

На правах рукописи

Аль–Абу Джаиаш Кусай Махди Хамдиан

**АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ЗАХВАТА И ПОДАЧИ ТЕКСТИЛЬНЫХ
МАТЕРИАЛОВ ВАКУУМНЫМИ ЗАХВАТНЫМИ ОРГАНАМИ МАШИН
ТЕКСТИЛЬНОЙ И ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Специальность

2.5.21. – Машины, агрегаты и технологические процессы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна»

Научный руководитель: **Усов Алексей Георгиевич**,
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», профессор кафедры машиноведения

Официальные оппоненты: **Рымкевич Павел Павлович**,
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования "Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского" Министерства обороны РФ, профессор кафедры физики

Волков Владимир Васильевич,
кандидат технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный технологический университет», профессор кафедры автоматизации и управления

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», г. Москва

Защита диссертации состоится 12 декабря 2023 года в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.385.04 на базе ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 18, ауд. № 437.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 190068, Санкт-Петербург, Вознесенский пр., д. 46, <http://www.sutd.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.385.04

кандидат технических наук

Антонова Ирина Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В современном производстве текстильной и легкой промышленности большое количество технологических операций связано с перемещением листового материала, как правило, представленного в виде деталей кроя из ткани, кожи, обувного картона и т.п. Чаще всего указанные операции осуществляются оператором вручную. Для повышения производительности работы оборудования, улучшения качества выпускаемой продукции требуется автоматизация процессов захвата, отделения гибких листовых деталей из стопки, перемещения их в пространстве и размещения листовых материалов в зоне обработки. Большое значение имеют также задачи автоматизации складирования готовых изделий, удаление отходов, представленных гибкими листовыми материалами. Автоматизация подобных технологических операций связана с необходимостью решения задач моделирования захвата и подачи гибкого листового материала, определения формы захваченного гибкого листа в пространстве, его укладки на рабочем столе.

Текстильный лоскут как механическая система является оболочкой. Для исследования деформаций листов, как правило, используют математические модели оболочек, основанные на некоторых априорных представлениях (гипотезах) о поведении структурных элементов оболочки. Чаще всего математические модели деформаций листов имеют вид системы нелинейных дифференциальных уравнений. Их численное решение является сложной и трудоемкой задачей и усложняется необходимостью выполнения дополнительных условий (неразрывность и нерастяжимость срединной поверхности, отсутствие ее самопересечений и др.). Математическое моделирование формы гибкого листового материала может быть осуществлено без использования трудоемких операций, связанных с решением дифференциальных уравнений, описывающих оболочку. Например, применение оптимизационного метода моделирования формы гибкого листового материала, основанного на поиске экстремума целевой функции, позволяет сократить трудоемкость вычислений, что особенно важно в задачах управления рабочими органами автоматизированных устройств, в том числе в режиме реального времени.

Исходя из сказанного, разработка методов моделирования формы гибких листовых материалов, используемых в производствах текстильной и легкой промышленности, применительно к задачам разработки захватных устройств при проектировании автоматизированных рабочих мест, оснащенных устройствами подачи, перемещения в пространстве и размещения в зоне обработки деталей кроя представляется важной и актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Среди механических и математических моделей гибких листовых материалов особую сложность имеют модели текстильных образцов. Модели тканей создаются на основе теории композитов, вязкоупругих сред, методов частиц, теории оболочек. Обзор принципов моделирования тканей и полученных на их основе моделей приведен в обзорах Хау и Сахари (Y. C. Hou, K. S. M. Sahari), Хаута, Этцмуса и Штрассера (M. Hauth, O. Etmuss, W. Strasser). Компьютерное моделирование ткани на основе метода частиц описано в работах В. В. Ландовского, Эберхардта (В. Eberhardt), Бараффа (D. Baraff). Моделирование тканей на основе безмоментной теории оболочек представлено в работах Е. В. Поляковой. Основные положения общей теории оболочек

представлены В. В. Новожиловым, А. В. Погореловым, И. Н. Векуа. Свойства разветвляющихся поверхностей исследованы П. К. Рашевским.

Решения задач о больших изгибах упругих оболочек путем численного интегрирования системы дифференциальных уравнений представлены в работах Хангана (Т. Hangan), Е. Л. Старостина (Е. L. Starostin), Серды (E. Cerda), Махадевана (L. Mahadevan), Уиттена (Т. А. Witten). Введение в рассмотрение дополнительных ограничений на форму деформирующейся оболочки значительно усложняет решение системы уравнений ее равновесия. Оптимизационные приемы расчета равновесных форм упругих тяжелых оболочек нашли применение в работах А. Г. Усова. Описание методов решения экстремальных задач можно найти в трудах Ф. П. Васильева, В. И. Струченкова.

Цели и задачи работы. Цель диссертации – разработка методики, математических моделей и алгоритмов для решения задач по определению форм текстильных лоскутов, захватываемых вакуумными захватными устройствами.

При реализации поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Анализ устройств, работающих с деформируемыми текстильными листовыми материалами, в частности, в швейном производстве. Изучение вакуумных устройств для захвата и перемещения таких материалов.

2. Экспериментальное исследование процессов захвата и сброса текстильных лоскутов вакуумными воронками различных диаметров и плоскими захватами с отверстиями.

3. Разработка методики, математического, алгоритмического и программного обеспечения для поиска оптимальной конической формы изгиба изотропного или анизотропного текстильного лоскута произвольной формы, втянутого в вакуумную воронку.

4. Разработка алгоритмов и программ для ЭВМ поиска оптимальной формы сложного конического изгиба лоскута со множеством соприкасающихся складок.

5. Разработка методов моделирования срединной поверхности комбинированного типа, соответствующего лоскуту, захваченному плоским вакуумным захватом с отверстиями.

6. Разработка математических моделей и алгоритмов для поиска оптимальной формы торсового или цилиндрического изгиба краев лоскута, удерживаемого плоским захватом.

7. Разработка математических моделей приближенных форм изгиба с целью изучения динамики сброшенного из захвата лоскута.

8. Разработка инженерных рекомендаций для расчета подъемной силы вакуумного захвата и для исследования взаимодействия его с воронкой с воронкой.

9. Разработка инженерных рекомендаций для определения коэффициента драпируемости текстильного материала и его изгибной жесткости.

Методы исследований. При выполнении диссертационной работы использованы методы линейной алгебры, математического анализа, дифференциальной геометрии, механики, теории оболочек, нелинейного программирования, компьютерного моделирования в среде компьютерной математики MATLAB.

