртуальной ткани). Для воспроизведения первых двух характеристик, относящихся к внешнему виду ткани, используют системы сканирования с последующей обработкой визуальных изображений средствами компьютерной графики [2, 3].

Наиболее сложным является процесс воспроизведения пространственного поведения реальной ткани. Формообразование реальной одежды происходит под влиянием сразу нескольких факторов, набор которых зависит от формы и структуры одежды. В реальных процессах конструирования и технологии изготовления учитывают следующие единичные показатели

геометрических, физико-механических и структурных свойств:

- при разработке объемно-пространственной формы одежды:

- 1) драпируемость,
- 2) жесткость при изгибе;

- при разработке формы и размеров плоских деталей, из которых состоит одежда:

3) растяжимость при одноосном нагружении (выделены три группы материалов по растяжимости, влияющие на конструкцию деталей) [4],

4) изменение угла между нитями основы и утка или петельными столбиками под действием сдвигающих нагрузок,

5) толщина,

6) изменение линейных размеров после тепловых обработок.

Существуют и другие показатели, учитываемые при раскрое, изготовлении одежды и соединении отдельных деталей друг с другом, которые не входят в перечень этой номенклатуры, но могут отражать специфику перерабатываемых тканей (например, перекос нитей утка, наличие линейно-графического орнамента и др.). Все перечисленные показатели не взаимосвязаны между собой, а их правильный учет при разработке формы одежды и деталей требует определенной квалификации визуализатора одежды.

В международном стандарте ISO 20947-2:2020(E) обозначены следующие показатели физических свойств текстильных материалов, которые контролируют при их симуляции: растяжимость, жесткость при изгибе, сопротивление сдвигу, толщина, поверхностная плотность [5]. Косвенное влияние перечисленных свойств также учитывают при оценке виртуальной системы «аватар-одежда» по следующим показателям: растяжение одежды на отдельных участках, воздушный зазор между аватаром и одеждой, наличие складок.

Существующие подходы к симуляции пространственной формы текстильных материалов в виртуальной среде можно разделить на три группы: геометрический (моделирование оболочки на основе гео-

метрических примитивов), физический (моделирующий текстильный материал как комбинацию огромного числа тонких силовых элементов с определенной энергией на основе метода конечных элементов [6-9], конечных объемных моделей [10], частичных системных моделей [11-12]) и гибридный. Частичная системная модель является простейшим и эффективным подходом к симуляции тканей как набора вершин полигональной сети в случаях больших перемещений и небольших деформаций.

Воспроизведение поведения ткани в зоне свободного формообразования в виртуальной среде должно базироваться на комплексном учете множества характеристик, которые должны быть установлены, должны влиять на конечный результат, быть параметризованы и включены в математическую модель формообразования.

Наибольшее количество исследований посвящено именно самому важному и визуально воспринимаемому показателю – драпируемости текстильных материалов под действием гравитации [13]. Поведению виртуальных тканей предшествуют экспериментальные исследования с материальными пробами. В [14] было проведено сравнение двух оценок драпируемости – коэффициента драпируемости и числа возникающих складок – непосредственно на приборе Cusick и косвенно путем расчета по показателям растяжимости, изгиба и сдвига в программной среде Optitex. На рис. 1 показаны фотографии реальных и виртуальных драпированных проб из тканей разного состава: а – 85 % лен, 15 % полиамид, б – 98 % хлопок, 2 % эластан).

Установлено, что виртуальная симуляция не полностью соответствует реальной драпируемости из-за игнорирования изменений на микроуровне волокон. Хотя разность в количестве складок составляет всего 7,2 %, а коэффициент драпируемости 6,3 %, глубина складок и их распределение отличаются довольно сильно, что визуально воспринимается как нереалистичное моделирование.

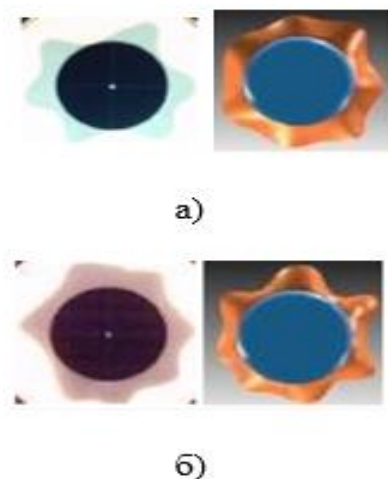


Рис. 1

Изменение формы поверхности плоской детали является результатом проявления показателей физико-механических свойств. Для их параметризации используют разные измерительные комплексы.

