

*На правах рукописи*



**ТИСЛЕНКО ИЛЬЯ ВЛАДИМИРОВИЧ**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
КОМПРЕССИОННОЙ ТРИКОТАЖНОЙ ОДЕЖДЫ**

Специальность 05.19.04 – Технология швейных изделий

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иваново – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановский государственный политехнический университет» (ФГБОУ ВО «ИВГПУ») на кафедре конструирования швейных изделий Текстильного института.

Научный руководитель: **Кузьмичев Виктор Евгеньевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования швейных изделий ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет», г. Иваново

Официальные оппоненты: **Петросова Ирина Александровна**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры художественного моделирования, конструирования и технологии швейных изделий ФГБОУ ВО «Российский государственный университет имени А.Н.Косыгина (Технологии, Дизайн, Искусство)», г. Москва

**Чагина Любовь Леонидовна**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры дизайна, технологии, материаловедения и экспертизы потребительских товаров ФГБОУ ВО «Костромской государственной университет», г. Кострома

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Владивостокский государственный университет экономики и сервиса»**, г. Владивосток

Защита состоится «01» марта 2018 года в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.355.02 на базе ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: 153000 г. Иваново, Шереметевский пр., д. 21, ауд. У-109.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»: [www.ivgpu.com](http://www.ivgpu.com).

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.355.02,  
доктор технических наук, профессор



Никифорова  
Елена Николаевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Содержанием трехмерного компьютерного проектирования одежды является, с одной стороны, визуализация виртуальных систем «фигура-одежда» в целом и её элементов и, с другой стороны, преобразование объемных оболочек в плоские детали с учетом морфологии фигур и показателей свойств текстильных материалов. Особую сложность представляет виртуальное проектирование компрессионной одежды, исходная форма которой меньше исходной фигуры, а форма, которую она принимает на фигуре, является результатом действия напряжений в материале, пластики фигуры и деформации кожных и мышечных тканей. Конструктивными особенностями проектирования такой одежды являются отрицательные прибавки. Объективная сложность такого проектирования складывается под влиянием многих факторов, которые в совокупности пока сдерживают распространение методов виртуального проектирования компрессионной одежды.

**Степень научной разработанности избранной темы.** Теоретические исследования в области построения плотнооблегающих разверток, изложенные в работах П.Л.Чебышева, А.В.Савостицкого, Г.И. Суриковой, Г.П.Старковой, Е.Г.Андреевой, Н.Л.Корниловой, J.McCartney, В.К. Hinds, С.L.Wang, основаны на физических моделях текстильных материалов, для большинства которых сформулированы исходные требования и ограничения, созданы алгоритмы построения и проверки с учетом заданных условий и критериев. Однако реальный механизм функционирования компрессионной одежды, основанный на параллельном деформировании трикотажных материалов, кожных покровов и нижележащих тканей фигур, требует комплексного подхода к выбору конструктивных прибавок (величин заужения) при проектировании.

Во-первых, к настоящему времени ассортимент компрессионной одежды, покрывающей участки фигуры с разной пластикой, включает свыше 30 наименований. Проведенные ранее исследования позволили установить допустимые ограничения по деформированию материалов в плотнооблегающей одежде, которые дифференцированы в зависимости от ее назначения.

Во-вторых, существующие рекомендации по применению трикотажных материалов включают учет их способности оказывать давление на жесткую и недеформируемую поверхность. Однако, для правильного конфекционирования таких материалов и прогнозирования их применения в компрессионной одежде необходимо знать их возможности воздействовать на мягкие ткани тела.

В-третьих, виртуальное проектирование систем "фигура-одежда" (САПР Optitex, Marvelous Designer, LooksTailorX и др.) основано на использовании аватаров с автоматически генерируемой пластикой поверхности, не предусматривающих ее изменение под влиянием сжатия, что затрудняет проектирование одежды с отрицательными прибавками. Выходом из этой ситуации является развитие принципа гуманизации виртуального проектирования, впервые предложенного в 2015 г. Мэнной Го (ИВГПУ).

Таким образом, перечисленные проблемы в области конфекционирования материалов, механики и пространственного формообразования систем "фигура-одежда",

информационного обеспечения и виртуального проектирования свидетельствуют об актуальности и необходимости теоретико-экспериментального обоснования и создания научных основ проектирования компрессионной одежды.

Работа выполнена в 2013-2017 гг. на кафедре конструирования швейных изделий Текстильного института ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет», в лаборатории механики текстильных материалов Университета Верхнего Эльзаса (Haute-Alsace University, Mulhouse, Франция) и в рамках выполнения государственного задания НИР № 2.2425.2017/ПЧ на тему "Разработка программного обеспечения для виртуального проектирования статичных и динамичных систем "фигура-одежда" и проведения виртуальных примерок одежды FashionNet".

Содержание работы соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 15.09.04: 1. Разработка теоретических основ и установление общих закономерностей проектирования одежды на фигуры типового и нетипового телосложения; 3. Разработка математического и информационного обеспечения систем автоматизированного проектирования одежды; 5. Совершенствование методов оценки и проектирование одежды с заданными потребительскими и технико-экономическими показателями.

**Целью работы** является разработка метода проектирования компрессионной трикотажной одежды на основе виртуального моделирования фигуры и одежды.

Для достижения цели поставлены и решены следующие **научные задачи**:

- проведены исследования растяжимости и сдвига трикотажных материалов в условиях, максимально приближенных к процессам их деформирования в компрессионной одежде;
- проведены комплексные исследования компрессионного давления на кожные покровы, возникающего под влиянием напряжений в деформируемых трикотажных оболочках;
- создан экспериментальный стенд для изучения компрессии мягких тканей растянутыми текстильными материалами;
- разработан новый показатель компрессионной способности текстильных материалов;
- разработана теоретическая модель для описания процессов деформирования мягких тканей фигур под влиянием напряжений внутри текстильных материалов и прогнозирования результатов параллельно протекающих процессов;
- разработано программное обеспечение для виртуального моделирования напряжений растяжения и сдвига, возникающих в текстильном материале, и получения плоских разверток;
- разработана методика выбора конструктивных прибавок (величин заужения) в зависимости от заданных значений давления одежды, участка фигуры и используемого трикотажного материала;
- проведена экспериментальная проверка теоретических моделей на цилиндрической поверхности, моделирующей мягкие ткани и на семи реальных женских фигурах разной полноты.

**Объекты исследования** – человеческие фигуры, трикотажные полотна, реальные и виртуальные системы «фигура - компрессионная одежда», процессы конструирования и виртуальной симуляции.