Соответствие Паспорту научной специальности. Диссертационная работа выполнена в рамках Паспорта научной специальности 2.5.21 – Машины, агрегаты и

технологические процессы ВАК Министерства науки и высшего образования РФ и соответствует следующим его пунктам.

1. Разработка научных и методологических основ, технических и технологических требований к проектированию и созданию новых машин, агрегатов и технологических процессов.

2. Разработка и исследование технологических процессов механизации производства в соответствии с современными и перспективными требованиями, технологиями, качества и надежности, промышленной и экологической безопасности.

4. Исследования параметров машин и агрегатов и их взаимосвязей при комплексной механизации основных и вспомогательных процессов и операций с использованием моделирования, численных и физических экспериментов.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что:

– выполнены исследования геометрических свойств торсовой и конической развертывающихся поверхностей применительно к моделированию изгиба текстильных лоскутов;

– разработаны математические модели для исследования конического изгиба текстильного лоскута произвольной формы, а также сложного конического изгиба со множеством складок;

– разработаны методы и алгоритмы для компьютерной обработки изображения развертки лоскута произвольной формы;

– разработаны методы и алгоритмы для компьютерного моделирования конической поверхности втянутого в воронку лоскута по эскизу его края;

– предложен метод исследования взаимодействия вакуумной воронки с захваченным лоскутом.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость выполненных в диссертационной работе исследований заключается в том, что разработаны методы проектирования оптимальных форм изгиба упругих тяжелых текстильных лоскутов, помещенных в вакуумные захваты. Срединная поверхность лоскута проектируется в виде многогранной поверхности, деформация которой описывается на основе матричных преобразований. Выполнено обобщение результатов экспериментов по захвату текстильных лоскутов вакуумными захватами. Предложены способы моделирования сложных форм изгиба захваченных лоскутов путем расчета потенциальной энергии многогранной модели изогнутого листа. Сформулированы критерии оптимальности моделей изогнутых листов для разных случаев их захватов с учетом неразрывности, нерастяжимости и отсутствия самопересечений моделируемых поверхностей. Исследованы формы срединной поверхности листа в различных случаях его захвата и влияние способа захвата листа на форму его изгиба.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

1) разработаны алгоритмы и пакеты программ для ЭВМ, позволяющие моделировать изгиб текстильных лоскутов, помещенных в вакуумные захваты разных видов;

2) разработанные программы могут быть использованы для проектирования автоматизированных устройств, перемещающих текстильные материалы с помощью вакуумных захватов;

3) созданы алгоритмы и компьютерные программы для решения специальных задач компьютерной геометрии применительно к цифровой обработке изображений лоскутов;

4) предложены способы компьютерного расчета коэффициента драпируемости и изгибной жесткости текстильного материала.

Материалы диссертации используются для выполнения научно-исследовательских работ и в учебном процессе в Санкт-Петербургском государственном университете промышленных технологий и дизайна при подготовке бакалавров и магистров.

Положения, выносимые на защиту:

– математические модели срединных поверхностей текстильных материалов;
– оптимизационные методы расчета равновесных форм текстильных деталей, захваченных вакуумными захватами;

– методы компьютерной геометрии для исследования изображений текстильных лоскутов, подвергающихся деформации в процессе их захвата и перемещения захватными органами;

– методы изучения взаимодействия вакуумных захватов с захватываемыми текстильными образцами на основе компьютерных моделей деформированных образцов.

Степень достоверности результатов подтверждается натурным экспериментом, обоснованным применением методов математического моделирования, нелинейной механики, аналитического и численного решения математических моделей, применением классических положений механики машин, теории оболочек, дифференциальной геометрии.

Апробация результатов работы. Результаты работы докладывались на научных конференциях «Инновации молодежной науки» (СПбГУПТД, Санкт-Петербург, 2022, 2023 гг.). Материалы диссертации используются для выполнения научно-исследовательских работ и в учебном процессе в Санкт-Петербургском государственном университете промышленных технологий и дизайна при подготовке бакалавров и магистров направлений подготовки 15.03.02 и 15.04.02.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликованы 3 научные статьи в изданиях из «Перечня ...» ВАК РФ и получены 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка использованных источников из 116 наименований. Работа выполнена на 178 страницах, включая 140 рисунков и 3 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности темы работы, сформулированы цели и задачи исследования, определена научная новизна и практическая значимость результатов работы.

В первой главе выполнен обзор источников информации об автоматизированном перемещении лоскутов ткани и их формах. Сформулированы цель и задачи исследования.

Рассмотрены современные автоматизированные устройства, выполняющие захваты и перемещения текстильных материалов к рабочим органам машин, в ос-

новном в швейном производстве. Акцентированы возникающие при этом проблемы, вызванные податливостью и воздухопроницаемостью текстильных материалов: обеспечение надежного удержания изделия в захвате при действии на него сил тяжести и сил инерции, обеспечение отрыва лоскута от опорной поверхности, захват лишних листов при подаче изделий из стопки и другие.

Рассмотрены разные модели тканей. Изучены решения задач о больших изгибах оболочки, предложенные М. В. Белубекином, Е. Л. Старостиним, Ван дер Хейдженом, Э. Сердой, Л. Махадеваном и Д. Пасини.

Исследованы геометрические свойства разворачивающихся поверхностей, в частности, торсовой поверхности (рисунок 1). Установлено, что необходимая для расчета формы поверхности нормальная кривизна срединной поверхности оболочки определяется выражением $k_{g,n} = -d\beta/ds$, где β – угол поворота касательной к поверхности плоскости вокруг образующей при изменении натурального параметра s направляющей. Моделью гладкой поверхности служит многогранная поверхность, задаваемая множеством углов $\Delta\alpha_1, \Delta\alpha_2, \dots, \Delta\alpha_{N-1}$ между образующими на ее плоской развертке и множеством углов $\Delta\beta_1, \Delta\beta_2, \dots, \Delta\beta_{N-1}$ между гранями. Сформулирована задача построения равновесной модели текстильного лоскута как оболочки путем поиска минимума целевой функции задачи. Поиск осуществляется методом наискорейшего спуска в пространстве варьируемых переменных $\{\Delta\alpha_k, \Delta\beta_k\}$. Целевая функция U имеет структуру

$$U = U_e + U_g + U_{straf},$$

где U_e – упругая потенциальная энергия листа, U_g – гравитационная энергия листа в поле сил тяжести, U_{straf} – штраф за невыполнение дополнительных условий задачи (отсутствие самопересечений срединной поверхности и др.).