Самым распространенным и научно обоснованным является измерительный комплекс KES-F (Kawabata's Evaluation System for Fabrics) (Япония). Ввиду его распространенности во всем мире и широкого применения с 1988 года сформирована огромная база данных практически обо всех видах материалов, поэтому его использование является разумным и оправданным [3]. Единственным осложняющим фактором является высокая стоимость и необходимость проведения проверок только сертифицированными специалистами.

Альтернативой японской системе является система экспресс-измерения аналогичных показателей физико-механических свойств FAST (Fabric Assurance by Simple Testing).

Разработчики трехмерных САПР, предвидя эти сложности, предлагают свои методы измерения единичных показателей с помощью более простых комплексов. САПР CLO работает вместе с инструментальным комплексом KIT для экспресс-метода измерения единичных показателей. На рис. 2 показано окно модуля выбора показателей свойств тканей в программе CLO 3D (версия 5.0.156.38765, CLO Virtual Fashion, Корея).

После изменения значений единичных показателей (рис. 1) можно добиться их соответствия параметрам реальной ткани, ко-

торая предварительно должна быть испытана или на комплексе KIT, являющемся приложением к программе CLO 3D, или на комплексе Кавабата. Все показатели физико-механических свойств соответствуют стандартизированным схемам измерений или имеют аналоги в международной системе ASTM.



Рис. 2

САПР VIDYA (Германия) предлагает использовать не инструментальные экспресс-методы для определения комплекса показателей. Экспресс-методы достаточно просты, не требуют специальных приборов и моделируют особенности процесса формообразования одежды и образования складок. На рис. 3 показаны схемы испытания некоторых показателей, которые в дальнейшем используют для получения виртуального двойника (а – измерение компрессии скорости возникновения складок на поверхности, б – измерение способности к изгибу и прогнозирование размеров складок).

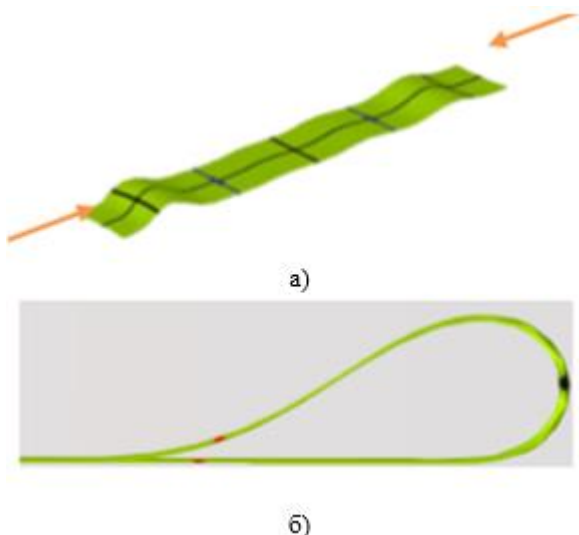


Рис. 3

В каждой САПР заложены свои алгоритмы цифровой модели ткани и ее применения в виртуальном двойнике, которые могут отличаться конечной формой виртуальной модели одежды.

В качестве примера рассмотрим внешний вид одного и того же комбинезона, сгенерированного в САПР Browzwear [16], Style 3D [17] и CLO [18]. Для получения виртуального комбинезона использована общая исходная информация: структура и конструкция изделия, ткань (85 % полиэстер, 15 % эластан, поверхностная плотность 112 г/м², коэффициент трения 0,2, толщина 0,23 мм). Испытание ткани проводили с помощью разных измерительных комплексов Browzwear, SEDDI и VIZOO. Измеряли следующие показатели: поверхностную плотность (mass), фрикционные характеристики (friction), толщину (thickness), жесткость при изгибе (bend), растяжимость (stretch), линейность растяжения (stretchlinearity), усилие сдвига (shear) и линейность сдвига (shearlinearity). Результаты измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Показатель	Значение показателя, измеренное с помощью измерительного комплекса			Вариация, %
	Browzwear	SEDDI	VIZOO	
Жесткость по основе, сН/см	35,1	37,6	28,7	26
Жесткость по утку, сН/см	43,1	44,5	33,8	26
Растяжимость по основе, %	214,6	1383,4	173,6	198
Растяжимость по утку, %	327,8	2157,3	303,1	197
Усилие сдвига, сН/град	31,2	65,8	28,8	88

На рис. 4 показаны результаты моделирования: а – внешний вид драпированной

ткани; б – виртуальные комбинезоны, сгенерированные в САПР Browzwear, Style 3D, CLO; в – боковые контуры.