**Научная новизна** работы состоит в создании теоретической модели пространственной системы "аватар человеческой фигуры - замкнутая оболочка из трикотажного материала" на основе согласования размерных признаков фигуры, геометрических параметров оболочки, ее деформации и компрессионного давления на кожные покровы. Инновационными особенностями метода проектирования, реализующего теоретическую модель, являются учет показателей растяжимости трикотажного материала при формировании трехмерной модели, использование трехмерного компьютерного моделирования, возможность визуализации компрессионного давления одежды и напряжений, возникающих в трехмерной оболочке, и получение плоских разверток.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость заключается в обосновании и разработке принципов расчета и виртуального моделирования элементов системы «фигура-одежда» под влиянием трех параллельно протекающих процессов: деформации текстильной оболочки, возникновения под ней компрессионного давления и деформации мягких тканей тела. Практическая значимость состоит в разработке нового показателя, характеризующего способность замкнутых оболочек из трикотажных материалов сдавливать кожные покровы; методики конфекционирования материалов; методики расчета конструктивных прибавок (величин заужения) для достижения необходимого давления на кожные покровы; программных модулей для расчета и отображения деформаций растяжения и сдвига деталей одежды и их развертывания.

**Методология и методы диссертационного исследования.** Для решения поставленных задач применены методы трехмерного виртуального моделирования и экспериментальных исследований. В работе использованы в качестве средств исследований: для реальных фигур – бодисканер Human Solutions (Германия), трикотажных полотен – измерительный комплекс для механических испытаний Kawabata Evaluation System KES (Япония), измерения давления под одеждой – прибор FlexiForce A201 (США). Моделирование возникновения компрессионного давления осуществляли с помощью косметологического силикона - синтетического аналога кожных покровов человека. Виртуальное моделирование системы «фигура - компрессионная одежда» выполняли в программе трехмерной компьютерной графики. Обработку результатов измерений проводили методами корреляционного и регрессионного анализа. Органолептические ощущения носчиков оценивали методом экспертных оценок. Использованы программные продукты Excel, SSPS, Adobe Photoshop, CorelDraw, Maya Autodesk, MS Visual Studio, Math Type.

**Наиболее существенные результаты, выносимые на защиту:**

- новый показатель, определяющий компрессионную способность трикотажного материала – коэффициент компрессии, и диапазоны его значений для каждой из 4 компрессионных групп одежды;

- математическая модель для прогнозирования напряжений в замкнутых оболочках трикотажных материалов, возникающего под ними давления на кожные покровы фигуры и развертывания объемных оболочек в плоские детали;

- методика виртуального проектирования систем "фигура - компрессионная одежда", в которых размеры одежды меньше размеров фигуры,

- методика выбора значений отрицательных конструктивных прибавок для трикотажной одежды,

- экспериментальный стенд для изучения компрессии мягких тканей растянутыми текстильными материалами.

**Степень достоверности и апробации результатов работы.** Достоверность полученных результатов и выводов обеспечена сходимостью результатов экспериментальных и теоретических исследований, статистической достоверностью полученных уравнений, применением современных и поверенных средств измерений. Точность прогнозирования давления на кожные покровы под напряженной текстильной оболочкой составила менее 5%.

Результаты работы доложены и получили положительную оценку на следующих конференциях: конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «ПОИСК» (Иваново, 2014, 2015); международной научно-практической конференции (Витебск, 2015); пятой Всемирной Текстильной конференции Smartex (Египет, 2015); Всероссийской научной студенческой конференции ИНТЕКС (МГУДТ, Москва, 2016).

**Основные результаты** выполненных исследований опубликованы в 9 печатных работах, в том числе в 4 статьях в журналах из «Перечня рецензируемых научных изданий», в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук», в 5 материалах и тезисах научно-технических конференций различного уровня.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из 5 глав, изложена на 204 страницах, включает 13 таблиц, 72 рисунка, 6 приложений, 135 литературных источников, включая 95 иностранных.

## СОДЕРЖАНИЕ

Во **введении** обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи, приведены сведения о научной и практической значимости.

В **первой главе** проведен анализ современного состояния экспериментального и теоретического обоснования процесса проектирования компрессионной одежды.

Рассмотрен ассортимент компрессионной одежды отечественных и зарубежных производителей и применяемых для ее изготовления материалов. Предложена схема типов компрессионной одежды, сгруппированных по антропоморфному признаку расположения на фигуре, включающая следующие признаки: область применения (спорт, медицина, косметическая); расположение на различных частях фигуры (руки, грудная клетка, талия, бедра, ноги); конструктивное решение (замкнутые в горизонтальной плоскости, полузамкнутые в вертикальной плоскости); достигаемый эффект (смещение мягких тканей в вертикальном направлении, утягивание).

Установлено, что основным показателем свойств трикотажных материалов, влияющим на выбор величин конструктивных прибавок и габаритов трикотажной одежды, является принадлежность к одной из групп растяжимости. В существующей классификации материалов по ГОСТ 8847-85 для определения группы растяжимости используют нагрузку 60 сН/см для граничных значений растяжимости 40 и 100%, что является необоснованным с точки зрения достижения нужного давления одежды на тело.

Рассмотрены методы расчета деталей компрессионной одежды.

Изучены физический, психологический и физиологический аспекты воздействия давления одежды на человеческое тело и определены допустимые пределы его переносимости в зависимости от функционального назначения одежды и участка фигуры.

Рассмотрены существующие методы теоретического расчета плотнооблегающих напряженных оболочек. Моделирование напряженного состояния текстильных материалов при эксплуатации систем «фигура-одежда» рассматривают при следующих условиях: проектирование размеров деталей или их участков меньше аналогичных размеров фигуры; динамическое воздействие кожных покровов или мышечных тканей на текстильный материал.

Показано, что компьютерное проектирование трикотажной одежды с размерами, меньшими размеров фигуры человека, не получило научного обоснования и практического применения.

Сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Во **второй главе** приведены результаты экспериментальных исследований деформационных свойств трикотажных материалов в плоском состоянии (основные результаты изложены в трех публикациях [2,3,4] и двух тезисах докладов [6,8]).

Реальный процесс деформации текстильных материалов имеет более сложный характер, чем описываемый в рассмотренных известных моделях, поскольку на разных этапах развития деформации задействованы различные механизмы взаимодействия волокон и нитей. Для наполнения разрабатываемых теоретических моделей реальным содержанием были изучены физические свойства трикотажных полотен с помощью специализированного измерительного комплекса Kawabata Evaluation System (KES-F).

Для изучения растяжимости материалов в области малых эксплуатационных нагрузок, соответствующих комфортному давлению на тело, проведены исследования материалов в диапазоне нагрузок 0-49 сН/см. Исследовано изменение линейных размеров  $\varepsilon_{\perp}$  (сокращение в поперечном направлении) проб при их растяжении в продольном направлении  $\varepsilon$ . Полученные результаты необходимы для согласования значений конструктивных прибавок в продольном и поперечном направлениях.

Сформированы исходные условия, относящиеся к трикотажным полотнам, для разработки теоретической модели.

Во **третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований деформационных и компрессионных свойств трикотажных материалов на поверхности мягких тканей фигуры (основные результаты изложены в одной публикации [2] и двух тезисах докладов [6,7]).

Сопоставление растяжимости материала на KES-FB1 в диапазоне нагрузок 0-165 сН/см и оказываемого давления материала на тело позволило разработать классификацию

компрессионной одежды по степени компрессионного воздействия, предложить новый показатель, определяющий компрессионную способность трикотажного материала – коэффициент компрессии, рассчитать диапазоны его значений для каждой из 4 компрессионных групп одежды.

