

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ивановский государственный политехнический университет»
(ИВГПУ)**

На правах рукописи

ТИСЛЕНКО Илья Владимирович



**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОЕКТИРОВАНИЯ
КОМПРЕССИОННОЙ ТРИКОТАЖНОЙ ОДЕЖДЫ**

Специальность 05.19.04 – Технология швейных изделий

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
профессор В.Е.Кузьмичев

Иваново – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
Список условных сокращений, использованных в работе.....	5
Перечень таблиц	7
Перечень иллюстраций	7
ВВЕДЕНИЕ	13
1 СОВРЕМЕННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И СОСТОЯНИЕ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПРЕССИОННОЙ ОДЕЖДЫ	19
1.1. Ассортимент компрессионной одежды	19
1.1.1. Медицинская компрессионная одежда	21
1.1.2. Спортивная компрессионная одежда	23
1.1.3. Корректирующая одежда	27
1.2. Материалы для изготовления компрессионной одежды....	32
1.2.1. Требования, предъявляемые к материалам.....	32
1.2.2. Виды материалов	40
1.2.3. Способы учета растяжимости материалов при проектировании компрессионной одежды	41
1.3 Воздействие давления одежды на тело человека	52
1.3.1. Механическое воздействие	52
1.3.2. Психологическое восприятие давления.....	59
1.3.3. Физиологическая реакция на компрессионное воздействие.....	61
1.4. Методы расчета плотнооблегающих оболочек.....	63
1.4.1. Основные термины и понятия.....	63
1.4.2. Физические методы.....	67
1.4.3. Геометрические методы.....	72
1.5. Существующие методы проектирования и расчета конструкций компрессионной одежды.....	76
Выводы (обоснование цели и направлений исследования)	80
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТРИКОТАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПЛОСКОМ СОСТОЯНИИ	82
2.1 Объекты исследования.....	84
2.2 Методы измерения показателей растяжения и сдвига.....	84
2.3. Результаты измерения показателей растяжения и сдвига	88
2.4 Измерение показателей растяжения при малых нагрузках	89
2.5 Исследование сокращения поперечных размеров при растяжении.....	91
2.6 Исходные данные для разработки теоретической модели (часть 1).....	92
Выводы по главе 2	93

3	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И КОМПРЕССИОННЫХ СВОЙСТВ ТРИКОТАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПОВЕРХНОСТИ МЯГКИХ ТКАНЕЙ ФИГУРЫ	94
	3.1. Методы и средства исследования.....	94
	3.2. Исследования с силиконом.....	94
	3.2.1. Построение калибровочных графиков "сопротивление датчика - давление"	95
	3.2.2. Построение комплексных зависимостей "удлинение материала - сопротивление датчика - давление".....	98
	3.3. Исследование на реальных фигурах.....	100
	3.3.1. Объекты исследования.....	101
	3.3.2. Построение зависимостей "удлинение материала - давление под оболочкой"	102
	3.4. Разработка классификации компрессионного воздействия одежды и групп трикотажных материалов	109
	3.5. Исходные данные для разработки теоретической модели (часть 2).....	114
	Выводы по главе 3.....	115
4	ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТРЕХМЕРНЫХ ОБОЛОЧЕК ИЗ ТРИКОТАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПЛТНООБЛЕГАЮЩИХ И СДАВЛИВАЮЩИХ ЧЕЛОВЕЧЕСКУЮ ФИГУРУ.....	116
	4.1. Исходные данные для расчета.....	116
	4.2. Теоретический расчет напряжений в триангулированной полигональной сетке.....	117
	4.2.1. Расчет напряжений растяжения.....	119
	4.2.2. Расчет напряжений сдвига.....	120
	4.3. Виртуальная интерпретация теоретических расчетов напряжений в материале.....	122
	4.4. Прогнозирование компрессионного давления.....	125
	Выводы по главе 4.....	126
5	РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПРЕССИОННОЙ ОДЕЖДЫ	128
	5.1. Алгоритм метода проектирования.....	128
	5.2. Экспериментальная проверка.....	130
	5.2.1. Проектирование фрагмента «аватара» фигуры.....	131
	5.2.2. Задание давления и выбор трикотажного материала...	133
	5.2.3. Проектирование виртуальной оболочки объемной формы одежды и ее разверток.....	136
	5.2.4. Построение материальных оболочек одежды	144
	5.2.5. Проектирование компрессионного изделия по известному методу.....	146

5.2.6.Сравнение плоских разверток, полученных по разным методам	148
5.2.7.Сравнение компрессионных изделий, полученных по разным методам	149
Выводы по главе 5.....	152
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	153
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	156
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Показатели геометрических и структурных свойств исследованных материалов.....	170
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Результаты измерений показателей физико-механических свойств	173
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Результаты измерений давления на экспериментальном стенде	183
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Воздействие замкнутой полосы компрессионного материала на области обхватов исследованных фигур $\Phi 2$ - $\Phi 7$	190
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Листинги программ расчета НСО плагин-модуля «SeeJeeCAD2» и положения вершин развертки плагин-модуля «SeeJeeCAD1».....	193
ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Акт внедрения.....	204

Список условных сокращений, использованных в работе

CAD	Computer Aided Design
КО	Компрессионная одежда
O_T	Обхват талии
$O_б$	Обхват бедер без учета выступа живота
$O_{г4}$	Обхват груди четвертый
$O_{бед}$	Обхват бедра
O_k	Обхват колена
$T_{вж}$	Выступающая точка живота
P	Давление
ε	Относительное удлинение трикотажного материала
δ	Относительное сжатие трехмерной поверхности фигуры
σ	Усилие растяжения
R	Радиус кривизны поверхности
θ	Угол сдвиговой деформации
τ	Усилие сдвига
$\sigma(\varepsilon)$	Зависимость «усилие растяжения-отн. удлинение» материала
$\tau(\theta)$	Зависимость «усилие сдвига-угол сдвига»
D_o	Матрица жесткости
$P(\sigma(\varepsilon))$	Трехфакторная зависимость давления от относительного удлинения
KES	Kawabata Evaluation System
$\varepsilon_{вс}$	Относительное удлинение трикотажного полотна вдоль петельных столбиков
$\varepsilon_{пс}$	Относительное удлинение трикотажного полотна поперек петельных столбиков
E	Модуль Юнга
G	Модуль сдвига
ν	Коэффициент Пуассона
u, v	Единичные вектора в плоскости развертки

U, V	Преобразованные единичные вектора u, v на поверхности трехмерной фигуры
ε_{uu}	Относительное удлинение конечного элемента в направлении вектора u
ε_{vv}	Относительное удлинение конечного элемента в направлении вектора v
ε_{uv}	Относительное удлинение конечного элемента в диагональном направлении
$A_{voronoi}$	Площадь ячейки вороного
$K_{компр}$	Коэффициент компрессии трикотажного материала
ε_{49}	Относительное удлинение при усиллии 49 сН/см
EMT	Elongation at Maximum Tension Усилие при максимальной деформации 490сН/см
RT	Эластичность
WT	Энергия растяжения
LT	Линейность кривой растяжения
$2HG$	Гистерезис кривой сдвига при 0,5 град
$2HG5$	Гистерезис кривой сдвига при 5 град
2D	Two dimension Двумерный
3D	Three dimension Трехмерный
НСО	Ненапряженное состояние одежды

Перечень таблиц

Таблица 1.1	Классы функциональной одежды и их назначение [1]
Таблица 1.2	Классификация медицинских компрессионных изделий по степени создаваемого давления принятая в ряде стран [7,11]
Таблица 1.3	Существующие стандарты для определения растяжимости трикотажных материалов.
Таблица 1.4	Показатели компрессионной одежды
Таблица 1.5	Коэффициенты корреляции, связывающие толщину жировых отложений с изменением обхвата талии и давлением нерастяжимой ленты [87]
Таблица 1.6	Свойства механорецепторов кожи человека [84]
Таблица 1.7	Классификация существующих методов проектирования компрессионной одежды по порядку построения разверток.
Таблица 3.1	Характеристики фигур, выбранных для измерения компрессионного давления
Таблица 3.2	Значения параметров P_i , ε_i , σ_i , $\delta_{i\Phi}$ и δ_{iC}
Таблица 3.3	Расчет коэффициентов зависимости давления на участки фигуры $\Phi7$ на основе зависимостей давления на силиконовый материал
Таблица 5.1	Экспериментальные и теоретические значения параметров для компрессионного изделия
Таблица 5.2	Координаты центров масштабирования текстильной оболочки относительно «аватара»
Таблица 5.3	Давление компрессионных шорт, изготовленных по разработанному (1) и известному (2) методам, кПа

Перечень иллюстраций

Рис.1.1	Зависимость компрессионного давления медицинских чулок от высоты. Компрессионный класс давления в области лодыжки соответствует 1-4 группам европейской классификации (Табл. 1.2)
Рис.1.2	Членение спортивной компрессионной одежды. Участки из материала с растяжимостью более 100% для обеспечения свободы движений обозначены серым цветом, с увеличенной воздухо-, влагопроницаемостью – черным
Рис.1.3	Классификация спортивной одежды из высокоэластичных материалов [14]
Рис.1.4	Области поддержки (support) и сжатия (control) мягких тканей [34]
Рис.1.5	Схема типов компрессионной одежды, сгруппированных по антропоморфному признаку расположения на фигуре

Рис.1.6	Способ увеличения давления на заданную область тела (обозначена синим цветом). В правой части рисунка давление увеличено за счет уменьшения радиуса кривизны поверхности с помощью мягкой фигурной вкладки, обозначенной светло-серым цветом [11]
Рис.1.7	Зависимости растяжимости для материалов медицинской компрессионной одежды [59]
Рис.1.8	Относительная деформация материала одежды и объемной трехмерной поверхности. l – конструктивный участок чертежа, соответствующий обхвату объемной формы L_0 , L – значение обхвата в системе «фигура-одежда», δ – относительное уменьшение обхвата, ε – относительное удлинение материала одежды
Рис.1.9	Зависимость растяжимости материала компрессионных гольф от величины заявленных давлений: ось y – растяжимость при 50сН/см, ось x – давление гольф на область лодыжки [58]
Рис.1.10	Измерение размерных признаков для проектирования медицинской компрессионной одежды [76]
Рис.1.11	Использование материалов с различной растяжимостью для создания корректирующего белья. 1- наименее растяжимый материал для уменьшения обхвата талии, 2- материал с высокой формообразующей способностью для плотного облегания, 3- наиболее растяжимый материал для обеспечения необходимой свободы движений и отсутствия складок
Рис.1.12	Исходное сечение обхвата талии (слева), сечение системы «фигура-корсетная одежда» (сплошная линия) (справа) [35]
Рис.1.13	Сечения на уровне обхватов талии. Сплошная линия – при свободном положении тела, пунктирная - при комфортном положении поясной ленты. Точками А-Е обозначены места измерения давления
Рис.1.14	Зависимость давления от изменения радиуса для шести участков голени [96]
Рис.1.15	Деформация участка ноги для материалов с различной растяжимостью [97]
Рис.1.16	Внешний вид дюрометра (а) и схема измерения (б) деформации мягких тканей тела
Рис.1.17	Места измерения модуля упругости Юнга мягких тканей (а) и средние величины и стандартные отклонения измерений (б) [98]
Рис.1.18	Деформация мягких тканей тела под действием давления одежды (а) и вид конечного элемента, моделирующего поверхность тела (б)
Рис.1.19	Шкалы психологической оценки: униполярная шкала давления (а), биполярная шкала свободы движений (б) [3]

Рис.1.20	Моделирование текстильного материала триангулированной полигональной сеткой [126]
Рис.1.21	Положение вершин развертки шестигранной пирамиды на плоскости. Для построения развертки необходимо совпадение длин ребер всех смежных треугольников, выраженное условием (1.25) и преобразованное к виду (1.24).
Рис.1.22	Углы между соседними ребрами, используемые для расчета развертки
Рис.1.23	Развертка верха обуви. Интерактивно заданные геодезические линии сохраняют длину и взаимное расположение при развертывании. Места наибольших искажений показаны стрелками
Рис.1.24	Развертка верха обуви. «Hand-made» - полученная ручным способом в реальных условиях изготовления, «constrained optimization» – с учетом сохранения длины и угла между заданными геодезическими линиями, «unconstrained optimization» – без учета сохранения длин линий и углов между ними
Рис.1.25	Классификация способов развертывания поверхности. Предложенный способ обозначен серым фоном
Рис.1.26	Схема существующего процесса создания шаблонов деталей в «развертывающих» САПР на основе данных трехмерного сканирования фигуры
Рис.2.1	Схема деформирования проб материалов на KES-FB1 [135]
Рис.2.2	Графический вид зависимости «усилие растяжения - относительная деформация», полученная для материала T9 в направлении вдоль петельных столбиков при максимальной нагрузке 490 Н/м
Рис.2.3	Графический вид зависимости «усилие сдвига - угловая деформация» для материала T9
Рис.2.4	Схематический вид графика растяжимости и обозначение площадей под кривыми растяжения (B), релаксации (C) и треугольника abc (A) обозначены заглавными буквами A, B, C
Рис.2.5	Схема сдвиговой деформации пробы материала [135]
Рис.2.6	Показатели, измеряемые при сдвиге пробы материала [135]
Рис.2.7	Детализация графика растяжимости материала T9 _{bc} на участке 0-49сН/см
Рис.2.8	Кривые "усилие растяжения σ - удлинение ε " для материалов T6-T13: a - вдоль петельных столбиков (в.с.), б - поперек петельных столбиков (н.с.), для материалов T1-T5; T14-T19: в - вдоль петельных столбиков (в.с.), г - поперек петельных столбиков (н.с.)
Рис.2.9	Схема измерения поперечного сокращения размеров проб

	материалов
Рис.2.10	Графики для выбора сочетаний величин относительного удлинения и поперечного сокращения ε_{\perp} (ε) для материалов <i>1вс</i> , <i>8вс</i> , <i>11вс</i>
Рис.3.1	Внешний вид экспериментальной установки для изучения компрессионной способности текстильных материалов (<i>а</i>) и схема прижатия материала к упругой подложке при калибровке (<i>б</i>); при измерении давления материала (<i>в</i>): <i>1</i> - жесткая основа ($d = 8$ см), <i>2</i> - упругая подложка из косметологического силикона (толщина 2 см), имитирующая мягкую ткань тела, <i>3</i> – датчик давления, <i>4</i> – омметр, <i>5</i> - калибровочная нагрузка, <i>6</i> – материал
Рис.3.2	Калибровочные кривые и аппроксимирующие их уравнения с линиями доверительных интервалов в случае непосредственного воздействия грузов на силикон (<i>а</i>) и опосредованно через эластичный «компенсатор» (<i>б</i>)
Рис.3.3	Аппроксимированные зависимости между сопротивлением датчика и усилием растяжения материала вдоль петельных столбиков <i>T4вс</i> для прямого измерения давления (<i>а</i>), и через эластичный «компенсатор» (<i>б</i>)
Рис.3.4	Номограмма для определения давления материала $T9_{пс}$ в зависимости от его относительного удлинения
Рис.3.5	Фотографии исследованных фигур
Рис.3.6	Расположение полосы материала для измерения допустимого давления на тело
Рис.3.7	Точки измерения допустимого давления на тело указаны стрелкой
Рис.3.8	Определение значений $\delta_{3\Phi}$ и δ_{3C} для фигуры $\Phi3$
Рис.3.9	Зависимости для согласования результатов параллельных испытаний с учетом характеристик материала, его компрессионной группы, зоны и геометрии поверхности фигуры: <i>а</i> – для точек <i>2,5</i> ; <i>б</i> – для точек <i>1,3,4,6</i>
Рис.3.10	Зоны значений $K_{компр}$ для трикотажных материалов
Рис.3.11	Зависимости давления материала от усилия растяжения материала для четырех компрессионных групп для случая опоры мягкой ткани на костный каркас (<i>а</i>) и для случая отсутствия непосредственной опоры мягкой ткани на костный каркас (<i>б</i>)
Рис.4.1	Деформация элемента полигональной сетки: <i>а</i> – треугольная грань развертки, <i>б</i> – треугольная грань трехмерной полигональной сетки
Рис.4.2	Трехмерная полигональная форма
Рис.4.3	Развертка поверхности выпукло-вогнутой формы <i>а</i> (сверху) - развертка половинки трехмерной полигональной

	<p>формы, полученная для характеристик материала (10-14), цветом обозначена деформация сдвига ε_{uv} (2)</p> <p>\bar{b}(снизу): то-же, цветом обозначена деформация поперечного растяжения ε_{uu} (1)</p> <p>\bar{v}(сверху) - развертка половинки трехмерной полигональной формы, полученная для характеристик материала (10-13, 21), цветом обозначена деформация сдвига ε_{uv} (2)</p> <p>\bar{z}(снизу): то-же, цветом обозначена деформация поперечного растяжения ε_{uu} (1)</p> <p>\bar{d}(сверху) - развертка половинки трехмерной полигональной формы, полученная для характеристик материала (10-13, 22), цветом обозначена деформация сдвига ε_{uv} (2)</p> <p>\bar{e}(снизу): то-же, цветом обозначена деформация поперечного растяжения ε_{uu} (1)</p>
Рис.4.4	Шкала деформаций ε_{uu}
Рис.4.5	Шкала деформаций ε_{uv}
Рис.4.6	Участок полигональной сетки, ограничивающий i точку (a) и вид ячейки Вороного, соответствующего i точке, для расчета её площади и возникающего в ней давления (\bar{b})
Рис.4.7	<p>Диаграммы распределения компрессионного давления:</p> <p>a - развертка показанная на рис.4.3 a, \bar{b}; \bar{b} – развертка показанная на рис.4.3 \bar{v}, \bar{z}; \bar{v} – развертка показанная на рис.4.3 \bar{d}, \bar{e}; \bar{z} - масштаб цветовой шкалы</p>
Рис.5.1	Схема процесса проектирования компрессионной одежды по новому методу
Рис.5.2	Фрагменты сканов реальных фигур $\Phi 1, \Phi 2, \Phi 3, \Phi 7$
Рис.5.3	<p>Алгоритм обработки исходных антропометрических данных реальной фигуры после сканирования для создания участка «аватара» фигуры:</p> <p>a - полигональная поверхность, полученная в результате трехмерного сканирования фигуры; \bar{b} - сечения полигональной поверхности, заданные кубическими сплайнами; \bar{v} - трехмерная NURBS поверхность, построенная на основе сплайнов</p>
Рис.5.4	Точки на фигуре $\Phi 1$ для проектирования давления под компрессионным изделием: $2 - 1150$ Па, $3 - 2000$ Па, $4 - 1530$ Па, $5 - 1065$ Па, $6 - 1065$ Па
Рис.5.5	Задание деталей компрессионного изделия: a - задание линий членения на поверхности «аватара»; \bar{b} - детали в виде участков NURBS поверхности; \bar{v} - детали одежды в виде участков полигональной сети
Рис.5.6	Текстильные оболочки, повторяющие поверхности «аватаров» фигур: $a, \bar{v}, \bar{d}, \bar{z}$ – фронтальные проекции для фигур $\Phi 1, \Phi 2, \Phi 3, \Phi 7$; $\bar{b}, \bar{z}, \bar{e}, \bar{z}$ – профильные проекции для фигур $\Phi 1, \Phi 2, \Phi 3, \Phi 7$

Рис.5.7	Расположение центров масштабирования «аватара» фигуры для получения поверхности НСО: <i>a</i> – профильная проекция, <i>б</i> – фронтальная проекция
Рис.5.8	Интерфейс плагин модуля «SeeJeeCAD2» для расчета формы НСО. Изображенные значения приведены в качестве примера и соответствуют уменьшению обхвата талии на 17%, обхвата через $T_{вж}$ на 20%, обхвата бедер на 20%, обхвата бедра на 12%, обхвата колена на 12%. Нумерация обхватов соответствует рис. 5.7
Рис.5.9	Фрагменты поверхности виртуальных «аватаров» (снаружи) и компрессионных изделий (внутри) для разных фигур
Рис.5.10	Развертки деталей компрессионного изделия с цветовыми схемами относительного удлинения трикотажного материала в горизонтальном направлении (<i>a</i>), масштаб цветовой шкалы - в единицах относительного удлинения (<i>б</i>)
Рис.5.11	Интерфейс плагин-модуля «SeeJeeCAD1» для расчета разверток деталей КО и визуализации напряжений трикотажного материала
Рис.5.12	Топографические схемы распределения давления компрессионной одежды для фигур $\Phi 1$, $\Phi 2$, $\Phi 3$, $\Phi 7$
Рис.5.13	Внешний вид компрессионных изделий, спроектированных по разработанному методу
Рис.5.14	Схемы чертежей базовых конструкций, построенные по методу «Мюллер и сын»
Рис.5.15	Внешний вид компрессионных изделий, спроектированных по методу «Мюллер и сын»
Рис.5.16	Схема совмещения чертежей БК и развертки для задней половины компрессионных изделий для фигуры $\Phi 2$
Рис.5.17	Совмещенные схемы чертежей и разверток компрессионных изделий, разработанных для исследованных фигур.
Рис.5.18	Места измерения давления на фигуре $\Phi 7$

ВВЕДЕНИЕ

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, C.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. Используются 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 источника, включая 95 иностранных.