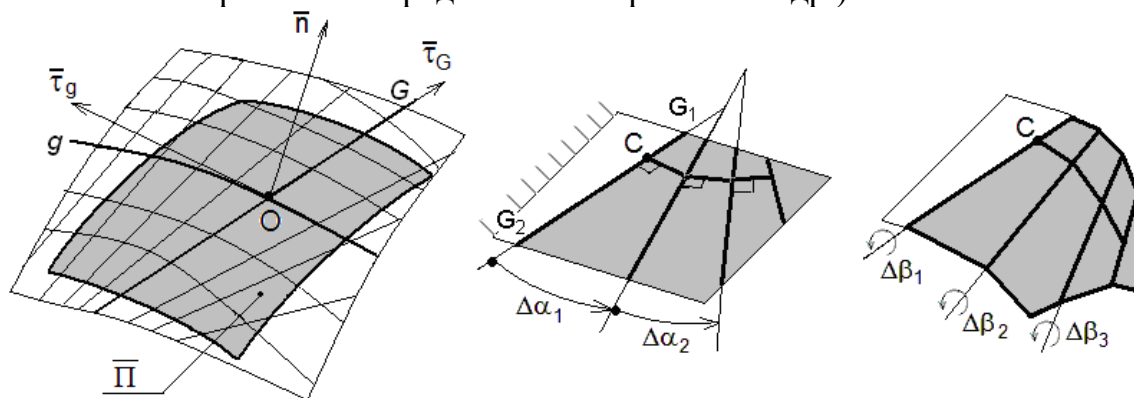


Рисунок 1 – Торсовая поверхность и ее модель

Во второй главе описаны результаты экспериментов по захвату, перемещению и сбросу больших текстильных листов и малых лоскутов вакуумными захватами различных типов (рисунок 2). Описаны ситуации, когда срединная поверхность захваченного лоскута является цилиндрической, конической, торсовой или комбинированной, состоящей из разворачивающихся фрагментов разных видов.

Особое внимание уделено случаю изгиба лоскута, срединная поверхность которого принимает коническую форму (рисунок 3).

Упругую энергию k -ой грани предложено искать по формуле

$$U_{e,k} = 0.125D \frac{(\Delta\beta_k + \Delta\beta_{k+1})^2}{\Delta\alpha_k} \ln \frac{R_{g,k}}{R_{p,k}}$$

где $\{\Delta\alpha_k\}$, $\{\Delta\beta_k\}$ - углы между образующими и углы между гранями, $R_{g,k}$ - радиус кругового сектора, равновеликого грани, $R_{p,k}$ - радиус сингулярной области вокруг вершины конуса в пределах данной грани.

Установлено, что лоскут, захваченный плоским круглым захватом с отверстиями, имеет форму накидки, наброшенной на выпуклый диск (рисунок 4). В конце главы рассмотрены примеры и принципы моделирования торсовых и цилиндрических форм изгиба свешивающихся фрагментов лоскута.

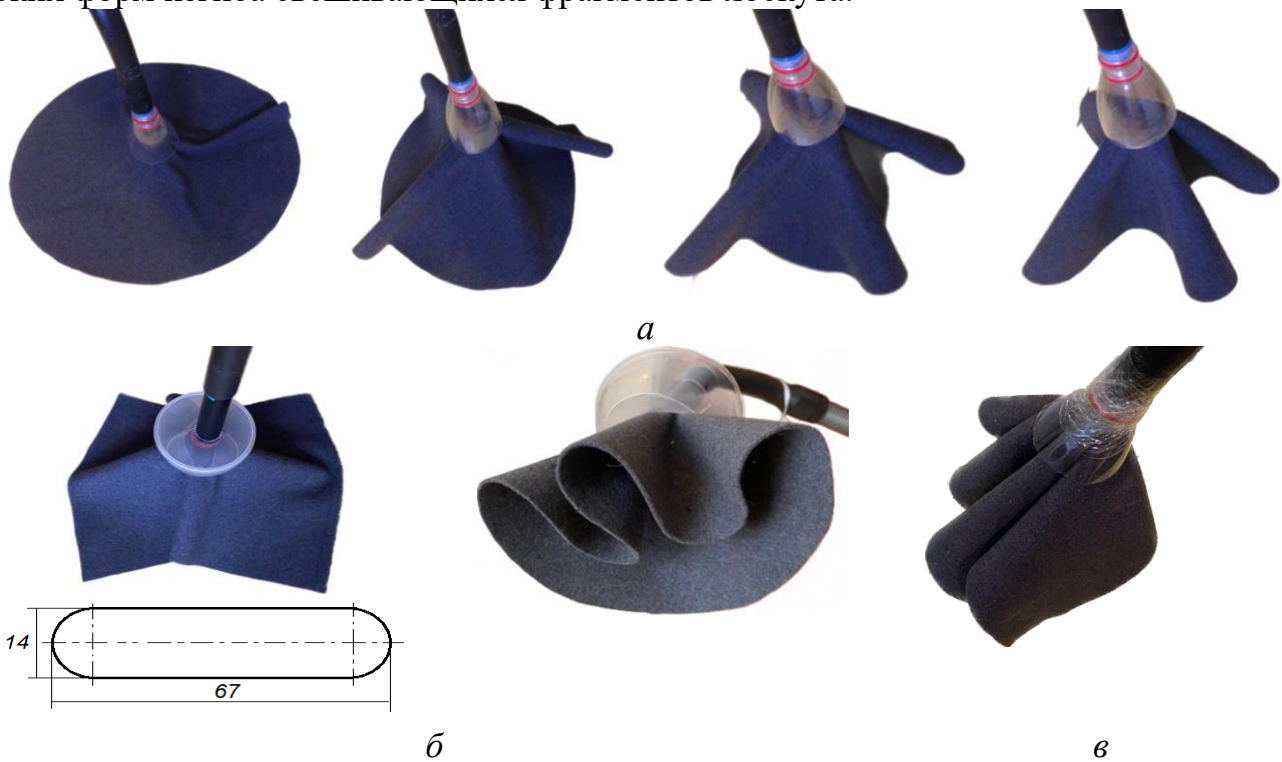


Рисунок 2 – Захват лоскута драпа круглой и щелевой вакуумной воронкой: *а* – процесс захвата круглого куска драпа диаметром 750 мм воронкой диаметром 85 мм с линолеума; *б* – лоскуты в гибком щелевом захвате; *в* – сложный конический захват воронкой