Для изучения компрессионной способности растянутых текстильных материалов был создан экспериментальный стенд (рис.1). Калибровка датчика *FlexiForce A201* была выполнена по двум схемам с концентрированным и равномерно распределенным давлением. Шаг изменения усилия растяжения составил 10-30 сН/см, а верхний предел – 165 сН/см.

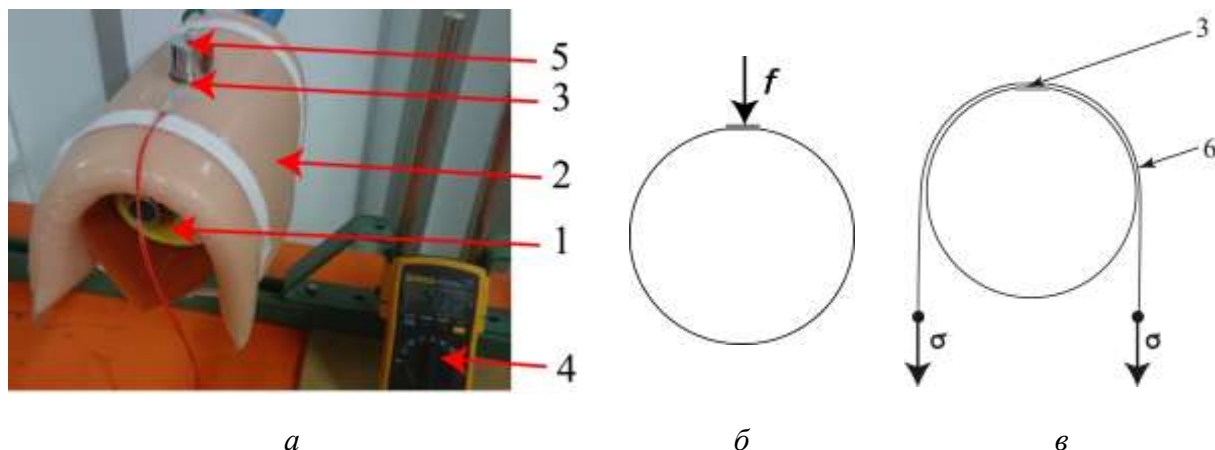


Рисунок 1 - Внешний вид экспериментальной установки для изучения компрессионной способности текстильных материалов (а), схема прижатия материала к упругой подложке при калибровке (б): при измерении давления материала (в): 1 - жесткая основа ( $d = 8$  см), 2 - упругая подложка из косметологического силикона (толщина 2 см), имитирующая мягкую ткань тела, 3 – датчик давления, 4 – оммметр, 5 - калибровочная нагрузка, 6 – материал

Для изучения компрессионной способности растянутых текстильных материалов в реальных условиях был проведен эксперимент по созданию компрессионного воздействия на участки торса и подкорпусной части с участием семи человек различной полноты. В эксперименте с помощью тестовой полосы трикотажного материала, фиксируемой вокруг фигур, измеряли: максимальное давление  $P$ , изменения проекционных параметров фигуры и относительное растяжение полосы материала, по которому затем рассчитывали его силу растяжения  $\sigma$ . Коэффициент пропорциональности, связывающий величины давления  $P$  под растянутым материалом и его удлинения  $\varepsilon$ , был нами назван коэффициентом компрессии  $K_{\text{компр}}$ :

$$K_{\text{компр}} = dP/d\varepsilon, \quad (1)$$

где  $dP$  и  $d\varepsilon$  – соответственно приращения давления и удлинения.

Физический смысл коэффициента компрессии является показателем меры давления материала на поверхность тела и численно равен приросту давления при однопроцентном относительном удлинении материала ( $\varepsilon = 1\%$ ). На основе проведенных исследований все материалы по своей способности к созданию компрессионного давления были разделены на четыре группы I, II, III, IV. Интервалы значений  $K_{\text{компр}}$  были выбраны на основе значений интервалов давления  $P$ , создаваемого в компрессионной одежде (табл.1).



Материалы из группы *I* не будут вызывать значительного изменения формы тела за счет сдавливания и перераспределения мягких тканей. При проектировании компрессионных изделий из материалов группы *II* необходимо учитывать сдавливание и перераспределение подкожной жировой ткани. Материалы групп *III* и *IV* можно использовать для создания одежды с максимальным давлением на тело, воздействие которой будет приводить к сдавливанию как подкожной жировой, так и мышечной тканей, т.е. к изменению пластики фигур и получению видимых эффектов push-up.

Таблица 1. Характеристика компрессионных групп материалов

| Группа     | $K_{\text{компр}}$ | Давление, кПа | Назначение одежды  |
|------------|--------------------|---------------|--|
| <i>I</i>   | 20-64              | 0,4-1,3       | Повседневная без эффекта коррекции   |
| <i>II</i>  | 65-100             | 1,3-2         | Повседневная со слабым эффектом коррекции  |
| <i>III</i> | 101-165            | 2-3,3         | Повседневная, медицинская и спортивная со средним эффектом коррекции                                   |
| <i>IV</i>  | более 166          | более 3,3     | Медицинская и спортивная (корсеты, регуляция нарушений лимфотока и т. д.) с сильным эффектом коррекции |

Диаграммы для определения  $K_{\text{компр}}$  при базовом значении относительного удлинения материалов  $\varepsilon = 20\%$  показаны на рис. 2.

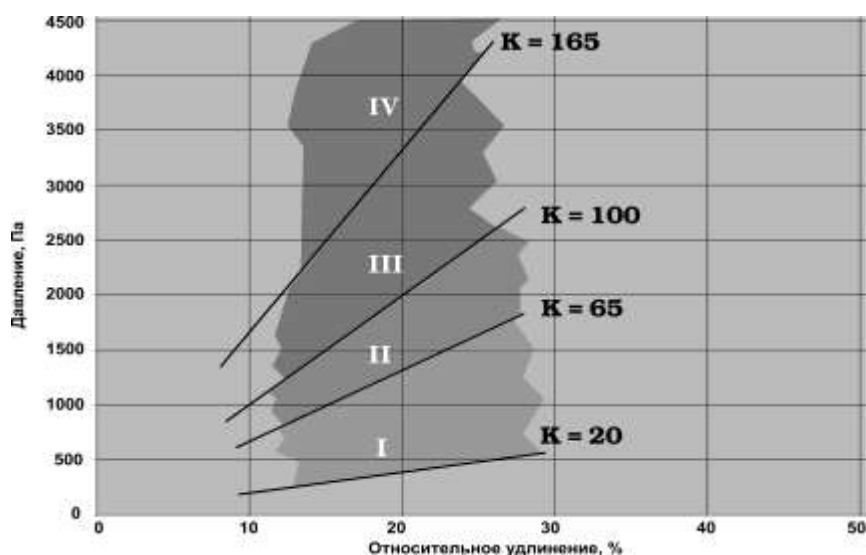


Рис. 2. Зоны значений  $K_{\text{компр}}$  для трикотажных материалов

Различия между предлагаемой схемой деления материалов по показателю компрессионного сжатия и существующей их классификацией по растяжимости заключаются в использовании антропогенного фактора при определении границ групп. Компрессионные группы определены на основе физической величины давления

материала, вызванной им степенью деформации мягких тканей и производимым психофизиологическим воздействием.