Глава 1. СОВРЕМЕННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И СОСТОЯНИЕ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПРЕССИОННОЙ ОДЕЖДЫ

1.1. Ассортимент компрессионной одежды

Одежда является многофункциональным предметом первой необходимости, выполняя эстетическую, утилитарную, информационную, защитную функции. Термин функциональная [1] объединяет шесть классов одежды (табл. 1.1), каждая из которых может обладать дополнительными свойствами, позволяющими использовать одежду для более узкого круга потребителей.

Таблица 1.1. Классы функциональной одежды и их назначение [1]

Класс <i>1</i>	Подкласс <i>2</i>	Дополнительное функция <i>3</i>
Защитная	Защита от окружающей среды	Защищает от холода, огня, снега, пыли, УФ излучения
	Защита от биологической, химической, радиационной опасности	Защищает от токсичных газов, попадания на кожу и в организм вирусов, химикатов, радиоактивной пыли
	Защита от ранений	Защищает от резаных и колотых повреждений, ударов, выстрелов
Медицинская	Терапевтическая и восстановительная	Компрессионная при нарушениях работы кровеносной и лимфатической систем, для заживления шрамов
	Биометрическая	Мониторинг физиологических параметров: частоты ударов сердца, давления, температуры тела

Окончание табл. 1.1		
1	2	3
Спортивная		Для улучшения результатов, уменьшения усталости, корректирующая форму для уменьшения сопротивления среды
Корректирующая		Для изменения пластики, улучшения самочувствия и создания привлекательного внешнего вида
Специальная		Для инвалидов, пожилых людей
Многозадачная		Для поддержания функций организма и выполнения требований, возникающих в нестандартных условиях

Для медицинской, спортивной и корректирующей одежды их функциональное свойство возникает при оказании заданного компрессионного воздействия на участки тела.

Внешнее давление одежды на мягкие ткани тела вызывает их деформацию. В случае целенаправленного изменения формы тела компрессионная одежда относится к корректирующему классу функциональной одежды.

Изменение морфологии и пластики тела под влиянием компрессионной одежды будет зависеть от оказываемого ею давления. Во всех случаях под влиянием давления будет происходить сдавливание и перемещение мягких тканей (т.н. эффект «пуш-ап») и уменьшение обхватных размерных признаков, а достижение желаемого эффекта будет зависеть от характеристик используемого материала. При его выборе нужно учитывать способность создавать компрессионное давление, соответствие диапазонам допустимого сдавливания и смещения подкожной жировой и, возможно, мышечной тканей. Таким образом, необходимый результат компрессионного воздействия является следствием правильного выбора материала в

зависимости от назначения одежды, величины оказываемого ею давления на тело и желаемого эффекта коррекции.

Вопросы изучения давления являются важными и для повседневной одежды, хотя причина его возникновения может быть не связана с растяжимостью материала. Зависимость величин давления возникающего в одежде от конструктивных прибавок, определена в работах [2, 3], найдены диапазоны, соответствующие различным уровням комфортности.

1.1.1. Медицинская компрессионная одежда

В медицинской компрессионной одежде давление создают для достижения следующих целей:

- лечение и профилактика заболеваний систем кровообращения,
- лимфодренажной и кроветворной за счет воздействия на мягкие ткани, сосуды и капилляры
- восстановление повреждений кожного покрова после ожогов или хирургических операций
- воздействие на скелетный и мышечный каркас для коррекции и восстановления функций опорно-двигательного аппарата,
- коррекция и восстановление нарушений функции проприоцепции.

Вопросы конструирования, технологии изготовления и допустимые значения компрессионного давления, необходимые для получения лечебного и профилактического результатов, были рассмотрены в работах [4-8].

Виды медицинской одежды на основе конструктивного решения предложены в работе [9]. На основе медицинских исследований разработаны ассортиментные базы медицинских изделий по силе компрессионного воздействия для заболеваний сосудистой системы (табл. 1.2).

Таблица 1.2. Классификация медицинских компрессионных изделий по степени создаваемого давления принятая в ряде стран [7, 11]

Группа компрессионных изделий	Допустимый уровень давления, Па, принятый в разных странах			
	EU	США	Россия	UK(BS 6612)
Класс А	1333-1862	-	-	-
1 группа	1995-2793	1995-2666	менее 1333	1866-2266
2 группа	3059-4256	2666-3999	1333-3332	2399-3199
3 группа	4522-6118	3999-5332	3332-6665	3332-4665
4 группа	более 6517	более 5332	более 6665	

В работе [10] показано, что в целях профилактики отека и уменьшения усталости ног при продолжительном положении стоя или сидя здоровый человек может использовать высокие гольфы низкого уровня компрессионного воздействия с давлением в области голени не более 1066 Па. Возрастаем гидростатической составляющей кровяного давления объясняется применение градиентного компрессионного воздействия с наибольшим значением в дистальных областях ног (на уровне лодыжек) и постепенно спадающим к уровню обхвата бедра. Значения давления, создаваемые медицинскими градиентными чулками в нижней точке обхвата ноги, составляет от 2399 до 6665 Па, уменьшаясь к обхвату бедра до 40% от этих значений – до 933 и 2666 Па (см. рис. 1.1) [11].

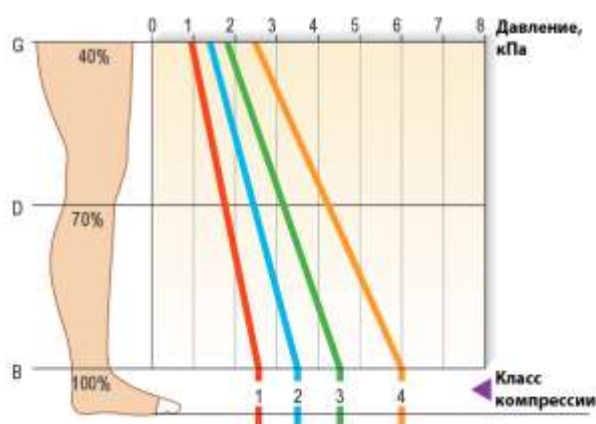


Рисунок 1.1 - Зависимость компрессионного давления медицинских чулок от высоты. Компрессионный класс давления в области лодыжки соответствует 1-4 группам европейской классификации (табл. 1.2)

По сравнению с компрессионными изделиями из нерастяжимых материалов растяжимые удобнее в использовании за счет увеличения свободы движений. Они обеспечивают относительное постоянство компрессионного воздействия при изменении положения тела, недостатком является только противопоказание к использованию растяжимых компрессионных изделий во время сна [11].

Особенно важным для медицинской одежды является поддержание заданных значений давления, так как ее лечебный эффект зависит от правильного соотношения внешнего давления и давления кровеносной системы человека. Для этого расчет конструкций выполняют с учетом ослабления компрессионного воздействия, вызванного усталостью материалов при их длительном растяжении [13].

1.1.2. Спортивная компрессионная одежда

Применение растяжимых материалов создает необходимый уровень эргономического комфорта плотнооблегающей спортивной одежды, обеспечивая прилегание к телу без образования складок. Эффект плотного облегания используется в спортивной одежде для: улучшения комфорта при условии повторения формы тела и создания компрессионного эффекта [21].

Вопросы методологии и процесса проектирования одежды из растяжимых материалов рассмотрены в работах [14-17,56].

Спортивная компрессионная одежда предназначена для воздействия на мышечные ткани и может быть комбинированной (полноростовой с рукавами либо без них, до уровня лодыжек, до уровня колен, до верхней части бедра или в виде закрытого купальника); отдельной (леггинсы, шорты, плавки, джемпер, T-shirt, укороченный облегающий лиф). При амплитудных движениях локальное растяжение кожного покрова в суставных участках локтя и колена достигает 50% вдоль руки, 28% в поперечном сечении, при

наклоне вперед увеличение заднего полуобхвата бедер составляет 35% в вертикальном направлении и 21% в сечении обхвата [18].

Исходной информацией для применения компрессионной спортивной одежды являются: компрессионное воздействие; показатели организма, связанные со спортивной деятельностью; достигаемые спортивные результаты. Сводные результаты от использования компрессионной одежды приведены в [22].

Рекомендуемые значения давления компрессионной спортивной одежды - 667-3332 Па, восстановительной одежды - до 3999 Па. [23].

Для улучшения циркуляции в области конечностей применяют, как и в случае медицинской одежды, градиентное распределение давления. Рекомендуемые минимальные значения давления, необходимого для улучшения гемодинамики составляют, Па: на уровне лодыжки – 2399, на уровне голени – 1866, колена – 1066, нижнего обхвата бедра – 1333, верхнего – 1066 [24]. Согласно другому исследованию минимальные необходимые значения давления составляют 2306 Па в области голени, 2013 Па в области бедра [25].

В работах [26,27] проверены значения давления спортивных компрессионных гольфов (tights) и леггинсов (leggings), изготовляемых серийно. Результаты сравнивались с необходимыми значениями [24,25] соответственно. По результатам измерений сделан вывод о недостаточных величинах давления, оказываемого одеждой на фигуры разных размеров. Известной практикой увеличения компрессионного давления является использование одежды меньшего размера.

Для спортивной одежды разработаны специальные виды растяжимых материалов, такие как Lycra Soft Comfort (для одежды комфортного облегания), Lycra Power (для компрессионной одежды) [21].

Спортивную компрессионную одежду используют:

1) во время физических нагрузок для увеличения физиологических показателей мышечной ткани: мощности, силы, выносливости; улучшения работы кровеносной системы; коррекции формы тела для уменьшения сопротивления среды (воздуха, воды) в скоростных видах спорта; терморегуляции; защиты связок и сухожилий от травм и растяжений

2) во время нагрузок и в период отдыха - для ускоренного восстановления физических показателей и уменьшения болевых ощущений в мышцах

Улучшение физических показателей силы и выносливости достигается благодаря уменьшению вибраций мышечной ткани, улучшению функций проприоцепции, координации движений, уменьшению количества микротравм мышечной ткани при экстремальных нагрузках. Исследование химического состава крови в период восстановления свидетельствует об ускоренном выводе продуктов метаболизма из клеток мышечной ткани при использовании компрессионной одежды [22].

Компрессионная одежда широко применяется в футболе, баскетболе, волейболе, велоспорте [21].

Критическая оценка ряда известных исследований позволяет однозначно утверждать об улучшении спортивных показателей в велоспорте и увеличении показателей прыжковой силы, необходимой для таких видов спорта как баскетбол, волейбол [21].

В спортивной компрессионной одежде применяется избирательное компрессионное и фиксирующее («support») воздействие на отдельные группы мышц и связок [23,28,29], учитывающее различное увеличение объема мышечной ткани во время физических нагрузок, которое может достигать 5%. На рис.1.2 показаны виды компрессионной одежды для легкой атлетики [29]. В работе [30] предложены и обоснованы 19 зон спортивной компрессионной одежды в соответствии с расположением мышечного каркаса и сухожилий на теле человека.

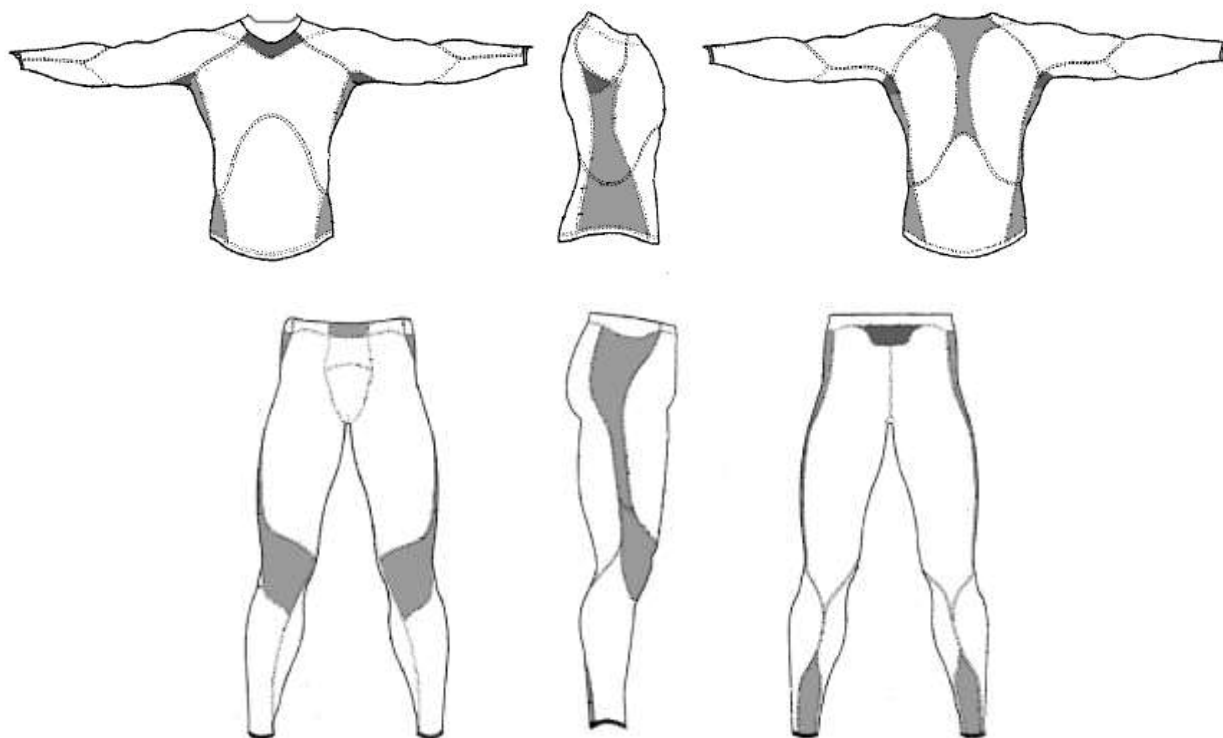


Рисунок 1.2 - Членение спортивной компрессионной одежды. Участки из материала с растяжимостью более 100% для обеспечения свободы движений обозначены серым цветом, с увеличенной воздухо-, влагопроницаемостью – черным

Классификация ассортимента спортивной одежды из растяжимых материалов показана на рис.1.3 [14].

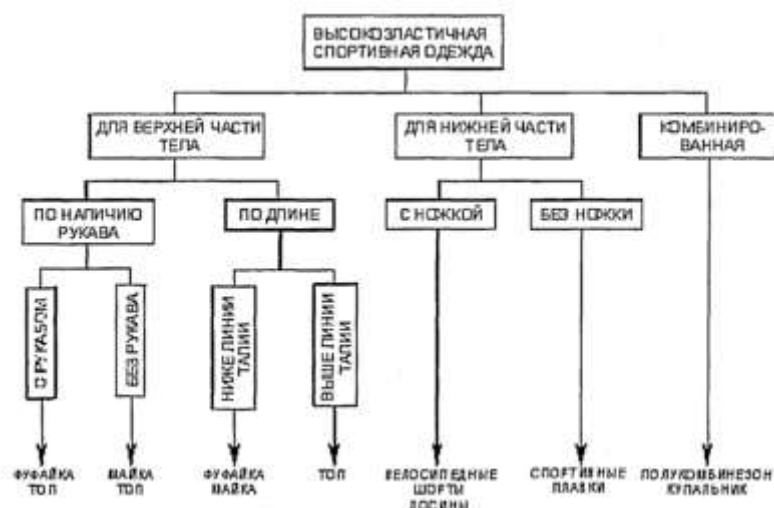


Рисунок 1.3 - Классификация спортивной одежды из высокоэластичных материалов [14]

Недостатком классификации является отсутствие некоторых видов компрессионных изделий, например, чулочно-носочных, и сложность спецификации, вызванную тем, что ряд изделий встречается по два раза.

1.1.3. Корректирующая одежда

Коррекция участков тела может быть достигнута с помощью медицинской и спортивной одежды и бытового корректирующего белья: не случайно, растяжимый материал на основе лайкры впервые был применен именно для изготовления женского нижнего подкорпусного белья.

Изучению эффекта коррекции тела и методов конструирования корсетной одежды посвящены работы З.Т. Акиловой, Н.Л. Корниловой, Г.В. Баландиной, Ю.А. Шаммут, М.П. Ивкина.

Коррекция формы участков тела с помощью одежды может быть явной и неявной, когда эффект не оценивается визуально и сразу, но влияет на физиологические показатели и может проявляться, например, в состоянии здоровья по прошествии определенного времени. Также верно и обратное: видимая деформация участков тела может присутствовать, но не являться целенаправленным изменением их формы (например в медицинской одежде для заживления шрамов). Действующая на мягкие ткани сила со стороны одежды может быть представлена как сумма нормальной и касательной составляющих. В зависимости от их соотношения и величины корректирующий эффект будет вызывать различные изменение сечений поверхности тела в горизонтальной и вертикальной плоскостях визуально воспринимаемые как сжатие, увеличение или вертикальное смещение.

Традиционно считают, что наиболее значительное корректирующее воздействие может быть достигнуто в области талии. Моделирующий эффект по обхвату талии, согласно [31], определен как минимальный при изменении обхвата на 1-2%, средний – 3-5%, максимальный 6-10%. Допустимое

значение давления в области обхвата талии в статическом положении стоя для жесткого корсета из нерастяжимых материалов составляет 2 кПа [32].

При оценке эргономических свойств корректирующей одежды приемлемым считается отсутствие резкого дискомфорта. В научных исследованиях определены границы допустимых изменений физиологических и психологических показателей организма в зависимости от воздействия на разные участки фигуры. Расчетное значение максимального моделирующего эффекта (утяжка обхвата талии) зависит от размера и полноты и составляет согласно результатам работы [33]:

$$O_{\text{Тут}} = 77,44 - 1,51O_{\text{IV}} + 0,637O_{\text{T}}, \quad (1.1)$$

где $O_{\text{Тут}}$ - утяжка талии, O_{IV} – обхват груди четвертый, O_{T} – обхват талии.

Согласно результатам опроса при использовании малорастяжимых и жестких тканей комфортным является только минимальный моделирующий эффект корсета. При использовании тканей со средней и высокой деформационной способностью комфортным является минимальный и средний моделирующий эффект, который находит применение в практическом конструировании корсетов [33]. В результате исследования размерных признаков фигуры, упругости мягких тканей торса и величины коррекции показано [36], что величина утяжки не зависит от соотношения величин O_{IV} и O_{T} и должна рассчитываться по формуле:

$$\Delta O_{\text{T}} = 3,4 + 0,03O_{\text{T}} - 1,43VO_{\text{T}}, \quad (1.2)$$

где VO_{T} – усредненное значение упругости мягких тканей в обхвате талии.

После расчета значение ΔO_{T} уточняют в зависимости от жировых отложений в области O_{IV} и вероятности образования складок мягких тканей в этой области. Также в работе получена формула для расчета утяжки по линии обхвата O_{IV} .

В работе [8] разработана классификация участков плотнооблегающей одежды по способам формозакрепления. Показано, что максимальные значения заужения могут быть получены на замкнутых участках обхватов груди, талии, бедра, колена. На условно замкнутых и незамкнутых участках верхней опорной поверхности (участок от уровня глубины проймы до верхней точки плечевого шва) плотное прилегание создается в условиях двухосного растяжения материала замкнутого в вертикальной плоскости в области плечевого шва. Прием создания конструктивных вырезов и создания искусственных условно-замкнутых участков используется для визуального акцентирования и увеличения объема участков мягких тканей и коррекции силуэтной формы.