Рис. 4

Как видно из приведенного примера, все показатели относятся к группе физико-механических свойств. Очевидно, что используемые разные схемы испытаний приводят к получению разных показателей одних и тех же свойств: вариация значений достигает 198 %. Несмотря на кажущееся сходство виртуальных моделей (рис. 4, б) необходимо констатировать наличие явных различий между виртуальными двойниками. В силуэтах брюк не везде сохраняется горизонтальность линии низа и форма бокового контура (рис. 4, в). Форма бокового контура зависит от глубины складок, а их расположение, глубина, длина и количество также имеют отличия. Верхние части комбинезонов несколько отличаются в области талиевых складок. Расхождения вызваны многослойностью в местах расположения складок.

В целом для получения статичной виртуальной одежды разработанные алгоритмы получения виртуальных двойников тканей на основе совокупности показателей физико-механических свойств обеспечивают пока удовлетворительные результаты в условиях поискового дизайн-проектирования.

Проблемы получения виртуальных двойников в среде 4D

Ощущение комфорта в процессе ношения одежды зависит от ее конструктивного устройства и свойств применяемых материалов, проявляющихся в одежде именно под влиянием конструктивных решений. В конструировании степень учета свойств материала (например, растяжимости, драпируемости, способности повторять или изменять пластику поверхности фигуры и др.) зависит от опыта проектировщика.

Развитие искусственного интеллекта делает реалистичными алгоритмы решения некоторых задач без участия человека, которые ранее казались недостижимыми. Развитие так называемого гуманистического (human friendly) дизайна одежды ставит задачу наделения аватара способностью реагировать на те раздражения, которые может вызвать одежда [19]. Нейропсихологическая реакция человека на внешние раздражения может иметь разные причины: несоответствие одежды отдельным участкам фигуры, которая может ощущаться при вы-

полнении движений; тактильный контакт поверхности ткани с кожными рецепторами, чрезмерное давление одежды на кожные покровы. Эти реакции преимущественно возникают в зонах одежды, повторяющих пластику фигуру и находящихся на ее опорной поверхности или в зоне принудительного изменения пластики фигуры.

Характеризуя эти обратные нейропсихологические реакции, заметим, что они должны быть учтены на новом этапе развития виртуального проектирования. Такие требования возникают именно в среде 4D, которая предполагает учет реакции на динамические изменения в системе «аватар-одежда». Для развития 4D моделирования необходимы не твердотельные аватары, а мягкотельные манекены, имитирующие реакцию реальных людей на внешние раздражения. Образы таких манекенов для воспроизведения динамических эффектов в системе 4D показаны на рис. 5: а – динамический аватар во время сгибания конечностей и растяжения кожных покровов, б – перемещение мягких тканей под влиянием компрессионной одежды.



Рис.5

Повышение уровня проектирования до 4D столкнется с необходимостью моделирования более сложных динамических деформаций тканей. Основным отличием 4D проектирования от 3D является обязательное наличие формализованной обратной связи от человека после воздействия одежды. Очевидно, что существующие схемы испытаний тканей с помощью инструментов не

позволят сформировать весь объем необходимой информации. На помощь должен прийти сенсорный анализ взаимодействия одежды и человека и описание его результатов в виде формализованных зависимостей с использованием новых показателей.

Для реализации дружественного человеку дизайна необходимо будет измерять показатели свойств текстильных материалов непосредственно на участках фигур, с которыми будет контактировать одежда. Однако такая база данных в виде новых методик измерения, критериев для оценки показателей и формулирования выводов, формализованных зависимостей между показателями свойств текстильных материалов и нейропсихологическими реакциями человека еще не сформирована. Без такой базы, основанной на качественно иной технологии измерения показателей свойств тканей, невозможно качественное и реалистичное виртуальное проектирование трехмерных систем «фигура-одежда».

Отметим наиболее важные результаты, достигнутые в направлении исследований текстильных материалов и реакции на них реальных людей.