Для материалов, которые вдоль двух главных направлений - поперек и вдоль петельных столбиков - имеют различные значения коэффициента  $K_{\text{компр}}$ , компрессионные свойства одежды будут в значительной степени зависеть от направления раскроя.

Для определения компрессионной группы материала разработана методика.

Результаты испытаний могут быть использованы либо для конфекционирования материалов, либо для выбора величины отрицательной конструктивной прибавки. Для этих целей разработана структура специальной номограммы, объединяющая результаты полученные при растяжении плоских проб и на поверхности силикона и показанная на рис.3 (в качестве примера приведены зависимости для восьми трикотажных материалов T6-T13).

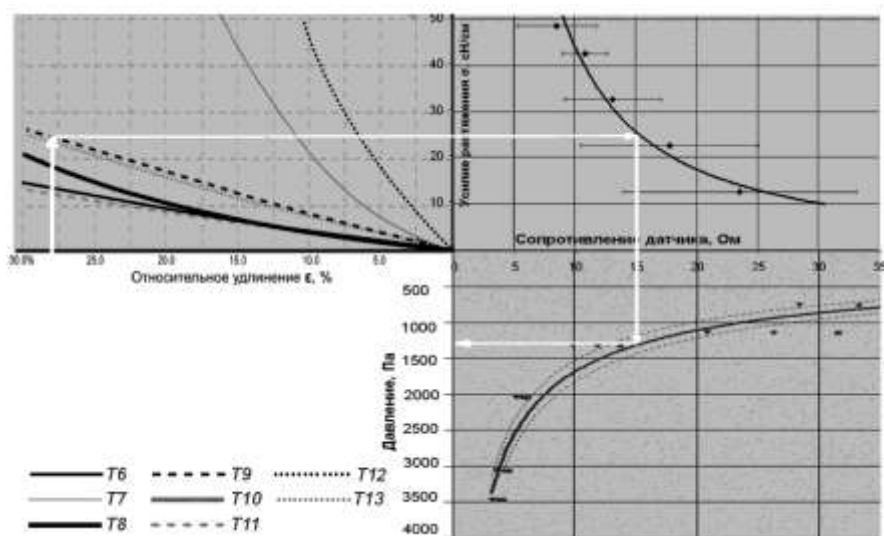


Рис.3. Номограмма для определения давления материала  $T9_{\text{пс}}$  в зависимости от его относительного удлинения

Сформированы исходные условия, относящиеся к подсистеме "кожные покровы - трикотажная оболочка" и необходимые для разработки теоретической модели.

В **четвертой главе** выполнен теоретический расчет трехмерных оболочек из трикотажных материалов, плотнооблегающих и сдавливающих человеческую фигуру (результаты изложены в одной публикации [1] и тезисах доклада [9]).

Исходным элементом для построения развертки принят участок триангулированной полигональной сети в трехмерном пространстве, моделирующий фрагмент детали одежды. Этот элемент полигона – треугольную грань - считали деформируемым, а потому изменение расстояний между узлами сети при его развертывании на плоскость рассматривали как условие возникновения упругих напряжений. Трехмерную форму до одевания на тело предложено считать ее ненапряженным состоянием одежды (НСО). Таким образом, деформация материала одежды представлена в виде двух составляющих: первая возникает в результате растяжения трехмерной поверхности НСО до размеров, заданных фигурой, вторая – как следствие развертывания трехмерной поверхности НСО на плоскость. Развертка исходного участка полигональной сети будет иметь минимальную энергию возникающих напряжений. В качестве элементов упругой

деформации полигона использованы двумерные элементы – грани поверхности полигональной сети.

Расчет внутренних напряжений был выполнен с использованием зависимостей, существующих в реальных текстильных материалах и установленных с помощью специализированного комплекса Kawabata KES-F.

Рассмотрим деформацию треугольной грани и силы  $F$ , действующие на ее вершины, при переходе из двумерного пространства плоской детали  $(x, y)$  в трехмерное состояние напряженной оболочки  $(X, Y, Z)$ . До деформации единичные векторы  $u$  и  $v$  в направлении утка и основы (или поперек и вдоль петельных столбиков) совпадают с единичными векторами системы координат, а после деформации переходят в векторы  $U, V$  (рис.4).

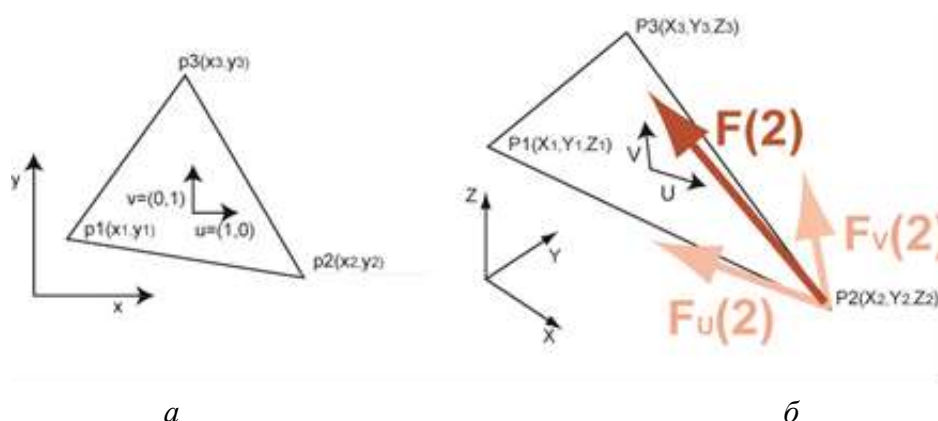


Рис.4 Деформация элемента полигональной сетки: *a* – исходная треугольная грань развертки, *б* – треугольная грань трехмерной полигональной сетки

Деформации в материале по утку и основе могут быть записаны в виде:

$$\varepsilon_{uu}=|U|-1, \varepsilon_{vv}=|V|-1, \quad (1)$$

а изменение угла между ними в виде:

$$\varepsilon_{uv}=(|U+V| - |U-V|) / \sqrt{2}. \quad (2)$$

Векторы  $U, V$  определим из уравнений:

$$U=(1/(x_{13}y_{23}-x_{23}y_{13}))(y_{23}P_1 + y_{13}P_2 + y_{12}P_3), \quad (3)$$

$$V=(1/(x_{13}y_{23}-x_{23}y_{13}))(x_{23}P_1 + x_{13}P_2 + x_{12}P_3), \quad (4)$$

где  $x_{ij}=x_i-x_j$ ,  $y_{ij}=y_i-y_j$  - разности между координатами вершин треугольной грани развертки (рис. 4, *a*),  $P_i$  – трехмерные векторы координат грани.

Зная эти деформации, можно рассчитать возникающие напряжения  $\sigma_{uu}$ ,  $\sigma_{vv}$ ,  $\sigma_{uv}$ .