Целями корректирующего воздействия бытового белья являются:

1) изменение рельефа, перераспределение жировых отложений и создание сглаженной поверхности фигуры. Жесткость поверхности, устойчивость и гладкость формы скрывают присутствие жировых отложений, негативные последствия возрастных изменений;

2) изменение пластики фигуры. Уменьшение фронтальных проекций обхватов даже за счет их увеличения в сагиттальной плоскости будет восприниматься как положительный результат коррекции фигуры;

3) поддержка (support) участков ягодиц (butt-lift), живота, грудных желез (push-up), придающие стройность и подтянутость фигуре (рис. 1.4).

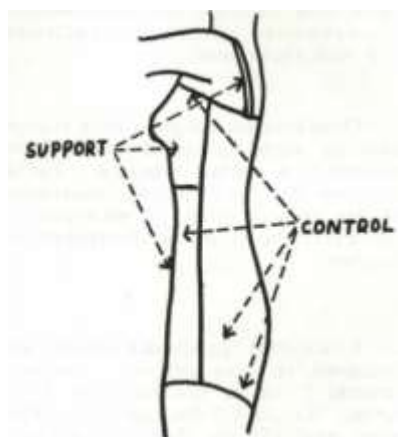


Рисунок 1.4 - Области поддержки (support) и сжатия (control) мягких тканей [34]

Негативными последствиями чрезмерного давления и сжатия мягких тканей могут быть снижение физиологических показателей. Возможные негативные последствия применения корректирующей одежды могут быть вызваны слишком высокими значениями давления, а также чрезмерной продолжительностью непрерывного использования. В работе [35] подчеркивается важность использования корсета только в случаях необходимости, чтобы не допускать ослабления мышечного каркаса.

Функциональные конструктивные элементы по выполняемым задачам разделяют на две группы: коррегирующие, оказывающие моделирующее воздействие; обеспечивающие, предназначенные для прикрепления, фиксации и обеспечения функционирования корригирующих элементов [36]. По степени воздействия на торс косметические корсетные изделия разделены на поддерживающие и моделирующие со значительным и незначительным эффектами.

Современная корректирующая компрессионная одежда характеризуется использованием многослойных пакетов материалов, комбинированием материалов с разными показателями воздухо-, влагопроницаемости и растяжимости для улучшения гигиенических и эргономических показателей качества. Для регулирования компрессионного воздействия используют конструктивные средства. Комбинирование материалов с разной растяжимостью применяется для получения необходимой совокупности параметров давления и относительной деформации, а также для уменьшения складок мягких тканей на краях деталей за счет постепенного уменьшения компрессионного воздействия в этих областях.

Ассортимент корректирующего белья по степени воздействия разделяют на четыре группы: легкой, средней, сильной и очень сильной степени коррекции (light, moderate, firm, extra firm). К одежде легкой степени коррекции относят корректирующие комбинации, полуграции

сглаживающие поверхность фигуры. К одежде средней степени коррекции относят корректирующие плавки, шорты, подтягивающие отдельные участки. Одежда сильной степени коррекции позволяет добиться наибольшего воздействия на форму выбранного участка фигуры, но не пригодна для длительного использования. Одежда очень сильной степени коррекции оказывает воздействие на несколько участков и способна корректировать силуэт фигуры.

На основе анализа существующих типов коррекционного белья и их классификаций нами предложена схема типов компрессионной одежды на основе базовых элементов для пяти основных участков тела (рис.1.5).

Базовые элементы схемы включают одежду для одного из пяти участков тела: руки, грудной клетки, области обхвата талии, области обхвата бедер, ноги. Базовые элементы расположены в таком порядке, чтобы могли объединяться с соседними с образованием одного из существующих видов одежды. Например, объединение базовых элементов одежды, покрывающей руки и грудную клетку образует вид одежды – топ, грудную клетку и талию – майку, область талии и обхвата бедер – корректирующие панталоны (girdls), покрывающей ноги и обхват бедер – леггинсы или шорты (в зависимости от длины базового элемента одежды для ног).

В разработанной схеме выделено три типа базовых элементов: замкнутые только в горизонтальной плоскости и имеющие замыкание в вертикальной (полузамкнутые). Последние подразделяются на два типа: утягивающие и оказывающие вертикальное смещение.

Объединение всех базовых элементов представляет собой компрессионную одежду, закрывающую всю поверхность тела, то есть комбинезон.

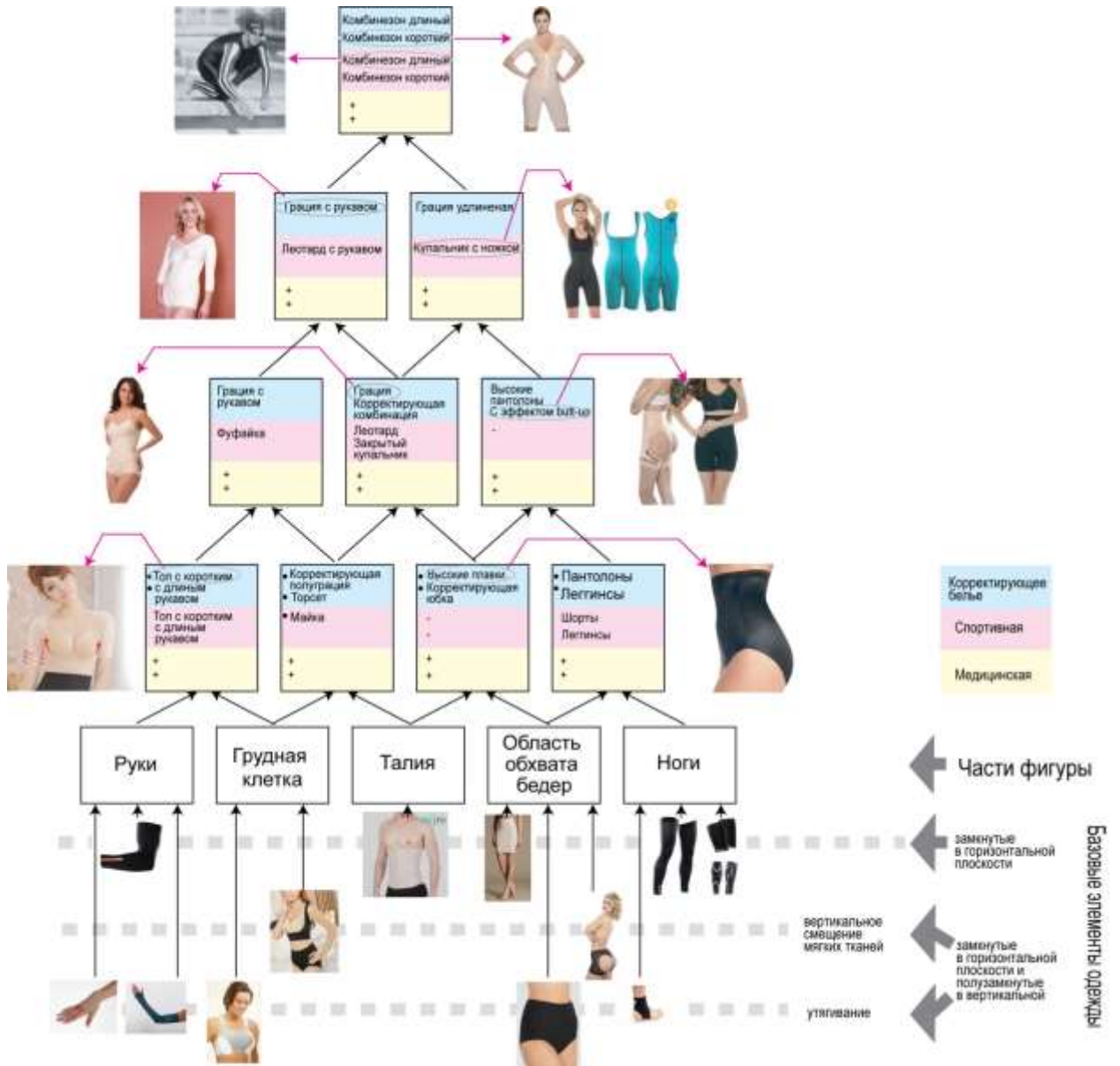


Рисунок 1.5 - Схема типов компрессионной одежды, сгруппированных по антропоморфному признаку расположения на фигуре

1.2. Материалы для изготовления компрессионной одежды

1.2.1. Требования, предъявляемые к материалам

В процессе конструирования плотнооблегающей одежды из растяжимых материалов размер ее деталей необходимо рассчитывать с учетом деформационных свойств используемого материала. После одевания

одежды материал находится в напряженном состоянии и оказывает на тело давление в зависимости от кривизны поверхности фигуры. Несмотря на то, что создать заданное давление можно с помощью соответствующего уменьшения размеров деталей существуют требования к эксплуатационным диапазонам деформаций для каждого вида одежды. Они зависят от необходимой свободы движений. Изучение показателей упруго-эластичных свойств материалов производят для расчета возникающих в материале напряжений по известным деформациям. Прямое измерение значений возникающих напряжений в материале трудно выполнимо с технической точки зрения, значительно проще измерить деформацию материала и рассчитать по ней возникающие напряжения, используя зависимость $\sigma(\varepsilon)$, где $\sigma = [\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}]^T$ – напряжения, возникающие в материале, $\varepsilon = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \theta_{12}]^T$ – относительная деформация материала; 1,2 - направления осей совпадающие с направлениями основы и утка; T – операция транспонирования.

Для ортотропных материалов и линейного приближения (закон Гука) общий вид этой зависимости определяется матрицей жесткости \mathbf{D}_0 и записывается в виде:

$$\sigma = \mathbf{D}_0 \cdot \varepsilon. \quad (1.3)$$

Напряжения, возникающие в материале при плотном облегании участков тела, создают давление в зависимости от кривизны участка поверхности. Для случая цилиндрической поверхности теоретическая зависимость давления P от напряжения материала и радиуса цилиндра R имеет вид:

$$P = \sigma / R \quad (1.4)$$

где σ – тангенциальная составляющая напряжения материала.

В практических целях эту зависимость применяют, например, при уменьшении радиуса кривизны материала с помощью мягких фигурных

вкладок для увеличения давления материала на заданный участок поверхности (рис.1.6).

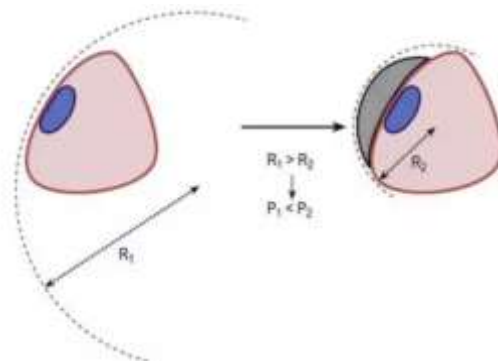


Рисунок 1.6 - Способ увеличения давления на заданную область тела (обозначена синим цветом). В правой части рисунка давление увеличено за счет уменьшения радиуса кривизны поверхности с помощью мягкой фигурной вкладки, обозначенной светло-серым цветом [11]

В общем случае для ортотропного материала напряжение в любой точке поверхности может быть записано в виде тензора второго ранга с двумя главными значениями σ_x и σ_y во взаимно-перпендикулярных направлениях x , y , которые могут не совпадать с выделенными направлениями материала 1,2. Давление материала тогда рассчитывают по формуле

$$P = \sigma_x / R_x + \sigma_y / R_y, \quad (1.5)$$

где R_x и R_y радиусы кривизны поверхности в направлениях x и y ; σ_x и σ_y – определяют по угловой диаграмме растяжимости материала или с помощью аналитической зависимости модуля жесткости от направления приложенного усилия [38,6].

Таким образом, значения давления, оказываемого различными материалами одежды, может быть определено и классифицировано на основе данных о показателях упруго-эластичных свойств материалов, а для его расчета в конкретной ситуации необходимы данные о деформации материала и геометрических свойствах поверхности системы «фигура-компрессионная одежда».

Среди показателей упруго-эластичных свойств растяжимых текстильных материалов наиболее важными для проектирования одежды являются следующие:

1. *Растяжимость*, определяемая как относительное изменение длины пробы под действием заданной нагрузки. Зависимость «усилие-растяжение» имеет нелинейный характер, поэтому измерения проводят для разных нагрузок, а наиболее полные данные получают на основе анализа графика зависимости этих величин, полученных на автоматизированных измерительных комплексах Insitron, Kawabata-FB1 [40, 41].

2. *Эластичность*, равная соотношению долей упругой и общей деформации, выраженному в процентах. При быстрых, амплитудных движениях во время занятий активными видами спорта размеры материала должны восстанавливаться с такой же скоростью, чтобы сохранять контакт с поверхностью тела. Поэтому для материалов спортивной одежды важным является значение динамической эластичности (DER), численно равное отношению площадей под кривыми разгрузки и нагружения материала, выраженному в процентах [20].

3. *Остаточная деформация*, определяющая относительное увеличение размеров материала после снятия нагрузки. Как и эластичность, имеет сложную зависимость от величины и способа нагружения. Наиболее информативными для решения задач конструирования будут значения остаточной деформации при эксплуатационных нагрузках материала.

В зависимости от стандарта растяжимость трикотажных материалов определяют:

- при заданной нагрузке - по ГОСТ 8847-85 [43], EN 14704 [44],
- при непостоянной нагрузке в зависимости от состава материала - по EN 14704 [44], ГОСТ 26435-85 [45],
- для разной степени облегаемости одежды - по ASTM D2594 [46].

Таблица 1.3 - Стандарты для определения растяжимости трикотажных материалов

Стандарт	Измеряемая величина	Признак классификации	Условие испытания	Значение признака классификации
ГОСТ 8847-85	относительное удлинение	нет	60 сН/см	
EN14704	относительное удлинение	содержание эластана	300 сН/см	эластан <5%
			400 сН/см	5% <эластан <12%
			500 сН/см	12% <эластан <20%
			700 сН/см	20% <эластан
EN 14704	нагрузка	нет	50%, 70%, 80%, 100%	
ГОСТ 26435-85	относительное удлинение	линейная плотность полиуретановой нити	118 сН/см	До 14,5 текс
			176 сН/см	14,6-29,5 текс
			225 сН/см	Более 29,6 текс
ASTM D2594	нагрузка	степень облегания фигуры	Относительное удлинение пробы: 15% - вдоль петельных столбиков, 30% - поперек петельных столбиков	свободная
			Относительное удлинение пробы: 35% - вдоль петельных столбиков, 60% - поперек петельных столбиков	повторяющая пластику фигуры

Для плотнооблегающей одежды, формообразование которой происходит за счет упругой растяжимости материала, важным является требование сохранения размеров и показателей свойств в течение всего срока эксплуатации. Поэтому кроме испытаний материалов по указанным стандартам, в научных исследованиях измеряют стабильность показателей упруго-эластичных свойств материалов, специфичного для их времени использования.

Медицинская компрессионная одежда, применяемая для заживления нарушений кожного покрова, выполняет свои функции при относительных деформациях 11-25%. При проектировании компрессионной одежды, предназначенной для восстановления людей после операций, обычно проектируют уменьшение размеров базовой конструкции на 20% [57]. Виды кривых растяжимости материалов медицинской одежды, представлены на рис. 1.7.

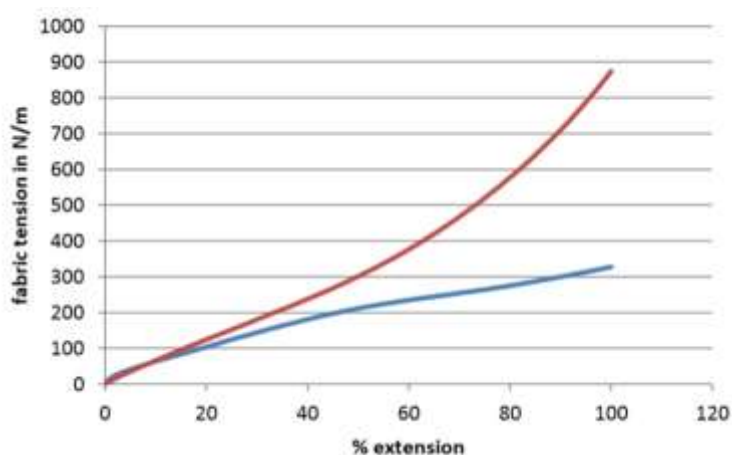


Рисунок 1.7 - Зависимости растяжимости для материалов медицинской компрессионной одежды [59]

К таким изделиям предъявляют наиболее жесткие требования к сохранению способности компрессионного воздействия в течение срока службы. Усилие растяжения деформированного материала со временем ослабевает из-за усталости и снижения жесткости материала. Для моделирования реальных условий в работе [13] измеряли уменьшение упругой силы, возникающей в материале, при постоянных величинах относительного удлинения: 5, 15, 25%. Для измерения сравнивали показания через 10 минут и 24 часа после нагружения. Лучшие показатели были зафиксированы для поперечновязанного полотна с включением резиновой нити – уменьшение упругой силы на 4% до значения 25 сН/см. Уменьшение для основовязанных полотен составило от 8 до 40% при значениях упругой силы 60-140 сН/см.

В плотнооблегающей одежде растяжимый материал, имеющий возможность повторить неоднородный характер деформации кожного покрова, накапливает остаточные деформации в наиболее подвижных местах. Таким образом, в отличие от статической нагрузки, с ростом растяжимости материала происходит увеличение доли остаточных деформаций на отдельных участках плотнооблегающей одежды, как показано в работе [49].

Высокие эстетические и эргономические требования предъявляют к спортивной компрессионной одежде (СКО). Материалы, предназначенные для СКО, выполняют свои функции в диапазоне растяжений от 20 до 70%. Поэтому растяжимость таких материалов исследуют в диапазоне деформаций до 100%. При относительной деформации 100% сила растяжения материалов спортивной одежды составляет 140-210 Н/см [19].

Расчет пределов заужений деталей с учетом направления раскроя для создания медицинских изделий с заданными компрессионными свойствами выполнен в работе [6]. Для этого экспериментально определена зависимость модуля упругости трикотажных полотен от направления раскроя и величины удлинения, а также изучены упруго-эластичные свойства трикотажных полотен при их двойном сложении. Таким образом, по мнению авторов, во-первых, можно уменьшить ассортимент материалов для оперативного создания кастомизированной одежды с заданным уровнем давления и, во-вторых, изменять давление одежды без перерасчета пределов заужения и перестроения конструкции. Однако для использования предлагаемого метода необходимо провести измерения зависимости удлинения от усилия растяжения для направлений материала с шагом 10 град, что требует значительной затраты рабочего времени и применения специального автоматизированного оборудования на этапе формирования базы исходных данных.

В табл. 1.4 систематизированы сведения о рекомендуемых величинах давлений под компрессионной одеждой и растяжимости материалов, используемых для её изготовления.

Таблица 1.4 - Показатели компрессионной одежды

Область применения	Назначение	Требования к одежде		Требования к материалу	
		рекомендуемое давление, кПа	источник	деформация растяжения, %	источник
Медицина	Реабилитация шрамов	2-3,3 (предельное 5,3)	[60]	15-20	[59]
	Регуляция кровообращения и лимфотока с помощью чулочно-носочные изделий	2-8,0	[67]		
Спорт	Утягивание подкожной жировой ткани, регуляция кровообращения, ускоренное восстановление мышц	0,65-2,4. Давление возрастает для участков: колено – верхняя часть бедра – нижняя часть бедра – икроножная мышца - лодыжка	[61]	Более 100 (для обеспечения свободы движений)	[61]
Коррекция фигуры	Коррекция мужской фигуры	0,65-4,0	[64]	менее 40	[65]
	Коррекция женской фигуры	0,8-3,6	[65]		
	Сильная коррекция верхней части торса женской фигуры	до 6,6	[66]		
Повседневное нижнее	Комфорт, гигиена	0,4-1,3	[62], [63]	3,5...12,7	[69]

Таким образом, диапазон значений давления для компрессионных изделий составляет 0,4-8 кПа (3-60 мм рт.ст.). Воздействие менее 400 Па считается малым и не рассматривается как компрессионное [2].

Наиболее полное представление об упруго-эластичных свойствах материала в виде графических зависимостей приложенного усилия и деформации материалов получают на специализированных измерительных комплексах Kawabata-FB1, Insitron. Кроме анализа внешнего вида

графических зависимостей на основе автоматизированной обработки полученных данных получают показатели, необходимые для оценки эксплуатационных свойств материалов.

Из рассмотренных работ следует, что для создания современной компрессионной одежды необходимы детальные данные о зависимости деформации материала от величины и направления усилия растяжения.