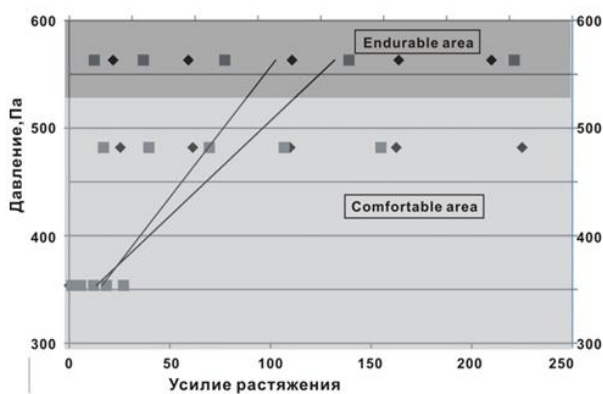


Рис. 6

На рис. 6 показаны совмещенные зависимости, полученные при параллельных испытаниях проб ткани на растяжение «нагрузка-удлинение» и измерении давления на фигуру женских платьев с разной степенью объемности. На рис. 6 область между прямыми показывает разброс значений [20]. С увеличением усилия растяжения ткани на участке, на котором она

плотно облегает фигуру, возрастает давление: вначале давление воспринимается как комфортное (comfortable area), а потом как непереносимое (endurable area).

Очевидно, что этот простой пример показывает ограничения в растяжении ткани в одежде с позиций не ее внешнего вида, а реакции человека и подтверждает необходимость контроля деформации тканей именно на основе реакции человеческого тела.

Подобный подход использован для обоснования выбора трикотажных материалов для компрессионной одежды [8]. Предложен новый показатель – коэффициент компрессии CP , который вычисляют после измерения на поверхности человеческого тела давления под растянутой текстильной оболочкой. Коэффициент компрессии отражает способность материала создавать компрессионное давление на виртуальный двойник фигуры. Новый показатель характеризует отношения между максимальным удлинением трикотажных материалов (%) и давлением сжатия (кПа). На основе этого показателя все трикотажные материалы разделены между четырьмя уровнями:

- 1) очень высокий уровень компрессии $CP \geq 0,12$;
- 2) высокий уровень компрессии $0,09 \leq CP < 0,12$;
- 3) средний уровень компрессии $0,06 \leq CP < 0,09$;
- 4) низкий уровень компрессии $CP \leq 0,06$.

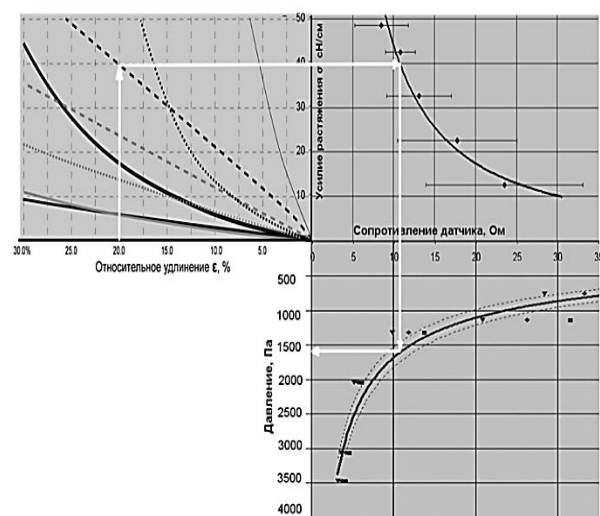


Рис. 7

На рис. 7 показана зависимость, объединяющая изменение растяжения трикотажных полотен под влиянием приложенной нагрузки с их способностью создавать давление на мягкие ткани человека. Графики согласуют синхронное растяжение трикотажных материалов и создаваемое ими компрессионное давление на кожные покровы. Датчик располагался между телом и трикотажным материалом, и с его помощью проводили измерения разных физических величин – силы и давления [21].

Эти два примера показывают, что моделирование воздействий текстильных материалов в виртуальной среде должно учитывать физиологические особенности, которыми должен быть наделен виртуальный манекен (аватар):

реагировать на гриф и туше материала (испытывать ощущение тепла или холода при соприкосновении с текстильным материалом);

испытывать сопротивление при выполнении основных эргономических движений;

реагировать на компрессионное давление, в том числе в зонах, в которых повышенное давление недопустимо (шея, грудные железы, паховая область, икра);

реагировать на избыточную массу одежды.