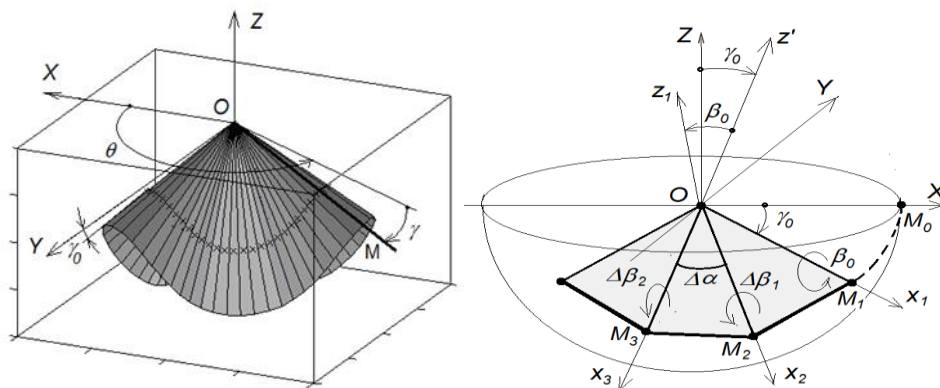


Рисунок 3 – Моделирование конической поверхности

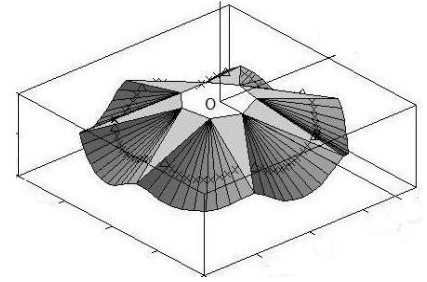
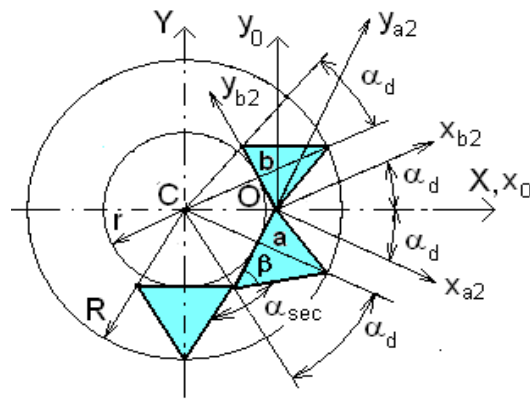


Рисунок 4 – Захват лоскута плоским захватом. Моделирование накидки

В третьей главе выполнено компьютерное моделирование симметричного изгиба круглого лоскута драпа радиусом $R = 20$ см. Материал считается квази-изотропным с усредненной изгибной жесткостью $D = 1,275 \text{ кг}\cdot\text{см}^2/\text{с}^2$. Срединная поверхность имеет коническую форму с количеством k_{sec} одинаковых секторов, в которых образуются складки. Установлено, что среди моделей с числом k_{sec} от 1 до 30 оптимальной является 4-секторная модель (рисунок 5). Она имеет в равновесном состоянии минимальную энергию сравнительно с формами, имеющими другое количество секторов. Этот факт подтверждается опытами (рисунок 6).

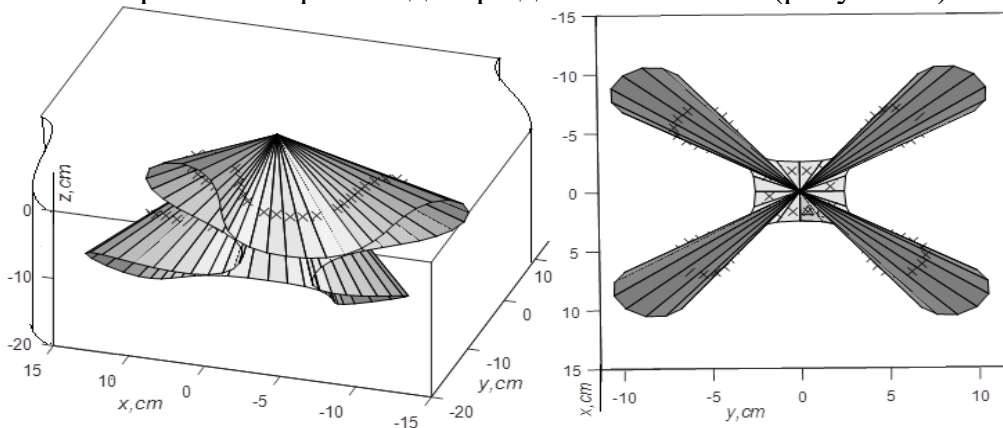


Рисунок 5 – Компьютерная 4-секторная оптимальная форма симметричного изгиба круглого лоскута драпа

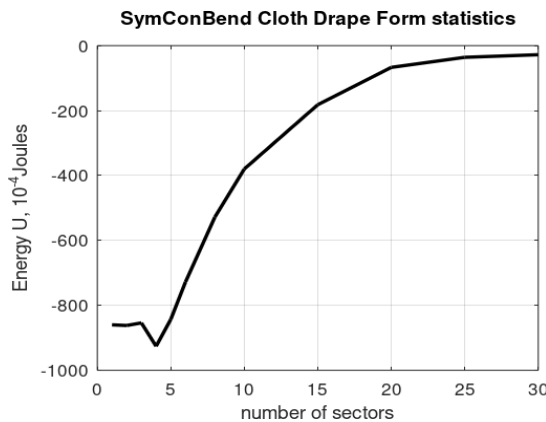


Рисунок 6 – Статистика многосекторных форм изгиба круглого лоскута (а); 4-секторный конус в эксперименте (б).

Исследован конический изгиб прямоугольных лоскутов, в частности, квадратных. Установлено на основании натуральных и компьютерных экспериментов, что прямоугольная форма лоскута провоцирует 4-секторный изгиб. Исследованы семейства выпуклых (когда поверхность представляется выпуклая при взгляде сверху на середины сторон) и вогнутых форм изгиба. Полученные модели соответствуют формам изгиба в натуральных экспериментах (рисунок 7).