1.2.2. Виды материалов

Растяжимость текстильного материала может возникать за счет следующих факторов:

1) растяжения волокон, состоящих из упругих цепочек молекул полимерных материалов, например, эластана или латекса;

2) пружинистой структуры бикомпонентных волокон, например, созданных на основе полиэстера и получивших коммерческое название эластерелл;

3) текстурированной формы волокон полимеров, полученной термическим или химическим способом;

4) изгиба и изменения взаимного расположения нитей материала под действием внешней нагрузки. Трикотажные материалы, обладающие более «пружинистой» петельной структурой, растягиваются легче по сравнению с тканями. Растяжение тканей в диагональном направлении происходит с изменением сетевого угла ячеистой структуры материала, определяющего взаимное расположение нитей материала;

5) заключительной обработки материала, например, в процессе мерсеризации хлопчатобумажного трикотажа под внешним натяжением [47].

Известно, что наилучшим соотношением свойств растяжимости и формоустойчивости обладают трикотажные материалы, в состав которых включены эластомерные волокна. В 1940 году был впервые синтезирован

полимер полиуретана, в 1959 году фирмой DuPont (США) было запатентовано полученное на его основе эластомерное волокно спандекс (европейское название – эластан). В 1962 году новый тип волокон получил коммерческое название «Лайкра». Применение «Лайкры» для материалов одежды было начато с материалов для нижнего облегающего и корректирующего женского белья и мужских чулочных изделий.

В повседневной одежде используют материалы с содержанием лайкры 2-5%. Такого содержания достаточно для создания необходимых свойств драпируемости и посадки изделия. В составе материалов для корректирующей одежды (foundation garments) содержание эластичных волокон может достигать 45% [51]. Материалы с содержанием лайкры до 15-40% применяют в спортивной одежде [21], обеспечивая упругие деформации свыше 100%.

Недостатками волокон эластана являются низкое влагопоглощение - 0,3%, препятствующее быстрому отводу выделяемой телом влаги в виде жидкости и снижающие показатели термofизиологического комфорта. Материал в чистом виде также является очень гладким и скользким. Согласно исследованиям [52] поверхность материала с количеством точек контакта с поверхностью тела более 1500 ед/см² вызывает ощущение прилипания к телу и снижает сенсорный комфорт, а низкий коэффициент трения делает материал в чистом виде неудобным и даже опасным для сидения во время занятий спортом из-за опасности скольжения.

1.2.3. Способы учета растяжимости материалов при проектировании компрессионной одежды

Процесс растяжения материала, облегающего объемную поверхность тела можно условно разделить на три составляющих: (1) деформацию растяжения материала, (2) формообразующую (прилегание материала к поверхности), (3) корректирующую (изменение формы участка поверхности

тела под действием давления материала). Будем считать, что за эти процессы отвечают соответственно компрессионная, формообразующая и корректирующая способности материала.

Растяжимости материала как единичного показателя не всегда достаточно для расчета напряжений, возникающих в материале. В практических целях его использование оправдано простотой определения, но точный расчет необходимо производить на основе кривой растяжимости, отражающей зависимость напряжения от деформации $\sigma(\varepsilon)$ для всего диапазона нагрузок, возникающих в одежде. Тангенс угла наклона графика кривой растяжимости определяет упругость материала [7]. При интерполяции кривой растяжимости линейными участками упругость материала может иметь несколько значений в зависимости от диапазона значений относительного удлинения [53].

При заданных относительном удлинении ε и форме облегаемого участка поверхности растяжимость материала будет определять напряжения, возникающие в материале и, следовательно, его давление P на поверхность. Взаимозависимость величин P и ε определяет компрессионные свойства материала на заданном участке формы, и может быть выражена зависимостью $P(\varepsilon)$.

Для определения *формообразующего* свойства необходимо найти зависимость каких-либо геометрических параметров, определяющих форму, которую принимает материал (при условии отсутствия складок) от условий, характеризующих процесс растяжения - усилия или относительной деформации материала.

Корректирующую способность материала по отношению к заданному участку поверхности определим как зависимость относительного изменения δ геометрических показателей трехмерной формы от относительного удлинения материала ε . Величина корректирующей способности зависит от упруго-эластичных свойств поверхности тела, выбора условий ее

деформации и способов создания нагрузки. Известным способом задания деформации формы тела является относительное изменение обхватов на антропометрических уровнях за счет утягивания материалом. Соотношение между деформациями материала и мягких тканей тела может быть различным. В случае, когда одна из величин является пренебрежимо малой по сравнению с другой, например, для высокоэластичных материалов (случай $\varepsilon \gg \delta$) или для жесткой корсетной одежды (случай $\varepsilon \ll \delta$), расчет деталей одежды производят с учетом одной из деформаций - ε или δ . В случае $\varepsilon/\delta \approx 1$ деформации обоих объектов будут одинаково влиять на величину возникающего давления и расчет деталей необходимо производить с учетом обеих величин. Рис 1.8 показывает процесс деформации двух взаимодействующих объектов – фигуры и одежды.

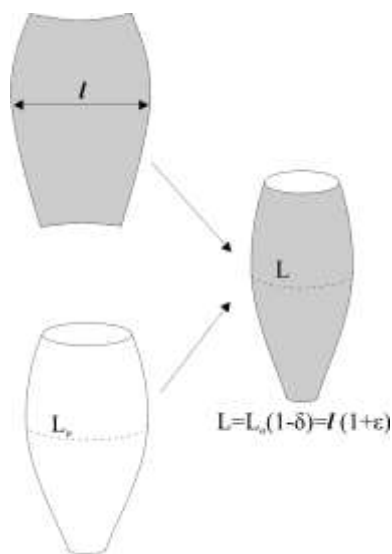


Рисунок 1.8 - Относительная деформация материала одежды и объемной трехмерной поверхности:

l – конструктивный участок чертежа, соответствующий обхвату объемной формы L_0 ,
 L – значение обхвата в системе «фигура-одежда», δ – относительное уменьшение обхвата, ε – относительное удлинение материала одежды

Для изолированного рассмотрения компрессионного и формообразующего свойств от корректирующего при их определении можно считать, что форма трехмерной поверхности, задаются ее начальным состоянием, то есть возможным изменением радиусов, рельефа поверхности из-за ее деформации можно пренебречь. При таком подходе изучение компрессионного и формообразующего свойств материала не будут зависеть от деформации участка трехмерной поверхности и измерение этих свойств

можно выполнять для неизменной, жесткой формы. В случае исследования давления, возникающего в системе «фигура-одежда», три свойства материала являются взаимосвязанными и определяют сложный характер взаимодействия двух деформируемых объектов.

Компрессионное свойство. Для выявления компрессионной способности материала необходимо установить зависимость оказываемого им давления P на объемную поверхность от относительного удлинения ε , вызванного растягивающим усилием σ . В экспериментальных исследованиях по изучению компрессионных свойств материала и построению зависимости давления от условий деформации обычно используют цилиндрические формы [54, 55].

Теоретический расчет давлений для более сложных случаев, плотного облегания конической поверхности и поверхностей двойной кривизны – шара и гиперблоида выполнен в работе [37]. В расчетах сделано допущение, что формообразующих свойств материалов достаточно для плотного облегания рассматриваемых поверхностей. В полученных аналитических выражениях давление зависит от плотности эластомерных нитей по утку, и коэффициента упругости (жесткости) эластичной нити. Зная их значения, можно рассчитать давления, возникающие на каждой из параллелей рассмотренных тел вращения. В результате исследований сделан вывод о возможности регулирования давления в каждом поперечном сечении одетой эластичной оболочки в зависимости от величины деформации путем изменения параметров тканой оболочки. Общий вид полученных экспериментальных зависимостей $P(\varepsilon)$ для цилиндрической поверхности совпадает с теоретической (1.4): с уменьшением радиуса кривизны поверхности давление всегда возрастает.

В ряде работ [70, 57, 71] полученные значения давления отличаются от расчетных, что свидетельствует о более сложном характере взаимодействия материала с объемной формой, чем в теоретическом расчете по формуле (1.4)

с использованием зависимости $\sigma(\varepsilon)$, полученной при растяжении материала на плоскости. Причинами этого может быть ряд факторов, например, возникновение силы трения, возрастающей с давлением, и препятствующей свободному передвижению материала по объемной поверхности.

Зависимость давления одежды от растяжения материала лежит в основе способов выбора отрицательных прибавок при проектировании деталей плотнооблегающей одежды. Для построения конструкций спортивной и корректирующей одежды используют разные по величине нагрузки, что не обеспечивает единого подхода к определению типа материала, но свидетельствует о том, что растяжимость материала и условия ее измерения должны соответствовать типу одежды и определенным значениям компрессионного воздействия на фигуру.

Измерение растяжимости используемого материала под действием нагрузки 25 Н/м и расчет размеров деталей базовой конструкции спортивной комбинированной плотнооблегающей одежды разработан в [56]. Применение метода [56] в работе [17] для построения шаблонов велокостюма сопровождалось измерением давления, которое составило менее 1007 Па, при среднем значении 480 Па.

При выборе материалов корректирующего белья использована нагрузка 49 сН/см [74], а измеренные значения давления на уровне обхвата бедер составили от 0,5 до 2,5 кПа.

Результатом применения предлагаемого метода в работах [56, 17, 74] является хорошая посадка изделий на индивидуальных фигурах и получение комфортных значений давления одежды.

В работе [58] измерены растяжимости материалов, используемых для изготовления компрессионных гольфов 1-4 степеней компрессии для двух известных марок производства Германии и Италии. При построении зависимости предполагалось, что создаваемые значения давления соответствуют заявленным, поэтому их проверка не выполнялась.

Полученный график зависимости растяжимости при нагрузке 50 Н/м от давления показан на рис 1.9.

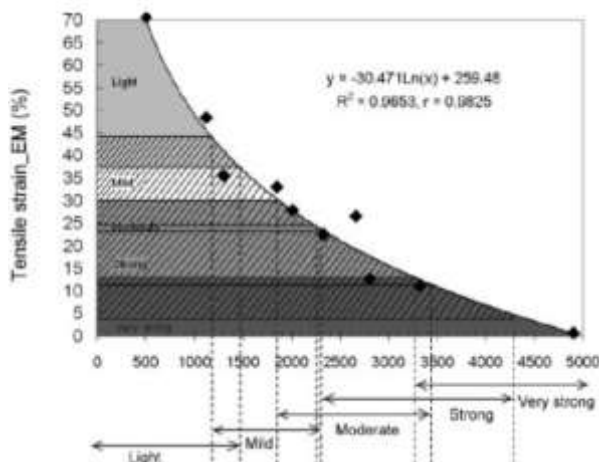


Рисунок 1.9 - Зависимость растяжимости материала компрессионных гольф от величин заявленных давлений: ось y – растяжимость при 50сН/см, ось x – давление гольф на область лодыжки [58]

Таким образом, значение нагрузки составляло 50 Н/м, поэтому его можно использовать в качестве ориентировочного в настоящей диссертационной работе.

Наиболее точный расчет давления необходим при проектировании медицинской компрессионной одежды. В работе [8] расчет заужения деталей выполнен на основе их группы растяжимости, определяемой по ГОСТ 25190-82 для основовязаных полотен. Для измерения размерных признаков использован инструментальный способ на основе специальной методики измерений. Из рис. 1.10 видно, что для задания поверхности необходимо определить обхваты не менее чем через 3 см. Такой же подход мы планируем использовать для задания виртуальной поверхности фигуры.



Рисунок 1.10 - Измерение размерных признаков для проектирования медицинской компрессионной одежды [76]

Известно, что для промышленного серийного конструирования необходимо определить размерную сетку изделий на основе интервалов безразличия. Качество компрессионных изделий обеспечивается при необходимом воздействии на тело, поэтому для задания интервалов безразличия компрессионной одежды необходимо определить допустимый диапазон давления для проектируемого вида одежды. В разных участках фигуры чувствительность к возрастанию давления (pressure sensation) имеет разные значения, поэтому очевидно, что при определении интервалов безразличия решающее значение будет иметь величины давления одежды на наиболее чувствительные участки поверхности тела.

Таким образом, при индивидуальном проектировании интервал безразличия зависит от растяжимости, а при промышленном серийном проектировании растяжимость трикотажных материалов также определяет величину межразмерных интервалов.

Для бытовой трикотажной облегающей одежды желательно осуществлять проектирование так, чтобы межразмерный интервал был вдвое больше чем определяемый межразмерным интервалом размерных признаков типовых фигур [77]. В типовых методах проектирования диапазоны пределов заужений или прибавок определяют для заданных групп растяжимости. Поэтому количество групп растяжимости должно быть таким, чтобы уменьшить количество разрабатываемых шаблонов и достижения давления (или уровня комфортности) в заданном диапазоне. Как отмечается в работе [77] использование относительных пределов заужений (%) при проектировании является более точным, чем использование абсолютных прибавок (см), поскольку одинаковые значения прибавок для разных размеров обеспечат разное относительное изменение линейного размера шаблона и, соответственно, значений давления и качество прилегания.

Использование групп растяжимости, предлагаемых в ГОСТ 7474-88, является неудовлетворительным при проектировании спортивной и бытовой

одежды [77,78]. Новая классификация из пяти групп растяжимости и соответствующие им пределы заужений и прибавки в зависимости от размера рассчитаны в работе [77]. Классификация трикотажных полотен из шести групп растяжимости и способ расчета прибавок на основе уравнения регрессии разработаны в [78].

Из рассмотренных примеров следует, что растяжимость материала необходимо учитывать при задании диапазона компрессионного давления, определении интервала безразличия и размерной сетки при серийном проектировании одежды.

Формообразующее свойство. Исследование формообразующего свойства трикотажных материалов и способы его определения и измерения выполнены в работах Е.Г. Андреевой, Г.И. Суриковой, Н.Л. Корниловой, О.С. Болдовкиной, Г.В. Баландиной.

В работе [37] созданы теоретические основы процесса формообразования текстильных оболочек для трехмерных примитивных форм развертываемых и неразвертываемых поверхностей (конус, сфера). За критерии оценки формообразующих свойств приняты коэффициенты сжатия вдоль и поперек эластичного полотна после влажно-тепловой обработки. Расчет значений коэффициентов был выполнен для широкого ассортимента поперечновязанных полотен.

В работе [80] разработан способ расчета показателей формообразующих свойств трикотажного полотна на основе экспериментального измерения допустимого угла перекоса нитей от их относительных удлинений вдоль и поперек полотна ε_x и ε_y . Полученные формулы учитывают растяжимость материала и позволяют определить заужение деталей и прибавки в прилегающей одежде. За основу расчета взята теория разверток чебышевской сети. На основе полученных зависимостей деформации растяжения от угла перекоса нитей рассчитаны прибавки к деталям бытовой женской одежды.

В работах [81, 36] формообразующее свойство материала определено как отношение площади прилегания материала к площади покрываемой полусферы при его нагружении в одноосном и двуосном направлениях. При таком определении взаимосвязь свойств материала с формой поверхности прослеживается наиболее наглядно, так как для расчета используется трехмерные параметры объемной поверхности. Результаты измерений использованы для определения количества деталей, расположения линий членения, необходимости создания выточек в корсетной одежде в трехмерной среде проектирования BustCAD. Кроме упруго-эластичных свойств материала, при расчетах параметров деталей учитывают изменение объемной формы грудных желез под действием давления материала. Таким образом, расчет деталей конструкции выполняют с учетом корректирующей способности материала.

В работе [62] проведено экспериментальное исследование формы поверхности материала, прилегающего к поверхности тела, представленного участком выпукло-вогнутой (гиперболической) поверхности. Получена зависимость силуэта, характеризуемого величиной воздушного зазора на уровне талии, от сочетания параметров конструкции: пределов заужения материала на обхватах $O_{гз}$ и $O_б$ и стрелы прогиба боковых срезов f . Например, для исследованных материалов «велли» и «ластик» для полного прилегание в области талии типовой фигуры 158-96-104 конструкции с прямого силуэта ($f=0$) пределы заужения деталей должны составлять не менее 9 и 13% соответственно. В работе рассмотрена комфортность создаваемого давления. Для каждой группы растяжимости материалов (ГОСТ 8845-92) рассчитаны верхние границы пределов заужений на основе условия комфортности возникающего давления на тело.

Таким образом, в рассмотренных работах [36,37,62,80,81] предложены количественные показатели формообразующих свойства трикотажных материалов. Показано, что прилегание материала к криволинейной

поверхности за счет упругого растяжения приводит к созданию переменного рельефа давления на поверхность.

Для получения равномерного распределения давления одежда в недеформированном состоянии должна повторять форму одеваемой поверхности системы «фигура-одежда». Поэтому формообразующая способность материала является одним из определяющих факторов при задании элементов конструкции – количества и расположения линий членения формы и вытачек. Используемый метод построения должен, в свою очередь, обеспечивать такую возможность с необходимой точностью. Известно, что наибольшей гибкостью при оптимизации и выборе конструктивного решения обладают инженерные методы построения разверток поверхности, использующие в качестве исходных данных трехмерную поверхность фигуры.

Корректирующее свойство. Изменение размеров тела под действием материала будем рассматривать как проявление его корректирующего свойства. В одной из первых работ по изучению корректирующего воздействия растяжимых материалов, выполненных фирмой DuPont [49], были измерены относительное уменьшение обхвата бедер для облегающей (form-persuasive) и корректирующей (foundation) одежды и значения давлений в области выступающей точки ягодиц. Значения составили 896 Па и 2% для облегающей, 1585 Па и 3% для корректирующей. Для корректирующей одежды значение сжатия отдельных участков мягких тканей составило более 50 %. По мнению автора, воздействие одежды в этой области необходимо оценивать по изменению геометрии участков тела в боковой проекции.

Теоретическая модель для расчета заужения материала, создания заданного давления на цилиндрическую поверхность с учетом её упругой деформации и экспериментальная верификация расчетов для предплечья

выполнена в работе [85]. Зависимости предела заужения Re от давления P выражена формулой (1.6)

$$Re = \frac{1}{1 + \frac{2\pi EI(CF)}{C_{human}P}} \quad (1.6)$$

где EI – коэффициент упругости материала, CF – компрессионный фактор, C_{human} – обхват предплечья, P – заданное значение давления.

Для расчета использован компрессионный фактор CF , который учитывает деформацию мягких тканей тела. Среднее значение CF для группы из 34 человек составило 0,9.

Исследование корректирующей способности текстильных материалов при облегании полусферы, моделирующей форму грудных желез, проведено в работах [81, 36]. Параметр, определяющий корректирующее воздействие, равен отношению растягивающей нагрузки к изменению высоты полусферы Δh . Модуль упругости полусферы измеряли с помощью вдавливающего миометра. На участках, где значения корректирующего давления должно быть большим или его рельеф может быть неравномерным используются материалы с наибольшей корректирующей способностью (и соответственно меньшей растяжимостью), как, например, на переднем полуобхвате талии, (рис.1.11).



Рисунок 1.11 - Использование материалов с различной растяжимостью для создания корректирующего белья: 1- наименее растяжимый материал для уменьшения обхвата талии, 2 - материал с высокой формообразующей способностью для плотного облегания, 3 - наиболее растяжимый материал для обеспечения необходимой свободы движений и отсутствия складок.

1.3. Воздействие давления одежды на тело человека

Комфортность компрессионной одежды определяется тремя основными факторами: физическим, психологическим, физиологическим [86]. Рассмотрим механические изменения, происходящие с мягкими тканями тела, т.к. они являются определяющими при создании эффекта коррекции.

1.3.1. Механическое воздействие

Для достижения необходимого эффекта коррекции фигуры и расчета формы деталей кроя необходимо определить зависимость давлением и относительным изменением размерных признаков тела $P_i(\delta_i)$. Упруго-эластичные свойства мягких тканей и кривизна поверхности тела определяют вид этой зависимости для каждого участка, а чувствительность (или другие психо-физиологические факторы) – верхнюю границу допустимых значений давления. В качестве объектов для оценки действия давления одежды можно использовать: реальные фигуры; манекены, моделирующие упруго-эластичные свойства мягких тканей; виртуальные аватары.

В ряде работ анализ изменений размерных признаков и наглядное представление формы тела выполнены на основе горизонтальных сечений фигуры. В работах [87-89] использованы горизонтальные сечения, полученные с помощью механических приспособлений (sliging gauge). В работе [49] для изучения корректирующего воздействия в области обхвата бедер проведено фотографическое измерение профиля тела в сагиттальной плоскости, проходящей через выступающую точку ягодиц, показаны различные эффекты изменения их формы под действием давления одежды.