На основе перечисленных обратных реакций могут быть внесены конструктивные изменения в виртуальную одежду. Такие нейropsихологические данные должны дополнить существующие базы данных, рассмотренные в первой части статьи, и составить новое информационное обеспечение 4D проектирования. Изучение воздействия текстильных материалов на кожные покровы должно стать новым этапом развития технологий виртуального проектирования и наполнения его уже не только эстетическим, но и гуманистическим содержанием.

1. Существующая номенклатура показателей физико-механических свойств тканей достаточна для проектирования статичной виртуальной одежды в среде 3D.

2. Переход от 3D к 4D виртуальному проектированию динамических систем «фигура-одежда» потребует разработки новых методов испытаний тканей, деформации которых должны быть согласованы с эргономическими позами, динамическими приростами к размерным признакам фигуры и обратной нейropsихологической реакцией человека на внешние раздражения, возникающие между телом и тканью.

3. 4D виртуальное проектирование с реализацией концепции «гуманистический дизайн» потребует проведения комплексных испытаний с использованием инструментальных методов и сенсорного анализа для формирования новой базы данных об особенностях взаимодействия в системе «человек-одежда» и ее включения в модули для выбора виртуальных текстильных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Kuzmichev V., Yan J.* The Application of Digital Twins in the Field of Fashion. In: Lv, Z., Fersman, E. (eds) *Digital Twins: Basics and Applications*. Springer, Cham. 2022. Pp. 45...57.
2. *Moskvin A.YU., Moskvina M.A., Kuzmichev V.E.* Digital twins of textile materials for visualization of historical costumes // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2022. №2(398). P. 86...93.
3. *Liu K., Zhou S., Chun Zhu, Lü Z.* Virtual simulation of Yue Opera costumes and fashion design based on Yue Opera elements // *Fashion and Textiles*, 2022. – <https://doi.org/10.1186/s40691-022-00300-0>
4. *Digital Manufacturing Technology for Sustainable Anthropometric Apparel*: Edited by Norsaadah Zakaria, The Textile Institute Book Series. Elsevier, Woodhead Publishing, 2022, pp. 40...41.