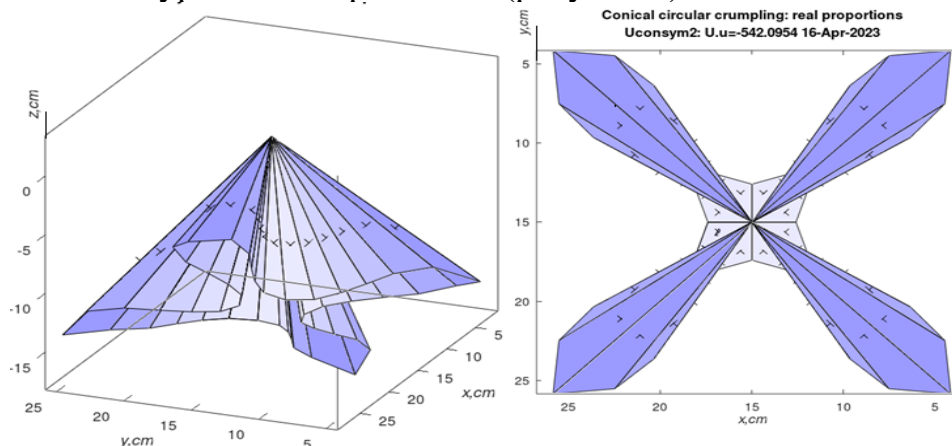


Рисунок 7 - Выпуклая модификация изгиба лоскута размерами 20 x 20 см

Решена задача моделирования формы асимметричного конического изгиба анизотропного лоскута, захваченного вакуумной воронкой. Для этого создана и запатентована программа `bendconasym`. На примере заданного изображения лоскута и положения центральной точки захвата построена развертка конической поверхности (рисунок 8) и ее трехмерная модель, согласующаяся с экспериментом (рисунок 9).

Решена задача моделирования сложной многоскладчатой формы конического изгиба лоскута, захваченного вакуумной воронкой на большую глубину, для чего создана и запатентована программа `bendconvacsim`. С помощью этой программы воспроизведена сложная форма изгиба лоскута драпа, полученная опытным путем (рисунок 10). Для этого создан файл с эскизом края лоскута, который обработан с целью векторизации точек края. В основе этого процесса – оптимальный подбор ближайших к очередной точке края ее ближайших соседних точек.

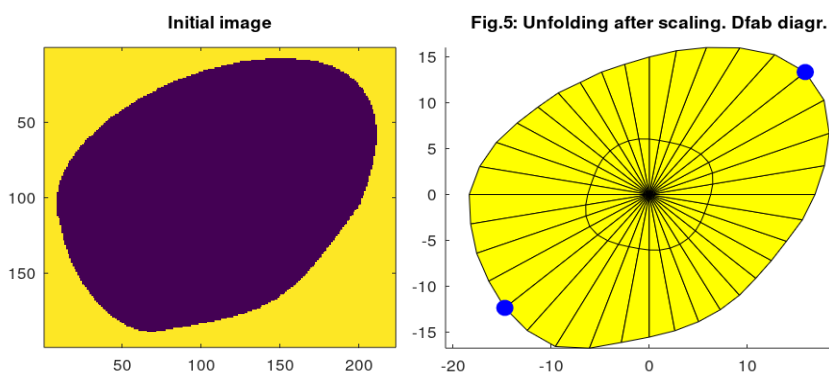


Рисунок 8 – Исходное изображение лоскута и его развертка с диаграммой изгибной жесткости

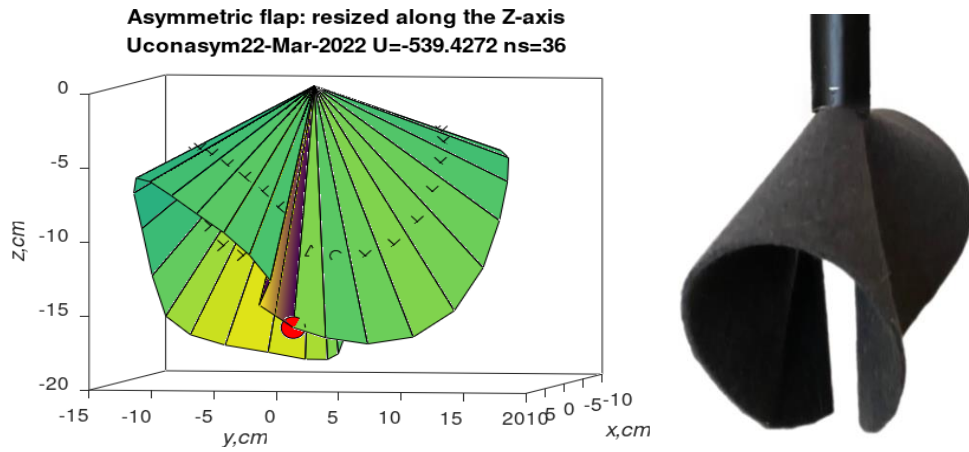


Рисунок 9 – Компьютерная модель асимметричного изгиба.
Опытная форма асимметричного изгиба

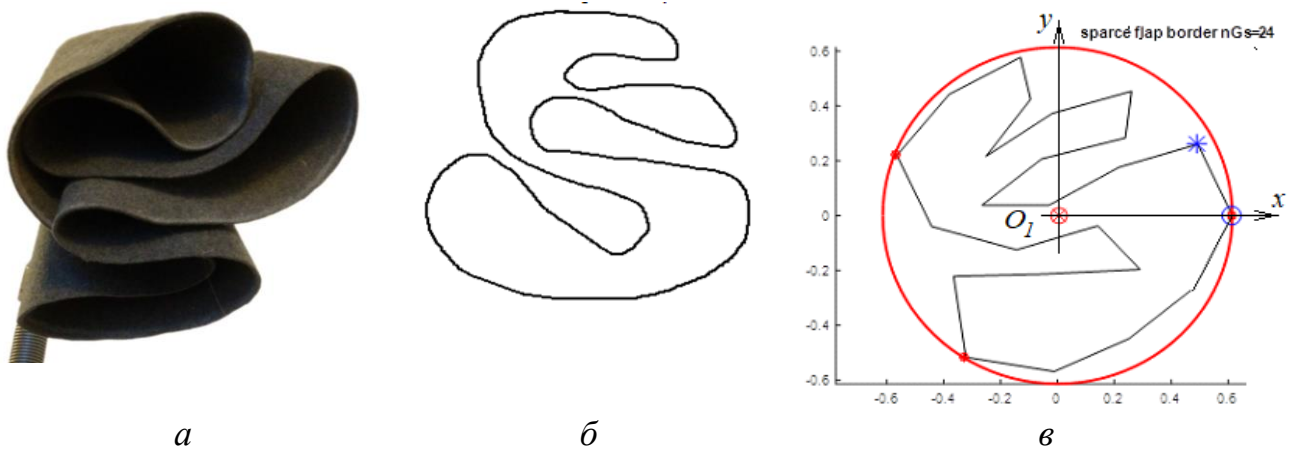


Рисунок 10 – Сложный изгиб втянутого в воронку лоскута (а); плоский эскиз края лоскута (б); начальная модель края лоскута внутри воронки (в).