С появлением технологий трехмерного сканирования для получения сечений и анализа корректирующего воздействия одежды используют промышленные бодисканеры [65, 91]

Из-за неравномерного распределения областей коррекции по периметру обхватов и различия упруго-эластичных свойств мягких тканей изменение длины обхвата не всегда адекватно отражает степень коррекции фигуры. В ряде случаев более точно корректирующий эффект может выражаться изменением проекционных диаметров или их соотношением. Известным фактом является то, что визуально эффект коррекции в области талии воспринимается во фронтальной проекции, а при уменьшении обхвата может происходить даже увеличение передне-заднего диаметра (рис.1.12).

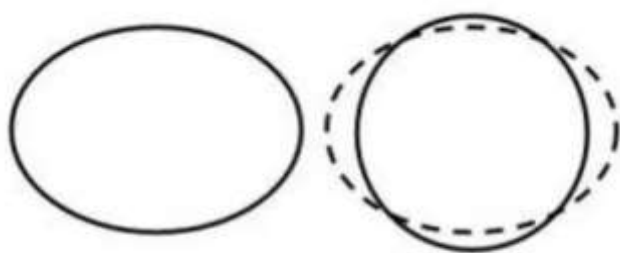


Рисунок 1.12 - Исходное сечение обхвата талии (слева) и сечение системы «фигура-корсетная одежда» (сплошная линия) (справа) [35]

Для субъективного определения степени воздействия корректирующей поясной одежды [64] использованы три параметра – сдавливание живота, утонение талии, подъем уровня выступающей точки ягодиц, которые объективно могут быть выражены через измерение проекционных размеров тела на уровнях талии, выступающей точки живота, а также высоты выступающей точки ягодиц. В работе [94] измерено относительное уменьшение обхватов на уровне талии, выступающей точки живота, бедер для 4 человек и 3 корректирующих поясов. Значения давления на этих обхватах измерены в 12 точках. Усреднения полученных данных и построения графиков зависимостей давления от деформации не производилось, что затрудняет применение полученных в работе результатов.

В работе [87] выполнено измерение комфортных значений давления и длины нерастяжимой ленты расположенной на уровне обхвата талии. Поскольку радиус кривизны сечения тела в этом обхвате является

непостоянным, измерения усреднялись по 5 точкам поверхности *A-E* (рис. 1.13). Для 10 человек величины комфортного сдавливания тела составили от 3 до 11%, комфортные давления, измеренные в точках *C* на вдохе составили – от 800 до 2799 Па. В работе также была изучена зависимость комфортных значений давления и относительного уменьшения обхвата от толщины жировых отложений. Вычисленные коэффициенты корреляции изученных факторов приведены в табл. 1.5:

Таблица 1.5 Коэффициенты корреляции, связывающие толщину жировых отложений с изменением обхвата талии и давлением нерастяжимой ленты [87]

<i>первый фактор</i>	<i>второй фактор</i>	<i>коэффициент корреляции</i>
относительное изменение обхвата талии	толщина жировых отложений в точке <i>A</i>	0,72
относительное изменение обхвата талии	толщина жировых отложений в точке <i>C</i>	0,61
давление в точке <i>A</i>	толщина жировых отложений <i>A</i>	0,55
давление в точке <i>C</i>	толщина жировых отложений в точке <i>C</i>	0,45

Усредненное значение давления по всем измерениям при 5% уменьшения длины поясной ленты составило 2333 ± 280 Па. Согласно результатам работы [31] моделирующий эффект в области обхвата талии считается максимальным при 6-10%, средним при 3-5% и минимальным при 1-2%.

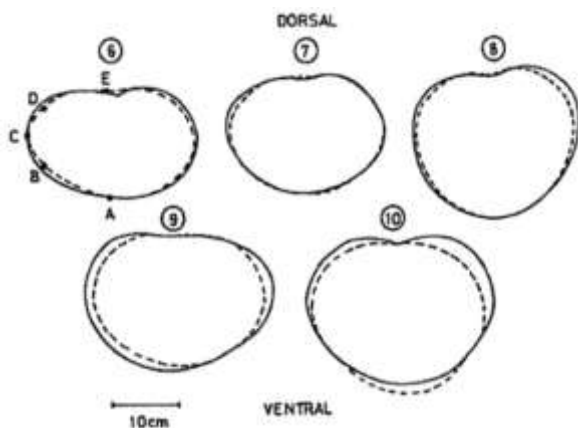


Рисунок 1.13 - Сечения на уровне обхватов талии. Сплошная линия – при свободном положении тела, пунктирная - при комфортном положении поясной ленты. Точками *A-E* обозначены места измерения давления [87]

По измерениям [32] верхняя граница давления корсетной одежды в области талии в положении стоя не должна превышать 1,5 кПа, в этом случае возникающее во время движения тела давление не превысит 4 кПа, а одежда будет комфортной с корректирующим эффектом и относительно безвредной для здоровья.

Для участков фигуры, форма сечения которых близка к окружности, зависимость давления от изменения формы может быть представлена в виде графика $P(\Delta r)$, где r – радиус сечения. В работе [96] экспериментально определены зависимости $P(\Delta r)$ для каждого из шести участков голени (рис. 1.14), аналитический вид зависимостей имеет вид (1.7)

$$\varepsilon_r = a \cdot e^{b \cdot P} + c \cdot e^{d \cdot P} \quad (1.7)$$

Для каждого из участков найдены коэффициенты a , b , c , d (1.7).

Таким образом, в качестве изучаемых параметров фигуры могут быть выбраны: обхваты и сечения, проекционные диаметры, соотношение переднезаднего и фронтального проекционных диаметров [89], объем участков тела между заданными (горизонтальными) плоскостями сечений [49], расположение выступающих точек фигуры [36, 94, 49].

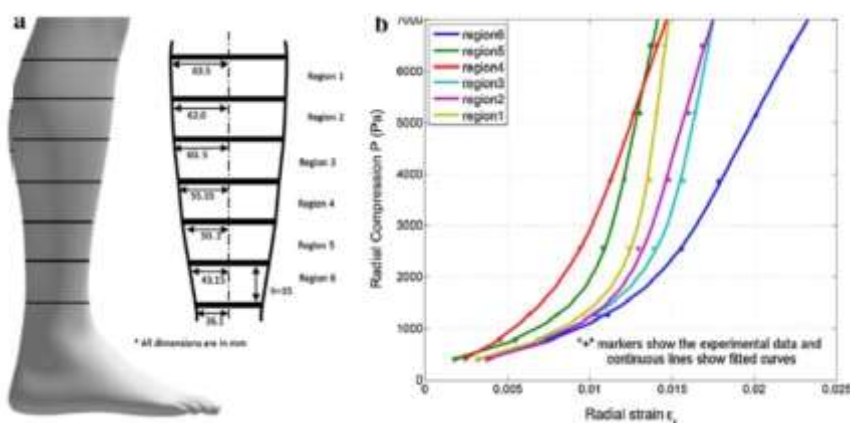


Рисунок 1.14 - Зависимость давления от относительного изменения радиуса для шести участков голени [96]

Кроме методов прямого измерения корректирующего действия компрессионной одежды используют методы компьютерного моделирования

деформаций тела и возникающего давления. Для воссоздания трехмерных объектов, имитирующих мягкие ткани тела необходимо знать упруго-эластичные свойства участков фигуры. Изменение формы мягких тканей рассчитывают методом конечных элементов как результат динамического взаимодействия одежды и фигуры (рис. 1.15). При другом подходе, сначала определяют компрессионное воздействие одежды, а затем изменяют форму тела в соответствии с рассчитанными значениями и ее упруго-эластичными свойствами [36].

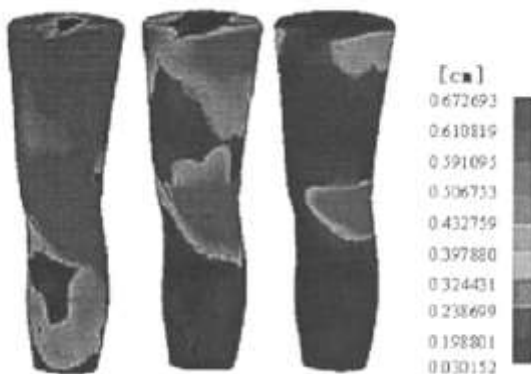
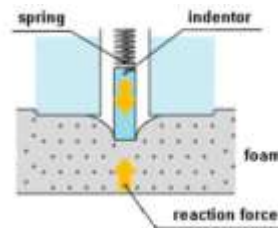


Рисунок 1.15 - Деформация участка ноги для материалов с различной растяжимостью [97]

Чтобы определить упруго-эластичные свойства при сжатии, измеряют образцы мягких тканей животного происхождения или исследуют поведение кожных покровов тела с помощью вдавливания [98] или вакуумного вытягивания [99]. При определении методом вдавливания измеряют величину деформации кожного покрова и возникающую при этом силу упругого сжатия с помощью дюрометра (рис 1.16).



a



б

Рисунок 1.16 - Внешний вид дюрометра (*a*) и схема измерения (*б*) деформации мягких тканей тела

Расчет модуля упругости мягких тканей выполняют по (1.8) [100]

$$E = \frac{1-\nu^2}{2ak(\nu, a/h)} \cdot \frac{F}{w} \quad (1.8)$$

где ν – коэффициент Пуассона, h – толщина мягкой ткани, a – радиус вдавливающего цилиндра, k – параметр, w – глубина вдавливания, F – приложенная сила.

В работе [98] с помощью дюрометра выполнено измерение тела в девяти точках и рассчитаны соответствующие коэффициенты упругости E . Усредненное значение модуля E по измерениям для 20 человек ($17,8 < BMI < 26,6$, возраст 20-35 лет) и точкам $B-I$ составило 9,3 кПа, в точке A – 31 кПа.

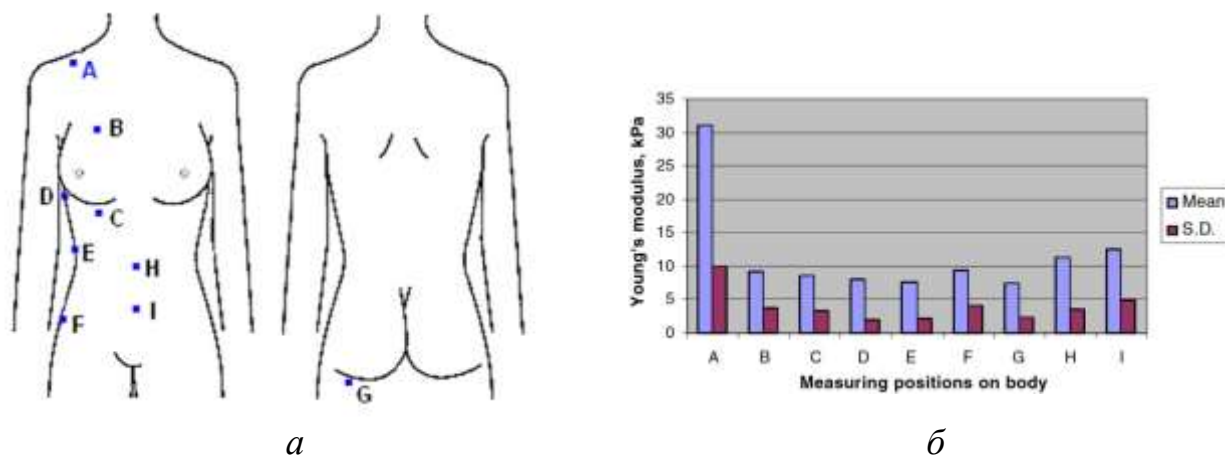


Рисунок 1.17 - Места измерения модуля упругости Юнга мягких тканей (а) и средние величины и стандартные отклонения измерений (б) [98]

С помощью оценки, аналогичной приведенной в [101], можно получить величину малого относительного изменения обхвата цилиндра L с площадью основания S , изготовленного из материала с модулем жесткости E под действием внешнего равномерного давления P , создаваемого одетой на него оболочкой из текстильного материала

$$2\Delta L/L = \Delta S/S = -2 \cdot P \cdot (1-\nu)/E. \quad (1.9)$$

Считая, что мягкие ткани тела при сжатии не изменяют объем, примем коэффициент Пуассона $\nu=0,5$; внешнее давление $P = 1\text{кПа}$; $E=10\text{ кПа}$ получим $\Delta L/L = 5\%$. Полученное значение согласуется с результатами [87].

Значения модуля Юнга, полученные в результате измерений различными методами, представлены в [102].

В работах [103, 104] выполнено моделирование участка женской груди на основе метода конечных элементов, учитывающих нелинейность сжатия мягких тканей и грудной клетки (рис.1.18, *a*) [103]. Вид элемента моделирующего мягкую ткань представлен на рис. 1.18, *б* [104].

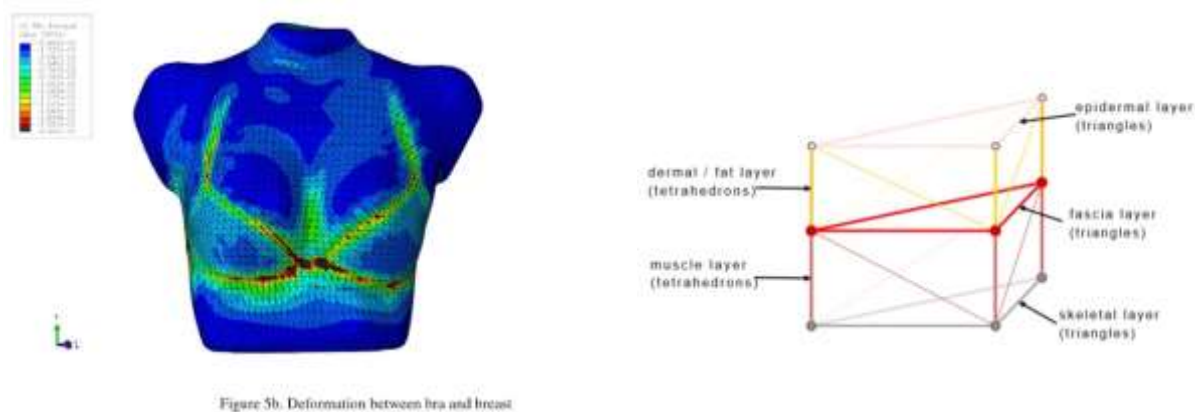
*a**б*

Рисунок 1.18 - Деформация мягких тканей тела под действием давления одежды (*a*) и вид конечного элемента, моделирующего поверхность тела (*б*)

Способы физического моделирования деформации фигуры, основанные на расчете конечных элементов, пока не получили применения в САПР одежды из-за сложного характера взаимодействия двух динамических деформируемых объектов из системы «фигура-одежда» и большого количества необходимых для расчета вычислений. В [36] создана деформируемая физическая модель мягкой ткани на основе взаимодействующих трехмерных примитивов. Несмотря на принятые упрощения, рациональное количество взаимодействующих элементов и точность физического описания модели дает ей преимущество и позволяют

использовать в программе САПР одежды для моделирования деформации тела.

1.3.2. Психологическое восприятие давления

Оценка внешнего воздействия на поверхность тела является жизненно важной информацией и фиксируется рецепторами нервной системы человека. ЦНС транслирует внешние воздействия в ощущения касания, давления, боли, а рефлекторные изменения запускают механизмы необходимых химических реакций в различных участках организма.

За восприятие механического воздействия, не превышающего болевой порог, отвечают механорецепторы кожи. Ощущения от сильного давления на кожу, механическое воздействие, превышающее болевой порог, удары, а также болевые ощущения, вызванные нарушением кожного покрова, регистрируются механическими ноцицепторами - разновидностью рецепторов, воспринимающих болевые ощущения.

Шесть типов механорецепторов различают по частотам воспринимаемых сигналов, пространственному разрешению, способности к временной адаптации (табл.1.6). Рецепторы Меркеля и корпускулы Мейснера, находящиеся ближе к поверхности, имеют наименьшую пространственную область чувствительности и лучшую способность к локализации механического воздействия.

Таблица 1.6 - Основные характеристики механорецепторов [84].

Частота раздражения, Hz	Тип механо рецепторов	Тип воздействия	Адаптация к воздействию	Область локализации
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
0.4 – 100	Merkel's cells	Давление	медленная	малая
10 – 200	Meissner's Corpuscles	Касание, вибрация	быстрая	малая
1—100	Hair follicle nerve	Касание, вибрация	быстрая	малая

Окончание табл.1.6				
1	2	3	4	5
7	Ruffini endings	Растяжение кожи, в т.ч., вызванное движением суставов	медленная	большая
40-800	Pacinian corpuscles	Вибрация	быстрая	большая
1-100	Tactile disks	Давление	медленная	малая

Механорецепторы кожи очень чувствительны и реагируют на смещение кожи менее 0,001мм. Их концентрация - величина непостоянная, зависит от индивидуальных особенностей, места на теле и определяет чувствительность кожного покрова.

Количественная характеристика психологического ощущения, вызванная давлением на кожу, трудно поддается измерению, поскольку является субъективной. Для определения ее величины используют психофизические шкалы семантических дифференциалов и шкалу Лайкерта. Для определения степени воздействия, имеющего отрицательную область значений, используют биполярную шкалу, например для определения свободы движений (рис.1.19, а). Определение показателя, имеющего только положительные значения, например ощущения давления, производят по униполярной шкале (рис 1.19, б). В отсутствии семантического представления степени психологического воздействия оценку производят только по цифровому значению (шкала Лайкерта).

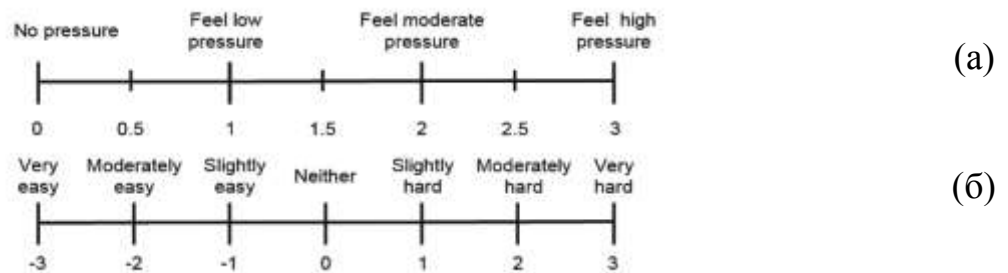


Рисунок 1.19 - Шкалы психологической оценки: униполярная шкала давления (а), биполярная шкала свободы движений (б) [3]

Основные законы, описывающие зависимость степени субъективного восприятия от физической величины воздействия – законы Вебера–Фехнера (1860) и Стивена (1953). Первый определяет зависимость ощущения от физической величины как логарифмическую, второй как степенную. Согласованность экспериментальных данных с законом Вебера–Фехнера и построение зависимости «ощущение давления одежды» от давления (Па) выполнено в работе [106].

Субъективное восприятие одного и того же давления корсетной одежды зависит от растяжимости материала - воздействие нерастяжимого материала первоначально воспринимается как более сильное. С другой стороны, принимая новую форму под действием продолжительного пассивного компрессионного давления, оказываемого нерастяжимым материалом, мягкие ткани тела адаптируются к нему в большей степени. Не вызывает резкого дискомфорта интенсивное, но непродолжительное воздействие - превышение границы дискомфортного давления при определенных движениях, глубоком дыхании, происходит, например, для корсетной одежды. Предельные значения давление в этом случае могут достигать значений 7кПа [32], что соответствует самому компрессионному 4 классу медицинской одежды. Верхняя граница допустимых, значений для случая локализованного воздействия, возникающего в динамике для мужской верхней одежды составляет 3,6 кПа [3].

1.3.3. Физиологическая реакция на компрессионное воздействие

Зависимость физиологических параметров человека, которые поддаются измерению и на которые влияет внешнее давление, может быть получена в результате экспериментального исследования. Реакцию организма на компрессионное сжатие мягких тканей в исследовательских работах измеряют следующими параметрами: работа сердца (частота

сердцебиения HR , объем сердечного выброса SV , суммарный поток ($Q=HR \cdot SV$) [25, 32, 110]; состав выдыхаемого воздуха и поглощение кислорода тканями тела (общее и местное количество потребляемого кислорода V_{O_2} , выделяемый углекислый газ V_{CO_2}) [111, 112]; объема, скорости и состава кровеносного потока (артериального, крупных вен, средних вен, капиллярного) [24, 32, 110, 112]; объема, состава тканевой жидкости в области воздействия [10]; температуры кожного покрова T [110]; скорости потоотделения SWR [32].