Для расчета напряжений, возникающих при растяжении ( $\varepsilon_{uu}>0$ ,  $\varepsilon_{vv}>0$ ) были использованы экспериментальные данные измерительного комплекса KES-FB-1, полученные после исследования трикотажных материалов.

Для интерполяции кривой растяжения  $\sigma = f(\varepsilon)$  на рис.2, *a*, используем функцию  $f$  вида:

$$f(\varepsilon) = (e^{\alpha\varepsilon} - 1)/\beta, \quad (5)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  – коэффициенты, характеризующие показатели свойств материала.

Отрицательные значения деформаций ( $\varepsilon_{uu} < 0$ ;  $\varepsilon_{vv} < 0$ ) соответствуют сжатию материалу, в котором возможно возникновение складок. Для плотного облегаия мы использовали процедуру уменьшения доли энергии, приходящейся на сжатые элементы: для области отрицательных значений деформации напряжения  $\sigma_{uu}(\varepsilon)$ ,  $\sigma_{vv}(\varepsilon)$  рассчитывали как

$$\sigma_{uu} = K\varepsilon_{uu}, K \gg 1 \quad \text{для } \varepsilon_{uu} < 0, \quad (6)$$

$$\sigma_{vv} = K\varepsilon_{vv}, K \gg 1 \quad \text{для } \varepsilon_{vv} < 0, \quad (7)$$

где  $K$  – коэффициент, моделирующий сопротивление материала при изменении направления действия усилия растяжения на 180 град., сН/см.

Зависимость для вычисления напряжений сдвига  $\sigma_{uv}$  имеет вид

$$\sigma_{uv}(\text{сН/см}) = 50 \cdot \varepsilon_{uv}. \quad (8)$$

Определив возникающие в рассматриваемом треугольнике напряжения по выражениям (10-14), можно записать силы  $f_u$  и  $f_v$ , действующие на вершины развертки в виде:

$$\begin{aligned} f_u(1) &= -F_U(1), f_v(1) = -F_V(1), f_u(2) = -F_U(2), & (9) \\ f_v(2) &= -F_V(2), f_u(3) = -F_U(3), f_v(3) = -F_V(3). \end{aligned}$$

Значения сил  $F_U$  и  $F_V$  действующих на точку 1 (рис.4), со стороны ребер {1-2} и {1-3} составляют:

$$F_U(1) = 0.5 \sigma_{uu}(v_3 - v_2) + 0.5 \sigma_{uv}(u_2 - u_3). \quad (10)$$

$$F_V(1) = 0.5 \sigma_{vv}(u_2 - u_3) + 0.5 \sigma_{uv}(v_3 - v_2). \quad (11)$$

Для всех вершин треугольника, записывая единичные векторы направлений как  $U/|U|$  и  $V/|V|$ , и учитывая, что  $u=(0;1)$   $v=(1;0)$  окончательно получим:

$$F(1) = 0.5(\sigma_{uu}(y_3 - y_2) + \sigma_{uv}(x_2 - x_3)) U/|U| + 0.5(\sigma_{vv}(x_2 - x_3) + \sigma_{uv}(y_3 - y_2)) V/|V|,$$

$$F(2) = 0.5(\sigma_{uu}(y_1 - y_3) + \sigma_{uv}(x_3 - x_1)) U/|U| + 0.5(\sigma_{vv}(x_3 - x_1) + \sigma_{uv}(y_1 - y_3)) V/|V|, \quad (12)$$

$$F(3) = 0.5(\sigma_{uu}(y_2 - y_1) + \sigma_{uv}(x_1 - x_2)) U/|U| + 0.5(\sigma_{vv}(x_1 - x_2) + \sigma_{uv}(y_2 - y_1)) V/|V|.$$

Проверка полученных теоретических выражений была выполнена путем компьютерного и реального проектирования триангуляционной сети и оболочки тела вращения. На рис. 5 показана трехмерная полигональная форма, использованная для иллюстрации разработанного алгоритма построения разверток.

Новизна предложенного алгоритма заключается в способе построения развертки с учетом показателей свойств растяжимости и сдвига материала, и возможности задания соотношения между силами упругого растяжения и сдвига.

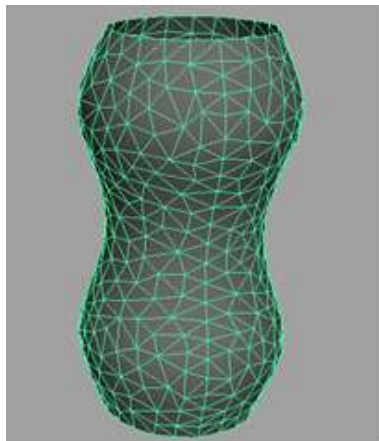


Рис.5. Трехмерная полигональная форма

Расчет напряжений, возникающих в материале разверток выпукло-вогнутой трехмерной формы, выполнен с помощью C++ плагин-модуля в программе Maya Autodesk. Расчет положений вершин развертки проводился итеративным способом. Вычисляя на каждом шаге итераций сумму сил  $f_i$  (9), действующую на  $i$  вершину развертки со стороны всех присоединенных к ней граней и сдвигая вершину в направлении вектора  $f_i$  на расстояние  $\Delta p_i$  (м) =  $f_i(N/m)/m$  ( $m$  – числовой параметр, в работе использовали  $m=200$ ), уменьшалась общая энергия деформации элементов. Критерием завершения итераций считалась малость величины  $\|f_{cp}\|$ :

$$\|f_{cp}\| = \frac{\sqrt{\sum (f_i)^2}}{n} < \delta \quad (13)$$

где  $n$  – общее число вершин,  $\delta = 0,05$ .

Для изучения зависимости были построены развертки с увеличенным и уменьшенным по сравнению с коэффициентом сдвига (8). Зависимости для вычисления напряжений сдвига  $\sigma_{uv}$  имеют вид

$$\sigma_{uv} = 1500 \varepsilon_{uv}, \quad (14)$$

$$\sigma_{uv} = 1,7 \varepsilon_{uv}. \quad (15)$$

Развертки для материала с характеристиками, рассчитанными по (10-14), показаны на рис.5. На верхней части рисунка цветом отображены значения деформации сдвига  $\varepsilon_{uv}$ , на нижней – деформации поперечного растяжения  $\varepsilon_{uu}$ . Формы разверток и топография распределения деформаций сдвига и растяжения внутри материала зависят от соотношения сил упругости и сдвига.

Для исследуемого материала развертки с увеличенным и уменьшенным коэффициентом сдвига (рис.6, в,г и рис.6, д,е) можно считать соответственно развертками с уменьшенной и увеличенной долей энергии сдвига в общей энергии деформации. Из рисунков видно, что сдвиговые напряжения в большей степени будут возникать в

развертке 3 ( $\partial, e$ ), поскольку ее линия границы должна совместиться с геодезической линией меридиана трехмерной полигональной поверхности и ей нужно «распрямиться» за счет деформаций сдвига материала. Напряжения растяжения (нижняя часть рисунков) будут преобладать в развертке 2 ( $\partial, z$ ): для совмещения границ материал деформируется без значительного изменения углов, а геодезические линии меридианов остаются на развертке почти прямыми.