5. ISO 20947-2:2020(E). Performance evaluation protocol for digital fitting systems. Part 2: Virtual garment.
6. *Jevšnik S., Geršak J.* Modelling a fused panel for a numerical simulation of drape // *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 2004, 1, pp. 47...52.
7. *Chen B., Govindaraj M.* A Physically Based Model of Fabric Drape Using Flexible Shell Theory // *Textile Research Journal*, 1995, 6, pp. 324...330.
8. *Collier J.R., Collier B.J., O'Toole G., Sargand S.M.* Drape Prediction by Means of Finite-element Analysis // *Journal of The Textile Institute*, 1991, 1, pp. 96...107.
9. *Ascough J., Bez H.E., Bricis A.M.* A Simple Beam Element, Large Displacement Model for the Finite Element Simulation of Cloth Drape // *Journal of the Textile Institute*, 1996, 1, pp. 152...165.
10. *Hu J., Chen S.* Numerical Drape Behavior of Circular Fabric Sheets Over Circular Pedestals // *Textile Research Journal*, 2000, 7, pp. 593...603.
11. *Breen D. E., House D. H. & Wozny M. J.* A Particle-Based Model for Simulating the Draping Behavior of Woven Cloth // *Textile Research Journal*, 1994, 11, pp. 663...685.
12. *Provot X.* Deformation Constraints in a Mass-Spring Model to Describe Rigid Cloth Behavior: In proceeding Graphics Interface, 1995, pp. 147...154.
13. *Ji F., Li R., Qiu Y.* Three-dimensional Garment Simulation Based on a Mass-Spring System // *Textile Research Journal*, 2006, 1, pp. 12...17.
14. *Jevšnik S., Pilar T., Drujic D. etc.* The study of fabric drape behavior in the virtual environment // *The International Istanbul Textile Congress*. 2013, Istanbul, Turkey.
15. Kawabata evaluation system: https://en.wikipedia.org/wiki/Kawabata_evaluation_system/ (дата обращения: 22.10.2023)
16. Browzwear: <https://browzwear.com/> (дата обращения: 22.10.2023)
17. Style 3D: www.style3d.com (дата обращения: 22.10.2023).
18. CLO: www.clo3d.com (дата обращения: 22.10.2023).
19. *Guo M.N., Kuzmichev V.E.* Pressure and comfort perception in the system "female body-dress" // *AUTEX research journal*, 2013, 13(3), pp. 71...78.
20. *Kuzmichev V., Cheng Z., Adolphe D.C.* Development of knitted materials selection for compression underwear // *AUTEX Research Journal*, 2017, vol.17, No.2, p. 177...187.
21. *Kuzmichev V., Tislenko I., Adolphe D.* Virtual design of knitted compression garments based on bodyscanning technology and the three-dimensional to-two-dimensional approach // *Textile Research Journal*, 2018. – <https://doi.org/10.1177/0040517518792722>
1. *Kuzmichev V., Yan J.* The Application of Digital Twins in the Field of Fashion. In: *Lv, Z., Fersman, E. (eds) Digital Twins: Basics and Applications.* – Springer, Cham. 2022. C. 45...57.
2. *Moskvin A.* Digital twins of textile materials for visualization of historical costumes // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti.* 2022, №2(398). P. 86...93.
3. *Liu K, Zhou S., Chun Zhu, Lü Z.* Virtual simulation of Yue Opera costumes and fashion design based on Yue Opera elements // *Fashion and Textiles*, 2022, <https://doi.org/10.1186/s40691-022-00300-0>
4. *Digital Manufacturing Technology for Sustainable Anthropometric Apparel: Edited by Norsaadah Zakaria, The Textile Institute Book Series.* -Elsevier, Woodhead Publishing, 2022, pp. 40...41.
5. ISO 20947-2:2020(E). Performance evaluation protocol for digital fitting systems. Part 2: Virtual garment.
6. *Jevšnik S., Geršak J.* Modelling a fused panel for a numerical simulation of drape // *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 2004, 1, pp. 47...52.
7. *Chen B., Govindaraj M.* A Physically Based Model of Fabric Drape Using Flexible Shell Theory // *Textile Research Journal*, 1995, 6, pp. 324...330.
8. *Collier J.R., Collier B.J., O'Toole G., Sargand S.M.* Drape Prediction by Means of Finite-element Analysis // *Journal of The Textile Institute*, 1991, 1, pp. 96...107.
9. *Ascough J., Bez H. E., Bricis A.M.* A Simple Beam Element, Large Displacement Model for the Finite Element Simulation of Cloth Drape // *Journal of the Textile Institute*, 1996, 1, pp. 152...165.
10. *Hu J., Chen S.* Numerical Drape Behavior of Circular Fabric Sheets Over Circular Pedestals // *Textile Research Journal*, 2000, 7, pp. 593...603.
11. *Breen D.E., House D.H. & Wozny M.J.* A Particle-Based Model for Simulating the Draping Behavior of Woven Cloth // *Textile Research Journal*, 1994, 11, pp. 663...685.
12. *Provot X.* Deformation Constraints in a Mass-Spring Model to Describe Rigid Cloth Behavior: In proceeding Graphics Interface, 1995, pp. 147...154.
13. *Ji F., Li R., Qiu Y.* Three-dimensional Garment Simulation Based on a Mass-Spring System // *Textile Research Journal*, 2006, 1, pp. 12...17.
14. *Jevšnik S., Pilar T., Drujic D. etc.* The study of fabric drape behavior in the virtual environment // *The International Istanbul Textile Congress*. 2013, Istanbul, Turkey.
15. Kawabata evaluation system: https://en.wikipedia.org/wiki/Kawabata_evaluation_system/ (дата обращения: 22.10.2023)

16. Browzwear: <https://browzwear.com/>(дата обращения: 22.10.2023)

17. Style 3D: www.style3d.com (дата обращения: 22.10.2023).

18. CLO: www.clo3d.com (дата обращения: 22.10.2023).

19. *Guo M.N., Kuzmichev V.E.* Pressure and comfort perception in the system “female body–dress” // AUTEX research journal, 2013, 13(3), pp.71...78.

20. *Kuzmichev V., Cheng Z., Adolphe D.C.* Development of knitted materials selection for compression

underwear // AUTEX Research Journal, 2017, vol.17, No.2, p.177...187.

21. *Kuzmichev V., Tislenko I., Adolphe D.* Virtual design of knitted compression garments based on bodyscanning technology and the three-dimensional to-two-dimensional approach // Textile Research Journal, 2018. –

<https://doi.org/10.1177/0040517518792722>

Рекомендована кафедрой конструирования швейных изделий ИВГПУ. Поступила 27.10.23.