Свидетельством изменения физиологических параметров может служить динамика процессов жизнедеятельности организма. Например, использование компрессионного воздействия широко применяют для восстановления шрамов и хирургических швов. Исследованиями доказано, что под воздействием определенного давления концентрация коллагеновых волокон в тканевой жидкости уменьшается и они образуют более правильную структуру в поврежденной области, хотя природа происходящих процессов изучена не до конца.

Физиологические изменения под влиянием компрессионного воздействия на тело могут зависеть от находящихся вблизи органов, участков систем кровообращения, лимфотока, дыхания, пищеварения и т.д. В этом направлении изучены допустимые уровни давления по совокупности показателей субъективных ощущений и объективного изменения физиологических показателей для различных участков тела. Воздействие нижнего корректирующего белья на область паха изучено в работе [113]. Физиологические изменения, происходящие при сдавливании обхвата талии корректирующим нижним бельем и допустимая для повседневного использования величина комфортного давления, исследована в работе [110]. Физиологические изменения, происходящие в результате компрессионного воздействия на ноги, изучены в работе [24]. Определены значения давления оказывающие положительное влияние на кровеносную систему ног. Общие

вопросы физиологического воздействия одежды на кожный покров рассмотрены в [114].

Целью исследования физиологических показателей организма под действием немедицинской корректирующей одежды является определение предельно допустимой границы воздействия, не являющегося с одной стороны вредным для здоровья, и с другой, достаточным для выполнения функциональных требований. В работах посвященных спортивной тематике, как правило, используется обоснование, полученное в ходе медицинских исследований [27]. Также проводятся измерения физиологических показателей и их сопоставление со спортивными результатами [116], скоростью восстановления [112], болевыми ощущениями после спортивных нагрузок [117,118].

1.4. Методы расчета плотнооблегающих оболочек

1.4.1. Основные термины и понятия

Представление трехмерной поверхности в виде полигональной сетки широко применяется как результат автоматизированной обработки данных трехмерного сканирования, поскольку с его помощью можно воспроизвести сложную топографию поверхности и добиться высокой детализации формы. Поэтому такой вид представления поверхности был выбран нами в качестве исходных данных трехмерной виртуальной системы «фигура-одежда». Условием задания поверхности являлась её триангуляция. В отношении поверхностей представленных в виде полигональных сеток, триангуляция – процесс разбиения полигональной области со сложной конфигурацией на грани треугольной формы.

Для перевода трехмерного участка полигональной поверхности в плоское состояние необходимо рассчитать и построить его развертку. Развертывание поверхности означает изометричное преобразование

поверхности в плоскую фигуру, при котором устанавливается их взаимно однозначное соответствие. Свойство изометричности преобразования означает равенство длины любой линии на поверхности длине соответствующей линии на развертке. Дифференциальное определение этого свойства требует, чтобы метрические свойства поверхности и ее развертки, выражаемые коэффициентами первой квадратичной формы совпадали во всех точках. Поверхность для которой может быть построена развертка в виде плоского изометричного отображения называется разворачиваемой.

Для неразворачиваемой поверхности ее плоское отображение не может быть изометричным во всех точках, и поэтому любой плоский вид такой поверхности будет обязательно искажать ее геометрические свойства. Применение термина развертка к такой поверхности хотя и обозначает буквально «развертка неразвертываемого», но, как правило, используется и подразумевает, что при построении плоского отображения применялся тот или иной метод оптимизации геометрических искажений.

Разнообразие методов построения плоских отображений можно увидеть на примере различных карт поверхности Земли. Геометрические искажения оптимизируются в них с учетом удобства использования для определенных целей: конформная карта Меркатора, сохраняющая углы между направлениями, оказалась особенно удобна для определения курсов морских судов, на карте Ламберта сохранены площади объектов, на равнопромежуточной проекции сохраняется масштаб вдоль каждой параллели.

При проектировании объемных изделий из листового материала построение разверток участков поверхности выполняют с учетом желаемого распределения возникающих напряжений и деформаций. Научная проблема построения разверток заключается в анализе предъявляемых к ним требований, создании и проверке алгоритмов их построения с учетом заданных условий и критериев.

В швейной промышленности для раскроя одежды из текстильного листового материала должны быть разработаны плоские отображения изделия – лекала, а также технические условия и требования, позволяющие получить готовое изделие. Несоразмерность (неизометричность) между развертками деталей и проектируемой формы одежды может приводить к дефектам одежды: 1) в виде свободных ненапряженных складок, 2) в виде напряженных складок, 3) напряжениям материала в готовом изделии.

Изделия из текстильных материалов, не обладающих достаточной жесткостью для поддержания заданной формы, либо проектируются с дополнительными каркасными элементами, либо формирование их поверхности рассматривается как результат взаимодействия с жесткими и полужесткими элементами системы «фигура-одежда». Поэтому плоские отображения деталей одежды могут быть в двух вариантах – когда они точно повторяют фрагменты проектируемой объемной поверхности, а жесткость материала и каркасных элементов частично или полностью компенсирует напряжения, возникающие в материале, или когда они приобретают такие размеры под действием внешних сил, возникающих в системе «фигура-одежда», и не имеют в свободном состоянии фиксированной формы. Соответственно этому могут быть определены различные подходы как к проектированию объемной формы так и к способам построения лекал для этих видов изделий.

В первом случае формообразование происходит преимущественно за счет конструктивных элементов – линий членения, выточек. Напряжения материала, необходимые для создания формы, также закрепляются конструктивно - посадка, оттягивание материала закрепляются с помощью ниточных соединений, нерастяжимых кромок, в процессе ВТО, при формовании и т. д.

Во втором случае, в облегающих изделиях из растяжимых материалов, кроме перечисленных приемов, формообразование происходит за счет

деформации растяжения и плотного облегания фигуры. Поэтому при их проектировании необходимо принимать во внимание не только форму готового изделия, но и давление, которое оно оказывает на нижележащие слои одежды и на тело человека. Давление одежды на тело задают значениями P_i в проверочных точках $i=1, \dots, n$. Поэтому для проектирования разверток компрессионной одежды кроме внешнего вида системы «фигура-одежда» должны быть заданы значения и места измерения P_i . Для проектирования плотного прилегания материала ко всем участкам объемной формы необходимо, чтобы расчетные значения давления во всех точках поверхности были не меньше нулевого значения: $P \geq 0$.

Среди методов построения разверток полигональной поверхности, моделирующей трехмерную форму одежды, выделяют два основных подхода:

1. Подход физической интерпретации исходных данных и расчет положения вершин развертки, соответствующего минимальной энергии упругой деформации элементов полигональной структуры. Решение задачи развертывания производят методом конечных элементов или с помощью масс-пружинной модели. В том и другом случаях необходимо найти положение равновесия заданной модели с учетом возможных дополнительных ограничений.

2. Минимизации геометрических искажений развертки – длин ребер, углов, площадей граней и др.

При постановке задачи минимизации геометрических искажений, возникающих в развертке, сначала определяются оптимальные значения геометрических величин. Затем, для построения формы и нахождения координат точек, ставится задача о нахождении минимума суммы квадратичных отклонений этих величин от их оптимальных значений.

Для учета особенностей проектируемого изделия могут понадобиться конструктивные ограничения, которые могут быть записаны в виде условий сохранения на развертке длины и/или кривизны выделенных линий

Условия развертывания могут быть в виде равенств или неравенств, а также могут быть линейными или нет относительно переменных. Поэтому в общем случае геометрический метод развертывания формулируется как задача условной оптимизации, которая решается методами нелинейного программирования.

1.4.2. Физические методы

Физический подход использует понятие упругой деформации элементов полигональной сети. Для задания начального состояния развертки строят плоское отображение поверхности, сохраняющее порядок соединения ее вершин с учетом расположения выточек и линий членения формы. Рассчитывая упругие силы, действующие на вершины полигональной развертки, находят их новое расположение. Разверткой считают равновесное состояние вершин на плоскости, соответствующее минимальной энергии деформации с учетом исходных данных.

Основные способы реализации физического подхода:

1. Расчет масс-пружинной модели.
2. Метод конечных элементов.

Для расчета масспружинной модели проводятся итерации, в каждой из которых вершины развертки последовательно сдвигаются под действием приложенных к ним сил [121-124]. Возможными недостатками масспружинной модели могут быть неустойчивость в виде инверсии треугольных граней развертки и зависимость сходимости решения от начального положения вершин на плоскости. Для предотвращения неустойчивости используют компенсирующую силу, препятствующую выходу вершины за грани смежных с ней треугольников [124].

Для расчета методом конечных элементов составляют систему линейных уравнений, связывающую координаты вершин развертки с напряжениями, возникающими в конечных элементах материала. Применение метода требует решения системы уравнений, порядок которой сопоставим с количеством точек полигона и будет значительно возрастать при расчете деталей одежды.

Построение развертки на основе расчета напряжений упругой деформации ребер полигональной сети выполнено в работе [125].

Для учета анизотропности материала в методе расчета [95] используются плоские треугольные конечные элементы. В работе рассчитана развертка верха обуви. В использованном методе расчета приращения координат вершин развертки от исходного положения рассчитываются на основе матрицы жесткости. Для линейного преобразования треугольника на плоскости, его относительную деформацию

$$\varepsilon = (\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy})^T \quad (1.10)$$

можно найти, используя матричную форму записи:

$$\varepsilon = \mathbf{B} \cdot \mathbf{q} \quad (1.11)$$

где $\mathbf{q} = (q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6)^T$ – вектор смещения с компонентами: $q_1 = x'_1 - x_1$, $q_2 = y'_1 - y_1$, $q_3 = x'_2 - x_2$, $q_4 = y'_2 - y_2$, $q_5 = x'_3 - x_3$, $q_6 = y'_3 - y_3$, (x'_i, y'_i) и (x_i, y_i) – начальное и конечное положение i вершины, матрица \mathbf{B} связывает между собой перемещения вершин треугольника с его деформацией:

$$\mathbf{B} = \frac{1}{x_{13}y_{23} - x_{23}y_{13}} \begin{pmatrix} y_{23} & 0 & y_{31} & 0 & y_{12} & 0 \\ 0 & x_{32} & 0 & x_{13} & 0 & x_{21} \\ x_{32} & y_{23} & x_{13} & y_{31} & x_{21} & y_{12} \end{pmatrix} \quad (1.12)$$

где $x_{ij} = x_i - x_j$, $y_{ij} = y_i - y_j$.

При выборе осей x , y по главным направлениям материала (вдоль и поперек петельных столбиков), возникающие напряжения

$$\sigma = (\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})^T \quad (1.13)$$

записываются в виде

$$\sigma = \mathbf{D}_0 \cdot \varepsilon \quad (1.14)$$

где \mathbf{D}_0 – матрица свойств материала. При несовпадении координатных осей с главными направлениями деформаций:

$$\sigma = \mathbf{D} \cdot \varepsilon \quad (1.15)$$

где матрица \mathbf{D} получена из \mathbf{D}_0 линейным преобразованием. Энергия упругой деформации треугольного элемента в этом случае запишется в виде:

$$E_i = 1/2 \cdot \varepsilon^T \cdot \mathbf{D} \cdot \varepsilon \cdot A = 1/2 \cdot q^T \cdot \mathbf{B}^T \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{B} \cdot q \cdot A_i = 1/2 \cdot q^T \cdot \mathbf{k}_i \cdot q \quad (1.16)$$

где A_i – площадь, \mathbf{k}_i – матрица жесткости i треугольного элемента. Суммируя по всем элементам, получим:

$$E_{\text{сум}} = \sum E_i = 1/2 \cdot Q^T \cdot \mathbf{K} \cdot Q \quad (1.17)$$

где Q – объединенный вектор смещений координат полигона, \mathbf{K} – общая матрица жесткости. Минимум $E_{\text{сум}}$ будет соответствовать положению вершин с наименьшей общей энергией деформации.

При разворачивании поверхности начальные положения вершин лежат в трехмерном пространстве, поэтому для каждой грани необходимо делать преобразование, переходя из локальной системы грани на развертке к локальной системе грани на трехмерной форме.

Применяемый в таком виде метод нахождения узловых точек развертки называется инверсным (обратным) методом конечных элементов, поскольку нулю приравняются производные $dE_{\text{сум}}/dx_i$ и $dE_{\text{сум}}/dy_i$ по начальным положениям точек на развертке, а известными считаются их положения на 3х мерной поверхности.

Алгоритмы разворачивания, учитывающие давление материала одежды на поверхность тела использованы в работах [126, 127]. В [126] для

нахождения развертки на объемной поверхности сначала размещаются вершины полигональной сетки. Можно сказать, поверхность «оборачивается» сеткой, имитирующей листовую материал. Уточнение положений вершин сетки на поверхности происходит под действием сил упругости деформированных ребер сетки. Поскольку ее вершины должны всегда находиться на поверхности, они сдвигаются по геодезическим линиям в направлениях, касательных к действующим силам.

Выходящие при сдвигании за пределы границ 3D-поверхности точки сетки аннулируются. После приведения системы в равновесие, граница поверхности развертки рассчитывается в декартовых координатах плоской сетки, исходя из пространственных координат ее точек, близлежащих с границей трехмерной поверхности.

Используемая в работе триангуляция сетки-ткани (woven mesh) на основе квадратной формы ячейки с диагональными ребрами хорошо соответствует структуре материалов одежды.

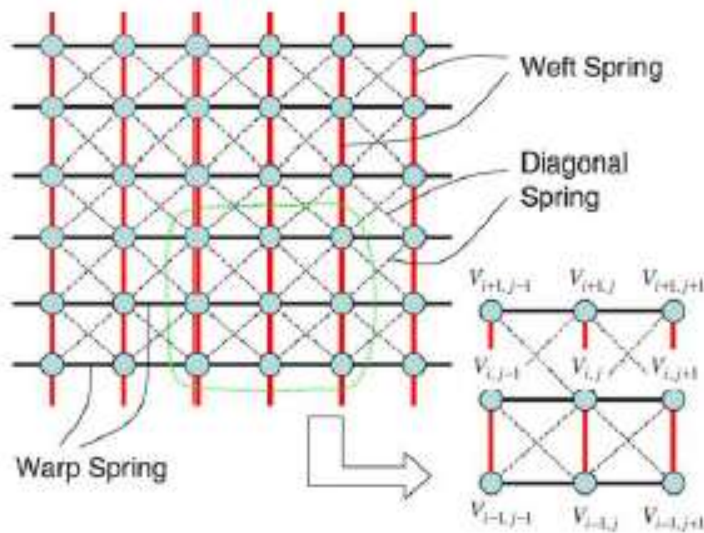


Рисунок 1.20 - Моделирование текстильного материала триангулированной полигональной сеткой [126]

Давление которое оказывает материал на поверхность в точке i выражается через относительные удлинения ε длин примыкающих ребер и среднюю кривизну поверхности $\kappa_H = (\kappa_1 + \kappa_2)/2$

$$P_i \approx s\pi\kappa_H (k_{\text{warp}}\varepsilon_{\text{warp}} + k_{\text{weft}}\varepsilon_{\text{weft}}) \quad (1.18)$$

где s - коэффициент, отражающий физические свойства реального материала (толщину, растяжимость), k_{warp} , k_{weft} и $\varepsilon_{\text{warp}}$, $\varepsilon_{\text{weft}}$ – коэффициенты жесткости и относительные удлинения ребер полигональной сети.

Чтобы удлинение нитей $\varepsilon_{\text{warp}}$ удовлетворяло исходным значениям давления P_i^0 ($i=1,2\dots n$) находят минимуму функции (1.19), Метод предназначен для расчета элементов компрессионной одежды, с одноосным растяжением, поэтому делается допущение $\varepsilon_{\text{weft}} \approx 0$.

$$J_{\varepsilon_{\text{warp}}} = \sum_{i=1}^m (s\pi\kappa_{Hi} (k_{\text{warp}}\varepsilon_{\text{warp}} + k_{\text{weft}}\varepsilon_{\text{weft}}) - P_i^0)^2 \quad (1.19)$$

С учетом полученных значений $\varepsilon_{\text{warp}}$ находят положения вершин полигональной сетки на трехмерной поверхности. Способ позволяет задать давления и рассчитать развертку материала, но является более сложным по сравнению с расчетом положения вершин на плоскости, так как на каждом шаге итераций необходимо учитывать множество дополнительных факторов: кривизну поверхности, геодезические направления, вышедшие за границы объемной формы.

В работе [127] решена задача построения развертки с учетом давлений в заданных точках. Для этого сначала рассчитывают необходимые напряжения ребер объемной триангулированной полигональной сети и их удлинения, определяя таким образом оптимальные значения углов каждой из треугольных граней. Развертка на плоскости затем рассчитывается на основе полученных значений углов с помощью геометрических метода ABF+ [128]. Алгоритм назван авторами комбинированным, так как в нем использованы физический и геометрический методы расчета.

1.4.3. Геометрические методы

Для изометричного отображения полигональной поверхности достаточно сохранения длин всех ребер сетки. Равнозначное этому условие изометричности требует сохранения всех углов с одновременным сохранением площадей граней полигона, поскольку одни только углы определяют форму полигональной поверхности с точностью до масштабирования. В работе [128] разработан алгоритм ABF+ (Angle Based Flattening) для расчета оптимальных углов между ребрами плоской развертки на основе данных об углах между ребрами 3-х мерной полигональной формы. В работе используется функция, связывающая углы объемной полигональной формы и её развертки:

$$E(\alpha) = \sum_{t \in T} \sum_{k=1}^3 \frac{1}{\beta_k^{t2}} (\alpha_k^t - \beta_k^t)^2 \quad (1.20)$$

где по t – обозначено суммирование по всем треугольным граням полигонального участка T , по k – суммирование по вершинам каждой треугольной грани ($k=1,2,3$), α_k^t – искомое значение k угла, принадлежащего t грани на плоской развертке, β_k^t – оптимальное значение угла на плоской развертке, рассчитывают по формуле (1.21):

$$\beta_k^t = \frac{\varphi_k^t \cdot 2\pi}{\sum \varphi_i} \quad (1.21)$$

где φ_k^t – значение угла на полигональной трехмерной поверхности, $\sum \varphi_i$ – сумма углов примыкающих к вершине заданного угла ($\beta_k^t = \varphi_k^t$ для точек на границе). Минимум функции (1.20) должен быть найден при условии следующих ограничений в виде равенств, необходимых для существования плоской полигональной формы:

$$\forall t \in T, \quad C_{Tri}(t) = \alpha_1^t + \alpha_2^t + \alpha_3^t - \pi = 0 \quad (1.22)$$

(1.22) ограничивает сумму углов 180 градусами для множества T всех треугольных граней на плоскости,

$$\forall v \in V_{\text{int}}, \quad C_{\text{Plan}}(v) = \sum_{(t,k) \in v} \alpha_k^t - 2\pi = 0 \quad (1.23)$$

(1.23) - для задания суммы углов в 360° при одной вершине (для множества всех внутренних вершин V_{int}),

$$\forall v \in V_{\text{int}}, \quad C_{\text{Len}}(v) = \prod_{(t,k) \in v} \sin \alpha_{k \oplus 1}^t - \prod_{(t,k) \in v} \sin \alpha_{k \ominus 1}^t = 0 \quad (1.24)$$

Выполнение условия (1.24) необходимо для замыкания ребер, окружающих каждую из вершин, рис 1.21. По теореме синусов отношение сторон треугольника равно отношению синусов противолежащих углов, приравнявая длины l_1 и l_7 получим (1.25), что равносильно (1.24).

$$\frac{l_1}{l_7} = \frac{l_1}{l_2} \cdot \frac{l_2}{l_3} \cdot \dots \cdot \frac{l_6}{l_7} = \frac{\sin \alpha_1^2}{\sin \alpha_1^1} \cdot \frac{\sin \alpha_2^2}{\sin \alpha_2^1} \cdot \dots \cdot \frac{\sin \alpha_6^2}{\sin \alpha_6^1} = 1 \quad (1.25)$$

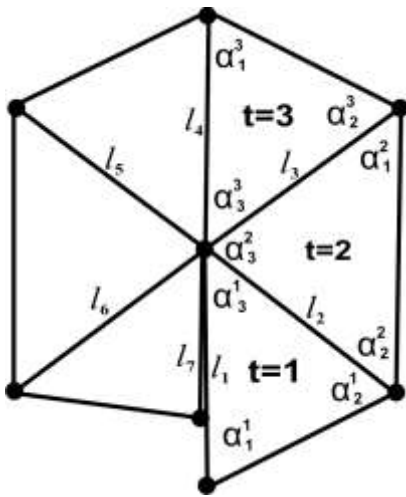


Рисунок 1.21 - Положение вершин развертки шестигранной пирамиды на плоскости. Для построения развертки необходимо совпадение длин ребер всех смежных треугольников, выраженное условием (1.25) и преобразованное к виду (1.24).