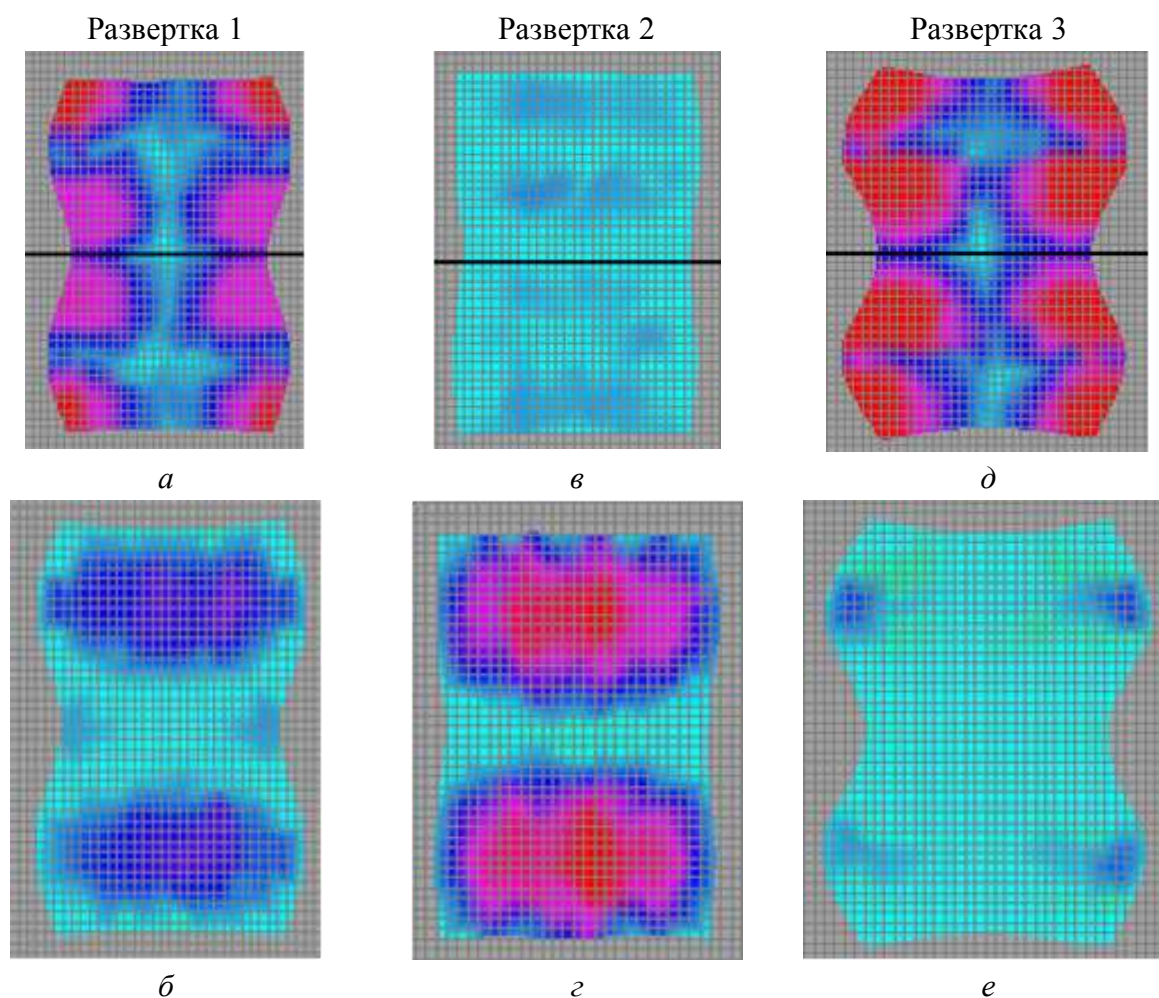






Рис.6. Развертки половинок трехмерной полигональной формы для материалов с разными характеристиками ( $a, б$  - выражения (5-8),  $в, z$  – выражения (5-9, 14),  $д, e$ – выражения (5-9, 15) с идентификацией деформаций сдвига  $\epsilon_{uv}$  ( $a, в, д$ ) и поперечного растяжения  $\epsilon_{uu}$  ( $б, z, e$ ). На рисунке приняты следующие обозначения величин деформаций:

|   | растяжение, % | сдвиг, рад. |
|---|---------------|-------------|
|  | 0             | 0           |
|  | 12            | 0,12        |
|  | 24            | 0,24        |
|  | 36            | 0,36        |

Границы допустимых значений деформаций сдвига, при которых не возникает напряженных складок и обеспечивается хороший внешний вид одежды из трикотажных полотен, были нами изучены и обоснованы. Поэтому при построении разверток для трикотажного полотна можно воспользоваться проведенными расчетами и спрогнозировать появление напряженных складок на поверхности материала.

Таким образом, разработан алгоритм построения разверток, позволяющий получить визуальное отображение деформации материала на этапе проектирования трехмерной системы «фигура-одежда»

В **пятой главе** описаны этапы метода проектирования компрессионной трикотажной одежды с виртуальным моделированием деформации фигуры и одежды (результаты изложены в тезисах доклада [5]).

Схема разработанного метода показана на рис.7.

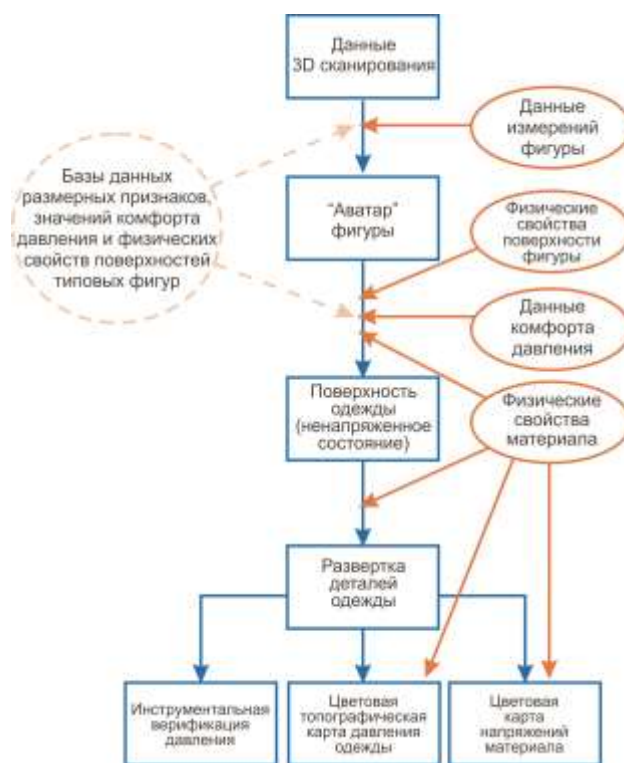


Рис.7. Схема процесса проектирования компрессионной одежды по новому методу

Для апробации разработанного метода в практической части работы был проведен контрольный эксперимент и спроектированы компрессионные шорты от уровня талии  $O_T$  до уровня высоты колена для четырех женских фигур по новому и по известному методам проектирования одежды с отрицательными прибавками.