Создана механическая модель вакуумного захватного устройства, в котором действие всасывающих сил имитируется грузом заданного веса (рисунок 11). Установлена связь между точками плоского образа края лоскута и точками края на сфере. В результате оптимизационного счета получена трехмерная модель сложного конического изгиба лоскута драпа, согласующаяся с экспериментом.

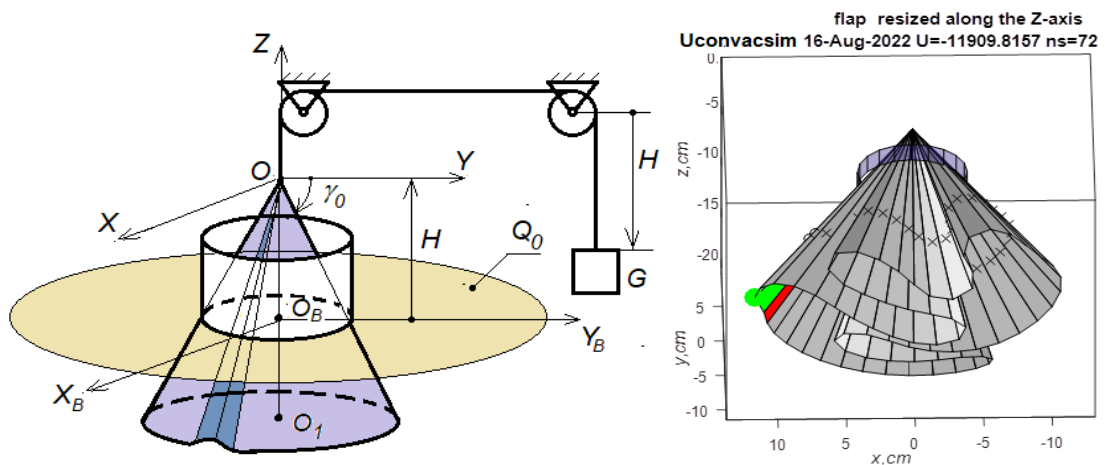


Рисунок 11 – Имитация действия вакуума грузом.
Трехмерная модель сложного изгиба лоскута

Выполнено моделирование комбинированных форм изгиба лоскута, захваченного плоским сетчатым захватом. Созданы и исследованы модели изгиба в форме накидки, хорошо согласующиеся с экспериментами (рисунок 12).