С учетом ограничений (1.22), (1.23), (1.24), используя метод множителей Лагранжа, целевая функция запишется в виде:

$$F(x) = F(\alpha, \lambda_{\text{Tri}}, \lambda_{\text{Plan}}, \lambda_{\text{Len}}) = E + \sum_t \lambda_{\text{Tri}}^t C_{\text{Tri}}(t) + \sum_v \lambda_{\text{Plan}}^v C_{\text{Plan}}(v) + \sum_v \lambda_{\text{Len}}^v C_{\text{Len}}(v) \quad (1.26)$$

Задача определения всех значений углов α_t^k полигональной развертки на плоскости является задачей нелинейного программирования с

нелинейным ограничением. В рассмотренном методе не может быть учтена анизотропность свойств материала, поскольку не задана ориентация треугольных граней на плоскости.

В работе [129] функция для поиска оптимального положения вершин состоит из двух частей (1.27) и (1.28), объединяющих деформацию ребер и изменение углов между ними:

$$E_l = 2 \sum_{M_i \in S} \sum_{M_j \in \Omega_i} \frac{(\|m_i - m_j\|^2 - \|M_i - M_j\|^2)^2}{\|M_i - M_j\|^2} \quad (1.27)$$

где m_i – радиус-вектор i точки развертки, M_i – i точки трехмерной поверхности, Ω_i – множество всех точек присоединенных к i точке, S – множество всех точек полигональной сети.

$$E_{ij}^g = (\varphi_{ij} - \varphi_{ij}^*)^2 + (\theta_{ij} - \theta_{ij}^*)^2 + (\omega_{ij} - \omega_{ij}^*)^2 \quad (1.28)$$

где каждое из трех слагаемых – разница между геодезической кривизной на поверхности и кривизной на плоскости между присоединенными к вершине ребрами (рис. 1.22).

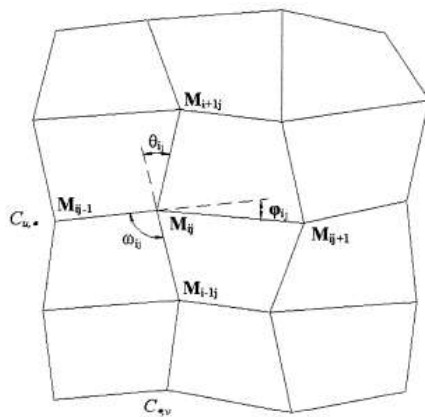


Рисунок 1.22 - Углы между соседними ребрами, используемые для расчета развертки

Для практического применения часто возникает необходимость задания линий развертывания для сохранения их длины и/или геодезической кривизны. На основе разработанного метода решена задача развертки поверхности с сохранением длины и геодезической кривизны интерактивно заданных на поверхности линий. В [129] это были две пересекающиеся

геодезические линии, длина которых на модели и на развертке должны были совпадать (показаны черным на рис. 1.23) для точного соответствия верха обуви размеру и форме ступни. Из рис. 1.24 видно, что такой вид ограничения привел к значительному изменению развертки, которая почти совпала с изготовленной для промышленного применения.

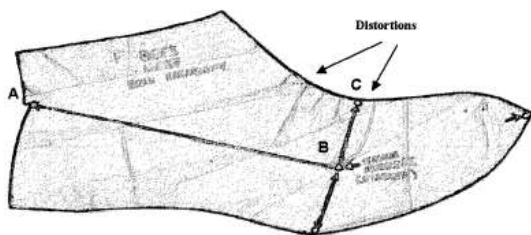


Рисунок 1.23 - Развертка верха обуви. Интерактивно заданные геодезические линии сохраняют длину и взаимное расположение при развертывании. Места наибольших искажений показаны стрелками

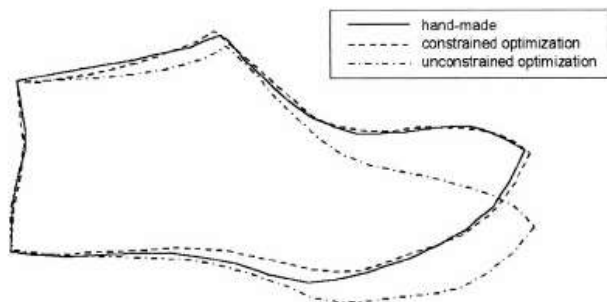


Рисунок 1.24 - Развертка верха обуви. «Hand-made» - полученная ручным способом в реальных условиях изготовления, «constrained optimization» – с учетом сохранения длины и угла между заданными геодезическими линиями, «unconstrained optimization» – без учета сохранения длин линий и углов между ними

На основе анализа существующих методов развертывания была разработана их классификация (рис.1.25) и предложен метод получения плоских разверток деталей, использующий конечные двумерные (треугольные) элементы. После расчета сил, действующих на вершины развертки, выполняется их смещение под действием возникающих сил упругой деформации.



Рисунок 1.25 - Классификация способов разворачивания поверхности.
Предложенный способ обозначен серым фоном.

Таким образом, предложенный способ позволяет учесть анизотропность свойств материала и одновременно не использовать громоздкие алгоритмы решения больших систем уравнений.

1.5. Существующие методы проектирования и расчета конструкций компрессионной одежды

При конструировании по существующим методикам чертежей одежды с отрицательными прибавками их задание выполняется на стадии преобразования базовой конструкции. Современный подход к проектированию систем «фигура - компрессионная одежда» с использованием трехмерных технологий включает моделирование обоих элементов и расчет разверток одежды. Алгоритм существующего подхода к

виртуальному проектированию одежды может включать в качестве исходных данных скан фигуры человека. Для обработки данных сканирования применяется автоматизированное определение размерных признаков [12,42] и создание «аватара» фигуры, адаптированного к виртуальной примерке, анимации и другим этапам трехмерного проектирования одежды. Использование процедур 3D дизайна позволяет создавать поверхность виртуальной одежды с учетом визуализации пространственных прибавок, которые могут принимать отрицательные значения для случая плотнооблегающей [119]. В существующих САПР их рассчитывают также как и для плоского случая – руководствуясь имеющимся опытом и группой растяжимости, а возникающее давление одежды визуализируют на стадии виртуальной примерки [120]. Недостатками такого расчета прибавок может являться несоответствие возникающего давления одежды требуемому уровню комфорта. С другой стороны, методы построения разверток с учетом исходных данных растяжимости материала, давления и трехмерной формы поверхности одежды [107] исследуются пока только в научных работах и имеют ограниченное применение из-за сложности представления исходных данных и применяемых алгоритмов расчета.

Схема существующего процесса создания шаблонов деталей одежды с использованием трехмерного сканирования в «развертывающих» САПР, позволяющих проектировать одежду в виде трехмерной оболочки с отрицательными прибавками, показан на рис. 1.26.

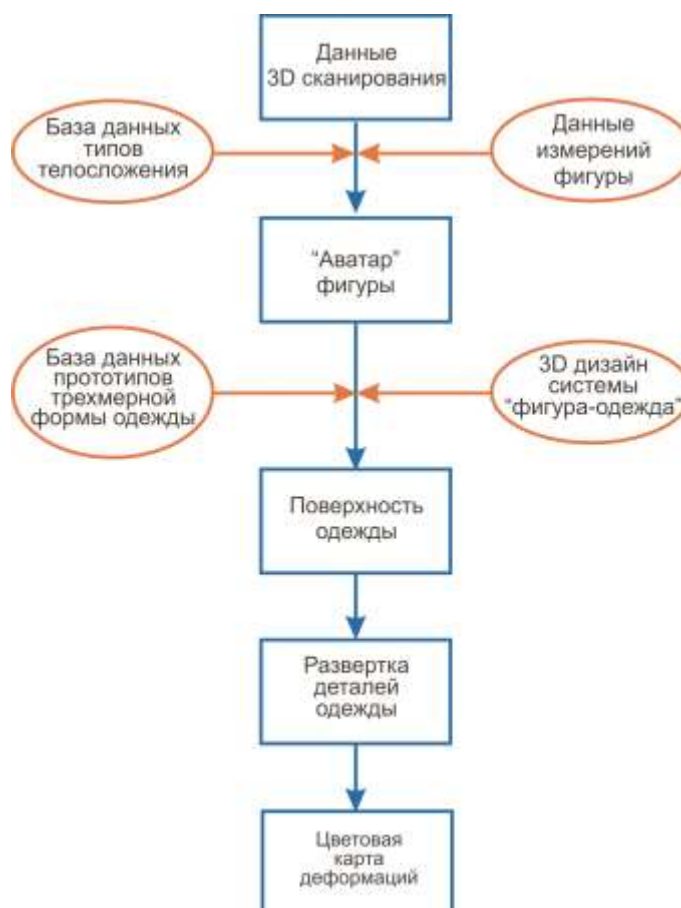


Рисунок 1.26 – Схема существующего процесса создания шаблонов деталей в «развертывающих» САПР на основе данных трехмерного сканирования фигуры

На основе рассмотренных способов задания отрицательных прибавок методы конструирования можно классифицировать по участку технологической цепочки, на котором вносятся изменения в конструкцию. Для традиционных методов конструирования - это чертеж базовой конструкции. Для трехмерных методов возможен способ задания прибавок на плоскости, на этапе создания трехмерной формы одежды и в процессе развертывания пространственной формы деталей на плоскость (табл. 1.7).

Для точного теоретического расчета деталей медицинской одежды в [53] используют программу на основе закона Лапласа. Программа рассчитывает длину конструктивных участков с учетом растяжимости, длины окружности замкнутого участка конической или цилиндрической

поверхности и предназначена для создания компрессионной одежды для области конечностей – рук и ног.

Таблица 1.7 Классификация существующих методов проектирования компрессионной одежды по порядку построения разверток.

№	Содержание метода	Авторы	Вид реализации
1	2D преобразование размеров основы базовой конструкции, полученной расчетно-графическим методом	ЦНИИШП [108], РосЗИТЛП [109], Zeigert [56] Коваленко Е.В[78].	Алгоритм Алгоритм Алгоритм Алгоритм
2	2D преобразование размеров развертки поверхности, полученной инженерным методом	Иванова З.Р.[8] Сурикова Г.И.[80] Болдовкина О.С.[62]	Алгоритм Алгоритм Алгоритм
3	3D преобразование размеров поверхности, предшествующее построению разверток деталей	Корнилова Н.Л.[81] Баландина Г.В.[36]	Алгоритм/ Программа Алгоритм/ Программа
4	Преобразование в алгоритме развертывания 3D → 2D	С.Сl. Wang [107] Yeonhee Jeong [17]	Программа Программа

На основе анализа методов построения шаблонов деталей компрессионной одежды, можно увидеть, что процесс их построения до конца не формализован и может вызывать затруднения, например, при расчете сложных линий срезов шаблонов для спортивной одежды, точного учета растяжимости при создании одежды из материалов с разной растяжимостью и учета индивидуальных особенностей морфологии фигуры.

ВЫВОДЫ (обоснование цели и направлений исследования)

В результате анализа существующих баз данных и технологий проектирования компрессионной одежды установлено, что разработка новых методов проектирования, обеспечивающих получение требуемого давления и выполнения одеждой своих компрессионных функций, является актуальной научной и технологической проблемой, поскольку отсутствие новых знаний снижает комфортность выпускаемой одежды и сдерживает развитие САПР.

Целью работы является разработка метода проектирования трикотажной одежды с прогнозируемым уровнем давления и целенаправленного изменения пластики кожных покровов и мышечных тканей фигуры.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить процессы деформирования трикотажных материалов при растяжении и сдвиге в условиях, максимально приближенных к процессам их деформирования при эксплуатации готовой компрессионной одежды, с использованием современного оборудования, допускающего обмен информации с ранее созданными аналогичными базами данных. В качестве такого измерительного оборудования будет задействован автоматический измерительный комплекс Kawabata, широко используемый в мире;

- исследовать влияние напряжений в деформированных замкнутых и условно-замкнутых трикотажных оболочках на возникновение компрессионного давления на кожные покровы фигур и их модель на основе косметологического силикона;

- создать экспериментальный стенд для моделирования и изучения взаимодействия деформированных текстильных материалов с мягкими тканями фигуры;

- разработать способ определения компрессионной способности текстильных материалов и сгруппировать их для использования в компрессионной одежде;

- теоретически описать процессы, протекающие в системе " замкнутая текстильная оболочка - фигура" под влиянием деформирования мягких тканей фигур, напряжений внутри оболочки, и спрогнозировать результаты параллельно протекающих процессов;

- создать виртуальную модель возникновения и отображения напряжений растяжения и сдвига, возникающих в текстильном материале, находящемся в трехмерном состоянии, и их преобразования в плоские развертки;

- разработать методику выбора конструктивных прибавок (величин заужения) для проектирования компрессионных изделий в зависимости от желаемых значений давления одежды, участка фигуры и используемого трикотажного материала;

- провести экспериментальную проверку разработанной методики и сравнить ее с известным аналогом.

Глава 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТРИКОТАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПЛОСКОМ СОСТОЯНИИ

Для проектирования деталей компрессионной одежды с заданным уровнем давления необходимо задавать уменьшение размерных признаков для каждого участка фигуры согласно компрессионной способности материала $P(\varepsilon)$. В этом случае текстильный материал, испытывающий действие растягивающего усилия σ и облегающий объемную трехмерную форму, будет оказывать на нее компрессионное давление P .

Существенными для этого процесса являются одновременное выполнение следующих условий: облегание участка фигуры материалом, изгибание материала и возникновение силы реакции мягких тканей фигуры, направленной по нормали. В отличие от объемной, на плоскую поверхность материал компрессионного давления оказывать не будет, поскольку проекция силы упругого растяжения на нормаль поверхности во всех точках равна нулю. С другой стороны, упруго-эластичные свойства растяжения измеряют именно в плоском состоянии и определяются зависимостью $\sigma(\varepsilon)$.

Таким образом, для определения нужной нам зависимости $P(\varepsilon)$ необходимо установить зависимость $\sigma(\varepsilon)$ для плоского состояния материала, зависимость $P(\sigma)$ для трехмерного состояния материала, а затем рассчитать сложную функцию $P(\varepsilon) = P(\sigma(\varepsilon))$.

Удобными для практического использования являются методы расчета конструкции, использующие в качестве исходных данных или растяжимость или группу растяжимости материала. Однако, учитывая что, ширина интервалов групп может превышать необходимую точность, а также, что одноцикловые показатели упруго-эластичных свойств трикотажных материалов являются нелинейными и зависят от направления растягивающего усилия, более точным будет расчет и задание параметров конструкции на основе следующих зависимостей:

- напряжения от относительной деформации $\sigma_{вс}(\varepsilon_{вс})$ и $\sigma_{пс}(\varepsilon_{пс})$ для главных направлений материала (вдоль и поперек петельных столбиков);
- напряжения сдвига $\tau(\theta)$, возникающего при изменении сетевого угла θ между нитями материала.

Другой проблемой, возникающей при проектировании компрессионной одежды, является достижение соответствия между растяжимостью материала и уровнем создаваемого им давления. Очевидно, что взаимосвязь между этими величинами существует и для создания большего давления необходимо выбирать более упругий и менее растяжимый материал. Использовать в качестве критерия выбора материала известный показатель - группу растяжимости - нельзя, так как на ее основе можно определить только количественное значение конструктивной прибавки, но нельзя прогнозировать давление, поскольку группа растяжимости связывает два показателя - удлинение материала и появление на его поверхности складок.

В качестве аргумента для группировки материалов соответствующей уровням давления одежды, изготовленной из них, удобно использовать растяжимость, измеренную в плоском состоянии, но при деформациях возникающих при эксплуатации в системе «фигура-одежда».

Определение деформационных свойств материала при его растяжении и сдвиге в плоском состоянии необходимо для создания его виртуальной модели в программах трехмерной графики, с возможностью визуализации рельефа возникающих напряжений и давления одежды на тело человека [130]. Наиболее точный расчет необходимо выполнять с учетом нелинейности упруго-эластичных свойств материалов, заданных в аналитическом виде.

Для решения рассмотренных задач в этой главе выполнено экспериментальное определение деформационных свойств трикотажных полотен в плоском состоянии для формирования первого блока исходных

данных, необходимых для теоретического моделирования и виртуального проектирования систем "фигура - компрессионная одежда".

Результаты этой главы опубликованы в трех работах [131 - 133], изложены в двух тезисах докладов [90,93].

2.1. Объекты исследования

В качестве объектов исследования были выбраны трикотажные материалы, обозначенные далее как $T1-T19$, используемые для производства белья и верхней одежды. Внешний вид и показатели свойств материалов – группа растяжимости, состав, тип переплетения, поверхностная плотность – приведены в табл. П1.1 Приложения 1. Все выбранные материалы удовлетворяют требованиям ГОСТ 28554-90 [134]. В соответствии с волокнистым составом и базовыми характеристиками основными областями использования материалов являются:

- нижнее белье $T5, T6, T10, T11, T13$,
- спортивная одежда $T3, T4, T8, T9, T12 - T15, T17, T18$,
- одежда костюмной группы с возможным применением для изготовления компрессионных элементов $T1, T2, T7, T12, T16, T19$.

Таким образом, выбранные для исследования материалы по составу, структуре и группам растяжимости представляют репрезентативную выборку среди трикотажных полотен, используемых для создания компрессионной одежды.

2.2. Методы измерения показателей растяжения и сдвига

Для инструментального определения показателей растяжения $\sigma_{ec}(\varepsilon_{ec})$ и $\sigma_{nc}(\varepsilon_{nc})$ и сдвига $\tau(\theta)$ трикотажных материалов был выбран автоматизированный измерительный прибор KES-FB1, который является

модулем комплекса KES-F. Комплекс был разработан в 1972 г. японскими учеными университета Киото под руководством С. Кавабата для компьютерной обработки результатов измерений, полученных в автоматизированном режиме, и расчета комплексных показателей, используемых для оценки потребительских свойств материала. Исследования проведены в лаборатории физики и механики текстиля Университета Верхнего Эльзаса, Мюлуз, Франция.

Получение зависимостей «усилие растяжения - относительная деформация» и «усилие сдвига – угловая деформация» материала на приборе KES-FB1 выполняют при постоянной скорости деформации по схеме, показанной на рис.2.1.



Рисунок 2.1 - Схема деформирования проб материалов на KES-FB1 [135]

Для проведения измерений пробу материала размером 200x200 мм фиксировали в зажимах таким образом, чтобы размер рабочей области составлял 50x200 мм. Точность при измерении показателей свойств материалов составляет 0,5 % от полной используемой шкалы измерений. Скорость растяжения составляла 0,2 мм/с. Используются шкалы 500 сН/см для усилия и 50 мм для деформации, таким образом, точность определения этих значений составляла $\pm 2,5$ сН/см и $\pm 0,25$ мм соответственно.

Результаты измерений на KES-FB1 документированы в виде графических одноцикловых зависимостей растяжимости и сдвига, примеры

которых показаны на рис. 2.2 и 2.3. Зависимости получены в условиях растяжения и релаксации проб.

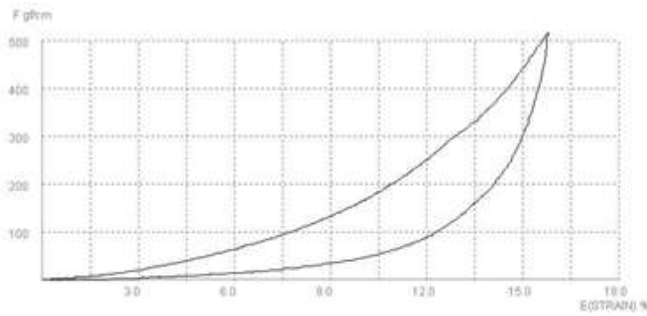


Рисунок 2.2 - Типичная кривая растяжения текстильного материала, полученная на приборе KES-FB-1

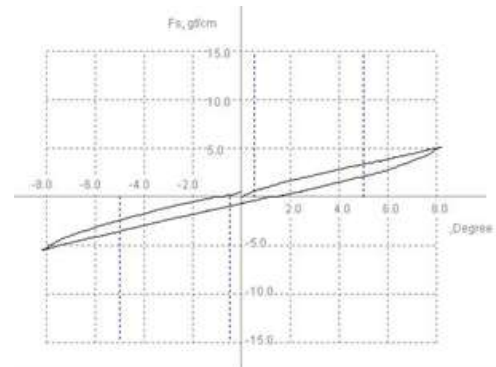


Рисунок 2.3 - Типичная кривая сдвига текстильного материала, полученная на приборе KES-FB-1

Деформация материала в обоих случаях имеет циклический характер, поэтому графики состоят из двух ветвей. Нижней и верхней ветвям на рис. 2.2 соответствуют приложение и снятие нагрузки при растяжении, на рис. 2.3 – прямому и обратному ходу нагружающей каретки при сдвиге.