Допустимые значения компрессионного воздействия и соответствующие им напряжения трикотажного материала и деформации мягких тканей фигур были измерены в пяти антропометрических точках, принадлежащих горизонтальным сечениям  $O_m$ ,  $O_b$ ,  $O_{bed}$ ,  $O_k$  и через выступающую точку живота  $T_{вж}$ . Степень комфортности при таком подходе оценивалась «интегрально» - для всей полосы материала, что при условии равномерного усилия растяжения позволяло характеризовать его давлением в одной заданной антропометрической точке. Для измерения давление были выбраны крайние

боковые точки во фронтальной проекции фигур.

Для изготовления компрессионной одежды был выбран материал Т9, соответствующий I компрессионной группе в направлении поперек петельных столбиков, и II группе вдоль п.с.

После задания параметров конструкции, расчета возникающих деформаций системы «фигура-компрессионная одежда» и построения виртуальной текстильной оболочки с нанесенными линиями членения она была переведена в ненапряженное состояние с помощью масштабирования относительно заданных центров. На рис.8 показаны поверхности «аватаров» фигур и оболочки ненапряженного состояния проектируемой одежды.

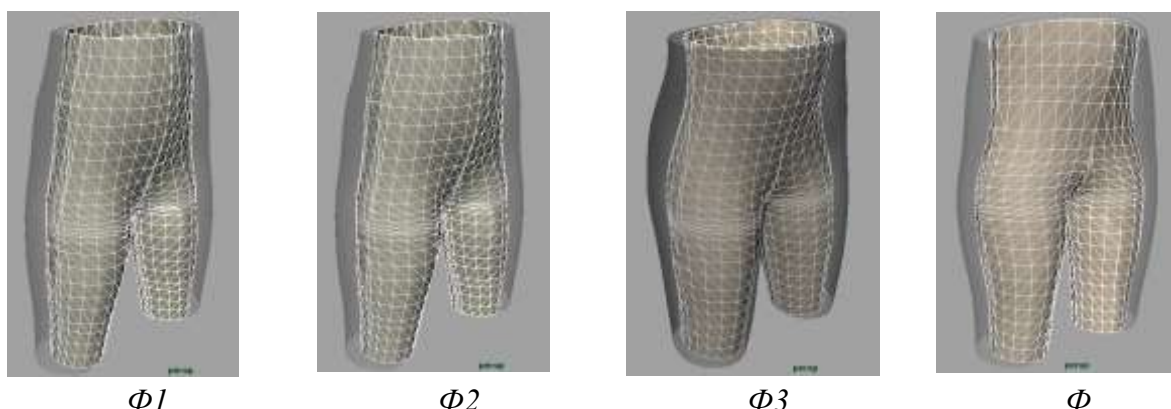


Рис.8. Фрагменты поверхности виртуальных «аватаров» (снаружи) и компрессионных изделий (внутри) для разных фигур

После построения плоских разверток были изготовлены реальные модели одежды (рис.9) и измерено давление под ними.

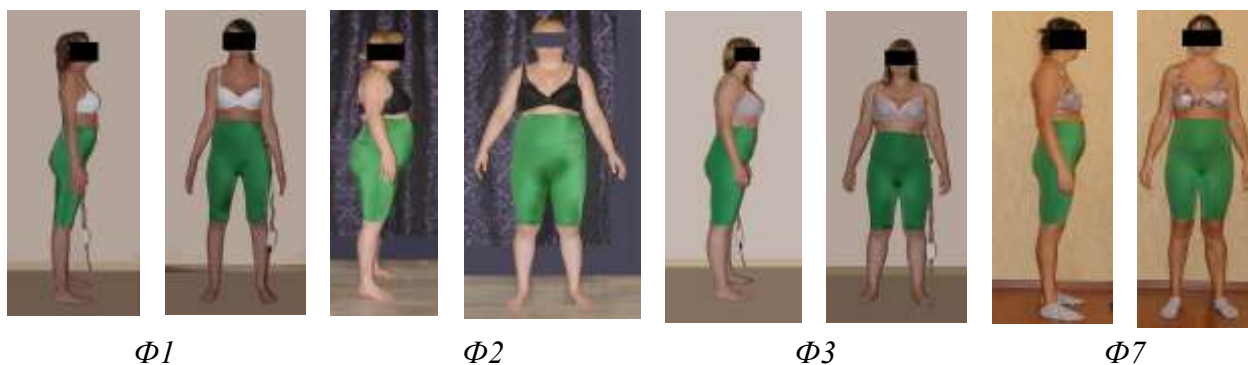


Рис.9. Внешний вид компрессионных изделий, спроектированных по разработанному методу

Значения давления для разработанного и существующего ("Мюллер и сын") методов проектирования приведены в табл.2. Из табл.2 видно, что для всей выборки фигур разработанный способ обеспечивает практическое совпадение теоретических и фактических результатов при очень незначительном отклонении -1,2 %. Причем для каждой из четырех фигур отклонения также были незначительными и составили -0,2...+5,9



%. Напротив, известный метод не гарантирует получение требуемого компрессионного эффекта: фактические значения превышают необходимые в среднем на 18,5 %, а для отдельных фигур на 29,4 % ( $\Phi 1$ ) и 25,3 % ( $\Phi 2$ ).

Таким образом результаты экспериментальной проверки показали, что разработанный метод позволяет рассчитать величины заужения (конструктивные прибавки) с учетом компрессионного, корректирующего и формообразующего свойств трикотажного материала. При традиционном расчете отрицательных прибавок по группе растяжимости точность задания давления не может превышать ширины интервалов групп и ограничивает применение известных методов случаями, когда корректирующее воздействие на фигуру незначительно и им можно пренебречь по сравнению с деформацией материала одежды.

Таблица 2. Давление под компрессионными изделиями, спроектированными по разработанному (1) и известному "Мюллер и сын" (2) методам

| Расположение горизонтального сечения   | Метод | Значения давления для разных фигур, кПа |          |          |          | Среднее значение разности, %, для каждой точки |
|--|-------|---|----------|----------|----------|--|
|  |       | $\Phi 1$                                | $\Phi 2$ | $\Phi 3$ | $\Phi 7$ |  |
|  |       | $\Delta$                                | $\Delta$ | $\Delta$ | $\Delta$ |  |
| $O_m$                                  | 1     | -22,6                                   | -35,2    | -43,1    | -17,9    | -29,7  |
|  | 2     | -28,7                                   | -37,9    | -38,0    | -34,8    | -34,8  |
| $T_{вж}$                               | 1     | 18,5                                    | 7,5      | 6,0      | -3,5     | +7,1   |
|  | 2     | 6,0                                     | 18,0     | -2,5     | -6,0     | +3,8   |
| $O_b$                                  | 1     | 25,5                                    | 13,7     | 26,8     | 1,3      | +16,8  |
|  | 2     | 18,3                                    | 28,8     | 16,3     | 32,0     | +23,9  |
| $O_{бед}$                              | 1     | -1,4                                    | 5,2      | 3,3      | -8,9     | -4,5   |
|  | 2     | 101,9                                   | 85,9     | 43,7     | 39,0     | +67,6  |
| $O_k$                                  | 1     | -21,1                                   | 17,4     | -1,4     | 7,0      | 4,8  |
|  | 2     | 49,3                                    | 31,5     | 47,4     | -0,5     | 31,9   |
| Среднее значение разности $\Delta$ , % | 1     | -0,2                                    | +5,9     | -1,7     | -4,4     | -1,2   |
|  | 2     | +29,4                                   | +25,3    | +13,4    | +5,94    | +18,5  |

Предлагаемый метод учитывает все факторы, поэтому созданные на его основе базы данных и методы смогут обеспечить высокую точность достижения требуемого давления независимо от группы растяжимости материала, с учетом его компрессионной способности и морфологии мягких тканей фигуры.