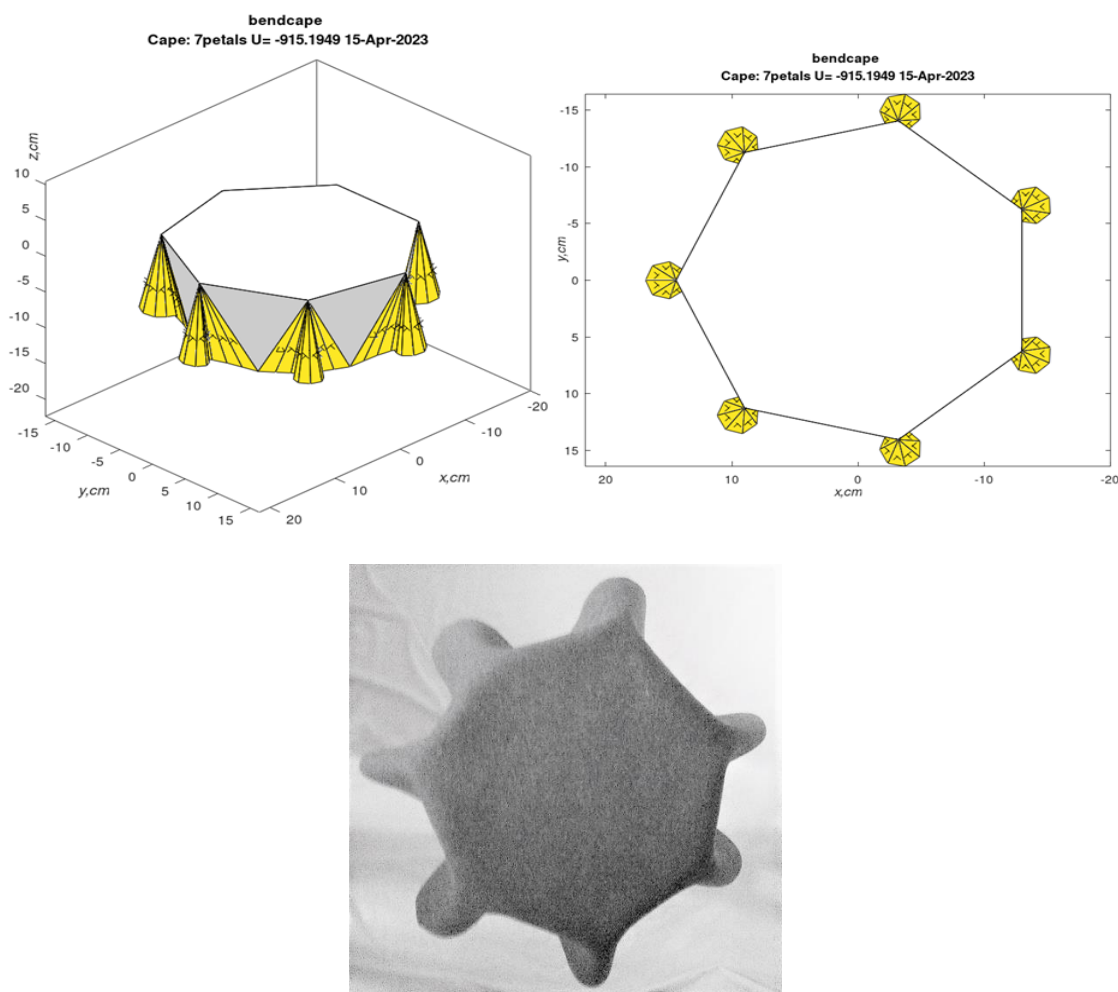


Рисунок 12 – Накидка радиусом 40 см с 7 «лепестками»:
модель и реальная форма

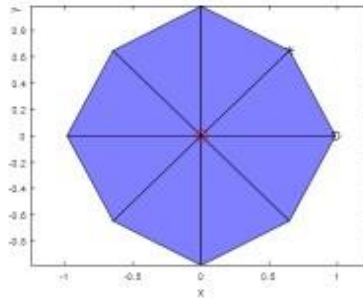
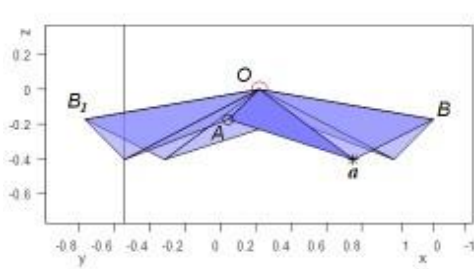
В заключении третьей главы приведены примеры моделирования торсовой и цилиндрической форм изгиба лоскутов, захваченных тем или иным способом.

В четвертой главе даны некоторые рекомендации по конструированию и эксплуатации устройств вакуумного захвата текстильных лоскутов.

На примере простейшей 8-гранной симметричной модели конического изгиба круглого лоскута описан метод исследования динамики падающего из захвата и раскрывающегося лоскута (рисунок 13) как механической системы с 2 степенями свободы. Кинетическая энергия лоскута есть квадратичная форма относительно обобщенных скоростей, коэффициенты которой являются функциями одной из обобщенных координат. Показано, что эти функции аппроксимируются кубическими полиномами.



Фазы раскрытия падающего лоскута



Предельная скорость падающего лоскута

$$v_{II} = \sqrt{\frac{2g \rho_{surf}}{\xi_{ar} \rho_a}} = 2.59 \text{ м/с}$$

ξ_{ar} - коэфф. лобового сопротивления

$\rho_{surf} : \rho_a$ - плотность лоскута и воздуха

4 – секторная симметричная простейшая модель конической поверхности.

2 степени свободы, y, z – обобщенные координаты. Начальные значения $\dot{y}_0 = \frac{\pi}{18}, \dot{z}_0 = 0$

Рисунок 13 – Этапы раскрытия падающего лоскута. Простейшая симметричная модель лоскута

На примере модели сложного изгиба лоскута, втянутого в вакуумную воронку, выполнен расчет сил давления воронки на лоскут. На основании данных о координатах точек контакта лоскута с краем воронки составлены и решены уравнения равновесия лоскута, и найдены искомые силы, сдавливающие лоскут внутри воронки.

Исследовано влияние фильтрации воздуха сквозь ткань на силу захвата лоскута с гладкой поверхности. На основании формулы Вейсбаха-Дарси установлено, что скорость фильтрации сквозь шинельный драп пропорциональна перепаду давления в областях над и под лоскутом с коэффициентом пропорциональности 0,023. Показано, что с помощью вакуума, создаваемого бытовым пылесосом, плоский лоскут от гладкой поверхности не оторвать. Поэтому отрыву лоскута на опыте предшествует процесс образования морщин, или флейт (рисунок 14).



Рисунок 14 – Захват лоскута с гладкой поверхности. Образование флейт

Для случая, когда захватываемые листы уложены стопкой, предложены 4 способа организации захвата верхнего лоскута. Один из них – прокатывание по верхнему листу цилиндрического вакуумного захвата с отверстиями (рисунок 15).

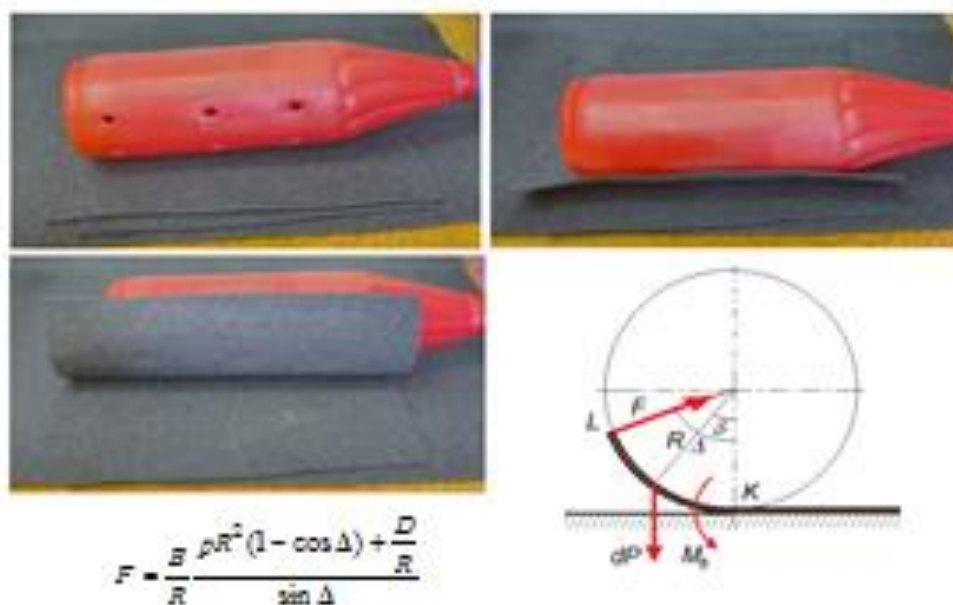


Рисунок 15 – Намotka верхнего лоскута на цилиндр

Предложен способ расчета коэффициента драпируемости текстильных материалов на основе компьютерной модели комбинированного изгиба круглого лоскута (рисунок 16).

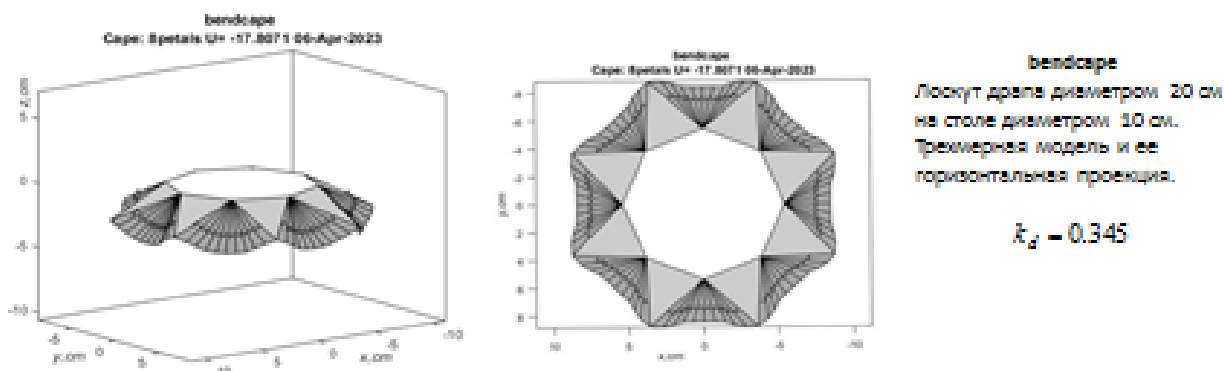


Рисунок 16 – Компьютерный расчет коэффициента драпируемости на основе программы bendcape.

Предложен способ определения изгибной жесткости текстильного материала путем компьютерной обработки изображения изогнутого лоскута этого материала, полученного из эксперимента (рисунок 17).

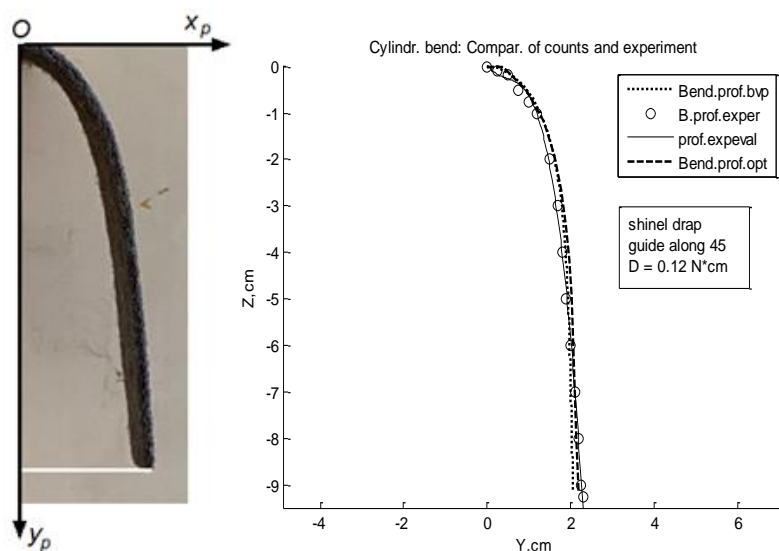


Рисунок 17 – Определение изгибной жесткости образца материала путем сравнения теоретического профиля с экспериментальным

Величина изгибной жесткости подбирается путем последовательных расчетов теоретического профиля и минимизации суммы квадратов отклонений теоретического профиля от экспериментального в контрольных точках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны методы исследования и моделирования развертывающихся срединных поверхностей текстильных лоскутов как упругих тяжелых оболочек. Для решения задачи моделирования деформаций лоскутов применен метод оптимизационного поиска равновесных форм срединной поверхности путем градиентного поиска минимума целевой функции задачи.

2. Выполнены экспериментальные исследования процессов захвата, перемещения и сброса лоскутов вакуумными захватами. Проанализировано влияние устройства, размеров и формы вакуумного захвата на его способность поднимать текстильный лоскут с разных поверхностей. Исследовано влияние мощности всасывания на подъемную силу. На основании изучения процессов захвата лоскута из стопки сформулированы условия захвата верхнего лоскута.

3. Разработаны математические модели многогранных срединных поверхностей лоскутов как оболочек. Проведено моделирование срединных поверхностей для случая симметричного конического изгиба круглого лоскута шинельного драпа, захваченного вакуумной воронкой. Выявлена форма изгиба с оптимальным количеством складок. Исследованы равновесные формы конического изгиба прямоугольных лоскутов, в результате чего установлена оптимальная форма изгиба, наблюдаемая на практике.

4. Исследовано семейство равновесных форм изгиба лоскутов, захваченных плоским сетчатым захватом. Выявлена форма изгиба с оптимальным количеством «лепестков», которая соответствует эксперименту.

5. Разработаны математические модели, алгоритмы и компьютерные программы для моделирования конического изгиба анизотропного лоскута произвольной формы в вакуумном захвате и для моделирования сложного конического изгиба с множеством асимметричных складок.

6. Исследованы равновесные торсовые и цилиндрические формы изгиба лоскутов драпа. Предложены способы расчета коэффициента драпируемости и изгибной жесткости текстильного материала на основе компьютерной обработки изображения лоскута.

7. Разработаны инженерные рекомендации для приближенных исследований подъемной силы вакуумной воронки, силового взаимодействия ее с захваченным лоскутом, процессов падения лоскутов на приемный стол, организации захвата верхнего лоскута из пакета.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах, входящих в «Перечень ...» ВАК РФ

1. Хамдан, А. А. Дж. К. Махди. Моделирование изгиба лоскута ткани, подвешенного в некоторой точке / А. А. Дж. К. Махди Хамдан (Al-Abu Jaiash Qusai Mahdi Hamdian), Степанов М. В. , Усов А. Г. // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. – 2022, № 2. С.83-88.

2. Хамдан, А. А. Дж. К. Махди. Моделирование сложного изгиба лоскута ткани, захваченного вакуумным присосом / А. А. Дж. К. Махди Хамдан (Al-Abu Jaiash Qusai Mahdi Hamdian), Степанов М. В. , Усов А. Г. // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. – 2022, № 3. С.31-37.

3. Хамдан, А. А. Дж. К. Махди (Al-Abu Jaiash Qusai Mahdi Hamdian). Деформация лоскута в вакуумном захвате: эксперименты и модели (обзор) // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. – 2023, № 3. С. 43–49.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

4. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022663202 от 13.07.2022. Моделирование конического изгиба гибкого лоскута произвольной формы (программа для ЭВМ). Аль-Абу Д. К. М. Хамдан (IQ), Степанов М. В. (RU), Усов А. Г. (RU).

5. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023614188 от 14.02.2023. Моделирование конического изгиба гибкого лоскута произвольной формы (программа для ЭВМ). Аль-Абу Д. К. М. Хамдан (IQ), Степанов М. В. (RU), Усов А. Г. (RU).