### Итоги выполненного исследования

1. Разработаны принципы виртуального проектирования компрессионной одежды, обеспечивающей получение требуемого давления и целенаправленное изменение пластики кожных покровов и мышечных тканей.

2. Разработана новая группировка трикотажных материалов, в основу которой положен новый показатель для количественной оценки их компрессионных свойств,

проявляющихся в способности объемных оболочек, замкнутых на поверхности фигуры, создавать давление на мягкие ткани фигуры в условиях растяжения и сдвига.

3. Разработана теоретическая модель для описания напряженного состояния трикотажной оболочки на поверхности тела в системе «фигура - компрессионная одежда» в условиях, максимально приближенных к процессам эксплуатации готовой компрессионной одежды.

4. Разработан способ и компьютерная программа "SeeJeeCAD2" для одевания трикотажными оболочками поверхности оцифрованных человеческих фигур, в которой объемная форма и размеры оболочки меньше формы и размеров участков фигуры.

5. Разработан способ и компьютерная программа "SeeJeeCAD1" для получения плоских разверток деталей одежды, генерируемых из трехмерной системы «фигура - компрессионная одежда», в которой объемная форма и размеры одежды меньше формы и размеров участков фигуры.

6. Разработана методика конфекционирования трикотажных материалов и выбора величин их заужения (конструктивных прибавок) на основе необходимого эффекта компрессии на мягкие покровы человеческих фигур.

7. Разработан алгоритм визуализации давления в виртуальной системе «аватар - компрессионная одежда», который может быть реализован при виртуальных примерках и прогнозирования комфортности одежды.

8. Разработан метод проектирования компрессионных изделий, основанный на выборе величин конструктивных прибавок (величин заужения) в зависимости от желаемых значений давления одежды, участка фигуры и используемого трикотажного материала.

### **Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы**

Результаты работы рекомендуется использовать для совершенствования традиционных и автоматизированных систем конструирования компрессионной одежды, разработки программных модулей для САПР, в учебном процессе высших учебных заведений при обучении бакалавров и магистров по направлению подготовки «Конструирование изделий легкой промышленности».

В дальнейшем целесообразно создать базы данных комфортного давления, переносимого фигурами разной полноты и индекса массы тела, с целью ускорения типового и адресного проектирования медицинской, корректирующей и спортивной компрессионной одежды. Для тестирования и адаптации разработанного метода к практике виртуального проектирования целесообразно исследовать возможность использования переносных сканирующих устройств.

### **Основные научные результаты по теме диссертационного исследования**

1.Тисленко, И.В. Теоретический расчет плотнооблегающих оболочек из текстильных материалов / И.В.Тисленко, В.Е.Кузьмичев // Швейная промышленность, 2014, № 6. - С. 32-37 – 0,94 п.л/0,62 п.л

2. Кузьмичев, В.Е. Исследование компрессионной способности трикотажных материалов / В.Е.Кузьмичев, И.В.Тисленко, Ч.Чен, Д.С. Адольф // Вестник технологического университета, 2015, т.18, № 20. - С.179-181. - 0,875 п.л./0,43 п.л.

3. Чжэ, Ч. Экспериментальное обоснование прогнозирования компрессионного давления под одеждой свободной формы / Ч.Чжэ, Мэнна Го, В. Е. Кузьмичев, И. В. Тисленко // Известия вузов. Технология текстильной промышленности, 2016, № 2. - С.165-172. - 1,212 п.л. /0,2 п.л

4. Кузьмичев, В.Е. Экспериментальное обоснование прогнозирования компрессионного давления под одеждой свободной формы / В. Е. Кузьмичев, Ч.Чжэ, М. Го, И. В. Тисленко // Известия вузов. Технология текстильной промышленности, 2016, № 4. - С.91-95. - 0,812 п.л./0,15 п.л.

5. Тисленко, И.В. Теоретическая разработка метода трехмерного проектирования трикотажной одежды с заданным уровнем компрессионного давления / И.В.Тисленко, В.Е.Кузьмичев, Н.А.Подварская: Молодые ученые - развитию текстильно-промышленного кластера (ПОИСК 2015): сборник материалов межвуз. науч.-техн. конф. аспирантов и студентов с межд.участием.Ч.1.- Иваново: ИВГПУ, 2015.-С.141-143. – 0,375 п.л./0,125 п.л

6. Тисленко, И.В. Разработка методики выбора трикотажных материалов для компрессионной одежды / И.В.Тисленко, В.Е.Кузьмичев: Новое в технике и технологии текстильной и легкой пром-сти: материалы межд. науч.-техн.конф. 25-26 октября 2015 г. Витебск. - ВГТУ, 2015. - С.162-164. – 0,5п.л./0,25 п.л.

7. Тисленко, И.В. Compression ability of knitted materials for underwear / И.В.Тисленко, В.Е.Кузьмичев:5 th Smartex-2015 Egypt (World Textiles Conference), [engineering - applied arts - specific sciences] November 23 - 25, 2015, Kaferelshikh University, Egypt.SMARTexEGYPT\smartexCD\smartexCD\res.html. – 0,5 п.л./0,25 п.л.

8. Тисленко, И.В.Методика оценки компрессионной способности материалов для корректирующей одежды / И.В.Тисленко, ЧенЧжэ, В.Е.Кузьмичев // Инновационное развитие легкой и текстильной промышленности (ИНТЕКС 2016) сборник материалов Всероссийской научной студенческой конференции. МГУДТ. Москва, 2016, 5-6 апреля. - С. – 0,25 п.л./0,07 п.л.

9. Тисленко, И.В. Анализ методов построения разверток трикотажной одежды на основе минимизации энергетической функции / И.В.Тисленко, В.Е.Кузьмичев: Молодые ученые - развитию текстильно-промышленного кластера (ПОИСК 2014): сборник материалов межвуз. науч.-техн. конф. аспирантов и студентов с межд.участием.Ч.1.- Иваново: ИВГПУ, 2014.-С.121-123. – 0,375 п.л./0,185 п.л.

Подписано в печать 14.12.2017.

Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Плоская печать.

Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1,11. Тираж 100 экз. Заказ № 3703

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»

Издательский центр ДИВТ

153000, г. Иваново, Шереметевский проспект, 21