По результатам измерения растяжения материала автоматически рассчитываются следующие показатели (рис. 2.4):

- растяжимость при максимальном усилии 490 сН/см (500 гс/см = 490 сН/см) *EMT* (Extension at Maximum Tension);
- энергия растяжения *WT* (Work Tension) – энергия, затраченная на растяжение, численно равная площади под кривой растяжения, на рис. 2.4 обозначена буквой *B*;
- линейность кривой растяжимости *LT* (Linearity), численно равная отношению, выраженному в процентах, площади *B* под кривой растяжения к площади *A* треугольника *abc*;
- эластичность *RT* (Resilence), численно равная отношению, выраженному в процентах, площади *C* под кривой релаксации к площади *B* под кривой растяжения.

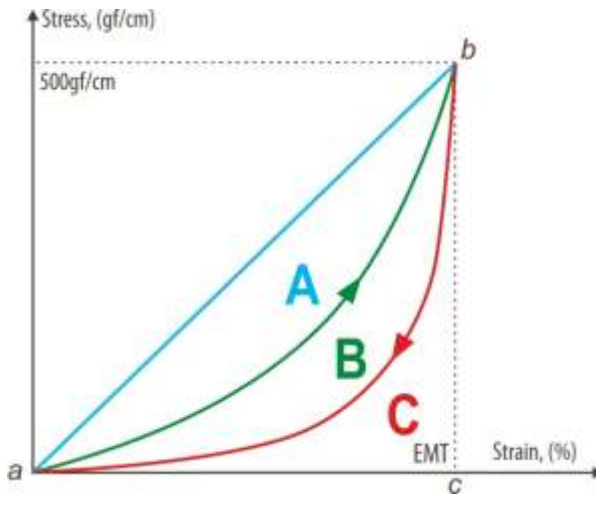


Рисунок 2.4 - Схема графика одноциклового растяжения и обозначения площадей под кривыми растяжения (B), релаксации (C) и треугольника abc (A)

Схема измерений показателей сдвига показана на рис. 2.5.

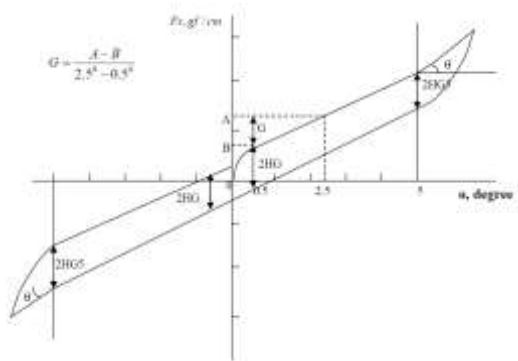
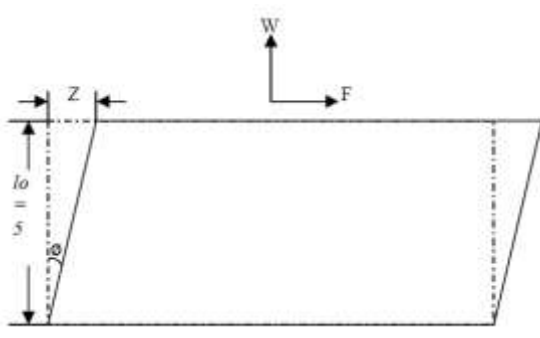


Рисунок 2.5 - Схема сдвига пробы материала [135]

Рисунок 2.6 - Показатели, измеряемые при сдвиге пробы материала [135]

По результатам деформации сдвига под действием приложенного усилия F получали следующие показатели (рис.2.6):

G – модуль сдвига, численно равный углу наклона графика между значениями $0,5$ и $2,5^\circ$, рассчитывают по отношению (2.1)

$$G = (A - B) / (2,5^\circ - 0,5^\circ); \tag{2.1}$$

$2HG$ – гистерезис усилий при угле сдвига $0,5^\circ$;

$2HG5$ – гистерезис усилий при угле сдвига 5° ;

$MEAN$ – среднее значение этих показателей для левой и правой ветвей

Перечисленные показатели сдвига измеряли в условиях малого предварительного растягивающего усилия $W=9,8$ сН/см, необходимого для выравнивания поверхности пробы.

2.3. Результаты измерения показателей растяжения и сдвига

Полная номенклатура единичных показателей сдвига и растяжения для исследованных трикотажных материалов включала:

- жесткость при сдвиге, G , сН/см·град,
- гистерезис кривой «усилие – угол сдвига $\pm 0,5$ град.», $2HG$, сН/см,
- гистерезис кривой «усилие - угол сдвига ± 5 град.», $2HG5$, сН/см,
- работа растяжения под нагрузкой 490 сН, WT , сН·см/см²,
- деформация удлинения под нагрузкой 490 сН, EMT , %,
- линейность кривой «нагрузка – растяжение/отдых», LT ,
- доля упругой деформации растяжения, RT , %,
- жесткость при изгибе, B , сН·см²/см.

Графические виды зависимостей растяжения и сдвига для материалов $T1-T19$ приведены на рис.П2.1-П2.38 и рис.П2.77-П2.95 Приложения 2.

После проведения корреляционного анализа и исследования зависимостей, существующих между перечисленными показателями, для дальнейшего использования были выбраны:

- жесткость при сдвиге, G , сН/см·град,
- деформация удлинения под нагрузкой 490 сН, EMT , %.

Показатели растяжимости EMT и сдвига G материалов приведены в табл. П2.1 Приложения 2.

2.4. Измерение показателей растяжения при малых нагрузках

После анализа данных растяжения был сделан вывод, что измеренные показатели не могут быть использованы для моделирования условий компрессии под одеждой, поскольку они получены при нагрузке 490 сН/см, вызывающей в материале большие по величине деформации, не характерные для компрессионной одежды. На основе значений EMT различных материалов нельзя получить адекватного представления об их компрессионных свойствах. Поэтому начальные участки кривых растяжимости были измерены с увеличенной детализацией.

Для задания компрессионных групп материалов был предложен новый показатель вместо EMT - величина растяжения при усилиях 0...49 сН/см, обозначенный нами ε_{40} , как наиболее соответствующая эксплуатационным нагрузкам, возникающим в материале компрессионной одежды. Пример детализации графика растяжения в направлении вдоль петельных столбиков для материала $T9_{bc}$ приведен на рис.2.7.

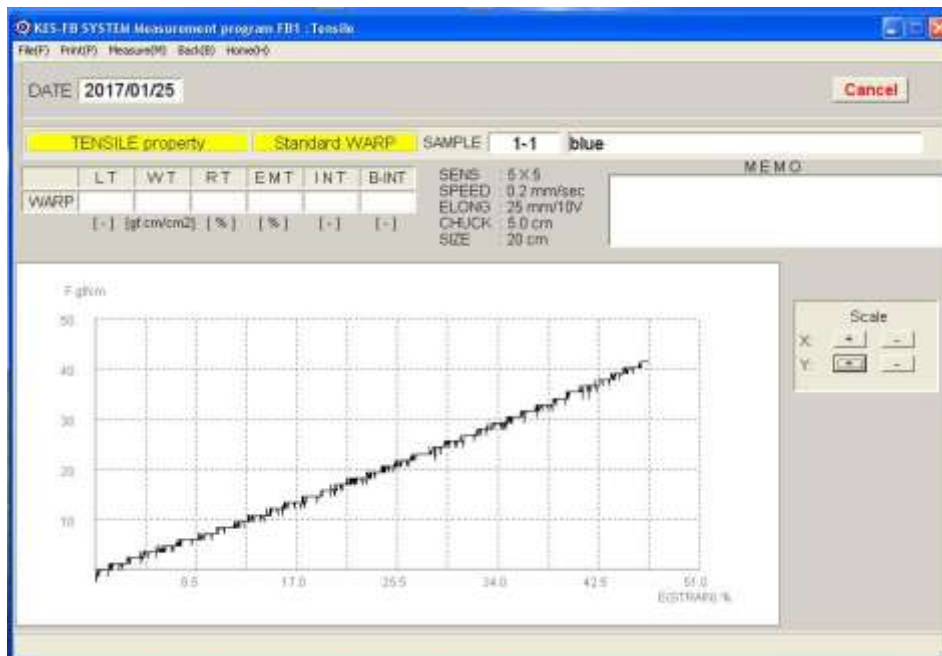


Рисунок 2.7 - Детализация графика растяжимости материала $T9_{bc}$ на участке 0-49 сН/см

Значения растяжимости при 49 сН/см приведены в табл. П2.1 Приложения 2. Графические виды зависимостей усилия растяжения от относительного удлинения для малых эксплуатационных нагрузок показаны на рис.П2.39-П2.76 Приложения 2. На рис.2.8 показаны начальные участки кривых растяжения, ограниченные величиной деформации 30% или усилием 49 сН/см.

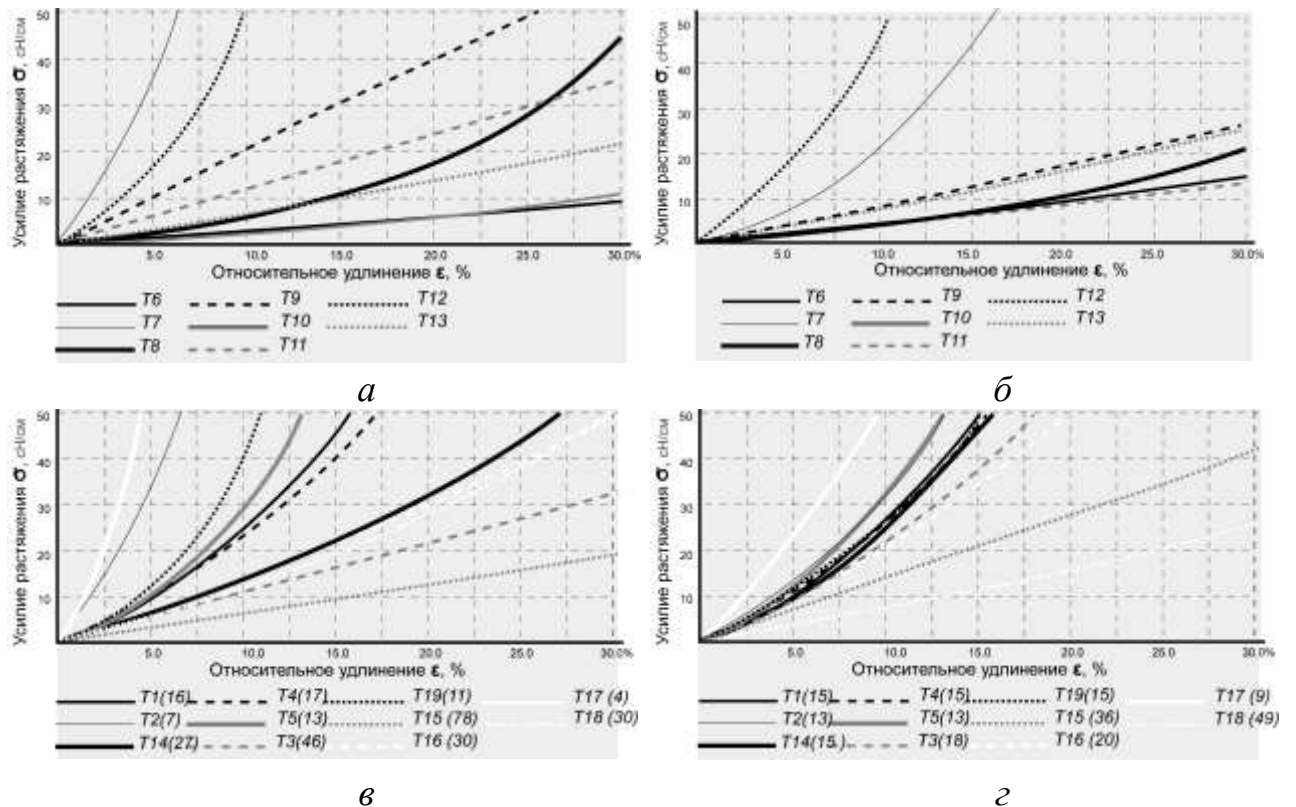


Рисунок 2.8 - Кривые "усилие растяжения σ - удлинение ε " для материалов T6-T13: а - вдоль петельных столбиков (в.с.), б - поперек петельных столбиков (п.с.), для материалов T1-T5; T14-T19: в - вдоль петельных столбиков (в.с.), г - поперек петельных столбиков (п.с.)

Относительные удлинения исследуемых трикотажных полотен при малых нагрузках охватывают диапазон значений от 4 до 165 %, что можно использовать для характеристики механизма возникновения компрессионного давления под растянутой оболочкой. Такой значительный интервал еще раз подтверждает правильность выбора материалов для исследования.

2.5. Исследование сокращения поперечных размеров при растяжении

В условиях одноосного растяжения пробы материала испытывает сокращение поперечных размеров. При проектировании одежды уменьшение поперечных размеров материала необходимо учитывать в виде положительных прибавок, задаваемых к длине изделий. Для их расчета был проведен эксперимент по измерению поперечных сокращений материалов в направлениях вдоль и поперек петельных столбиков, по схеме рис. 2.9.

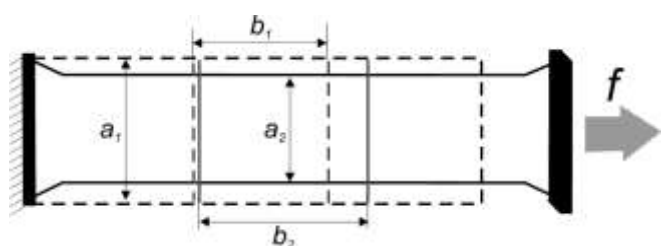


Рисунок 2.9 - Схема измерения поперечного сокращения размеров проб материалов

Результаты измерений были обработаны и получены интерполированные зависимости уменьшения поперечных размеров материалов в виде линейных зависимостей вида

$$\varepsilon_{\perp} = K\varepsilon + c \quad (2.2)$$

где ε_{\perp} - относительное сокращение ширины материала в направлении, перпендикулярном приложенному усилию растяжения, %; ε - относительное удлинение материала в направлении приложенного усилия, %; K и c - коэффициенты линейной зависимости. Начальные значения размеров пробы трикотажного полотна в недеформированном состоянии: $a_1=0,1\text{м}$, $b_1=0,1\text{м}$.

$$\varepsilon_{\perp} = (a_1 - a_2) \cdot 100 / a_1 \quad (2.3)$$

$$\varepsilon = (b_2 - b_1) \cdot 100 / b_1 \quad (2.4)$$

Данные измерений и значения коэффициентов K и c для всех материалов в направлениях вдоль и поперек петельных столбиков приведены в табл. П2.2 Приложения 2. Примеры графического вида зависимостей для материалов *1вс*, *8вс*, *11вс* показаны на рис.2-10.

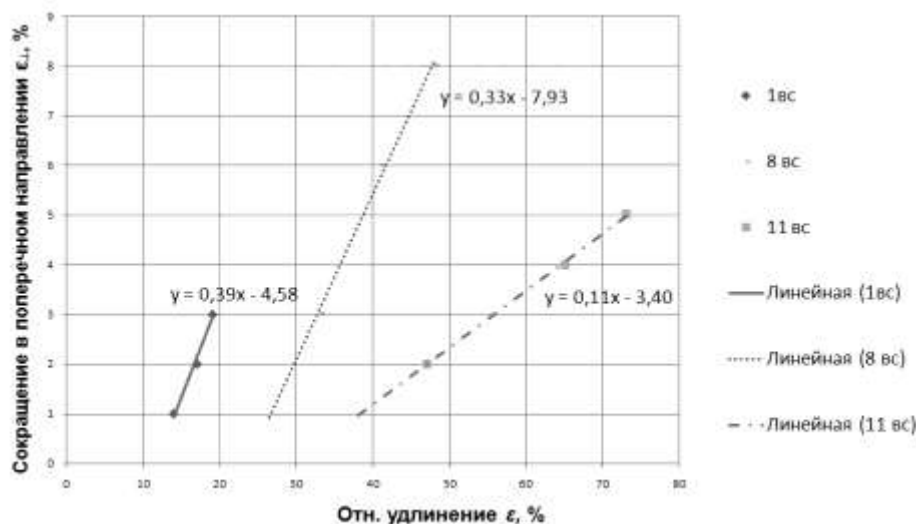


Рисунок 2.10 -
Графики для
выбора сочетаний
величин
относительного
удлинения и
поперечного
сокращения ϵ_{\perp} (ϵ)
для материалов
1вс, 8вс, 11вс

Из полученных данных видно, что изменение поперечных размеров испытанных трикотажных полотен составляет до 27% при усилии 98 Н/м и будет учтено при расчете деталей компрессионной одежды в главе 5.

2.6. Исходные данные для разработки теоретической модели (часть 1)

Для последующего теоретического моделирования трехмерной системы «фигура - компрессионная одежда» и деформационных свойств материала в сформирована следующая совокупность исходных экспериментальных данных:

1) зависимости деформаций материала в продольном и поперечном направлениях от усилий растяжения и сдвига для расчета заужения деталей конструкции и построения их разверток, а именно:

- «усилие - относительное удлинение» в интервале нагрузок 0...490 сН/см;

- «усилие сдвига - угол деформации» в интервале значений перекоса 0...8 град.;

- «продольное удлинение – поперечное сокращение» в интервале нагрузок 0...98 сН/см (или 100гс/см);

2) графики растяжимости трикотажных материалов при нагрузках, не превышающих 49 сН/см, необходимые для определения их компрессионной способности;

3) зависимости $\sigma_{ec}(\varepsilon_{ec})$, $\sigma_{nc}(\varepsilon_{nc})$, $\tau(\theta)$, необходимые для построения виртуальных моделей трикотажных материалов.

Выводы по главе 2

1. Измерены показатели растяжимости и сдвига 19 трикотажных материалов, получаемые при испытании проб в плоском состоянии, с помощью автоматизированного прибора KES-FB1, общепринятого в мировой практике текстильного материаловедения. Показан нелинейный характер деформации от усилия растяжения и сдвига материалов.

2. Изучено растяжение выбранных материалов при нагрузках, приближенных к реальным и возникающим при эксплуатации одежды. Для этого были детально изучены графики «усилие - растяжение» в областях нагрузок 0...49 сН/см, обеспечивающих комфортное давление на тело.

3. Полученные данные будут использованы для расчета компрессионной способности трикотажных материалов $P(\varepsilon) = P(\sigma(\varepsilon))$, задания их групп и виртуального моделирования поведения оболочек из исследованных материалов.

Глава 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПРЕССИОННЫХ СВОЙСТВ ТРИКОТАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПОВЕРХНОСТИ МЯГКИХ ТКАНЕЙ ФИГУРЫ

Результаты, полученные в этой главе, опубликованы в работе [131], изложены в двух тезисах докладов [90,92]

3.1. Методы и средства исследования

Для определения зависимости между давлением на объемную форму и усилием растяжения $P(\sigma)$, оказываемого материалом, было проведено две серии экспериментов:

- на цилиндрической поверхности, моделирующей мягкие ткани фигуры;

- на семи (разной полноты, развитие мышечной и жировой тканей) реальных фигурах в областях $O_{г4}$, $O_{т}$, $T_{вж}$, $O_{б}$, $O_{бед}$, $O_{к}$.

В качестве метода исследования выбран инструментальный, контактный метод измерения давления под поверхностью материала с помощью резистивного датчика давления. Определение допустимых значений давления на тело выполнено на основе семантической шкалы психофизиологического воздействия с двумя значениями: 1 - «отсутствие дискомфорта», 2 - «дискомфорт при продолжительном воздействии».

3.2. Исследования с силиконом

Для изучения компрессионной способности текстильных материалов в растянутом состоянии была создана экспериментальная установка (рис.3.1). Датчик сопротивления 3 марки *FlexiForce A201*, имеющий форму круга с площадью $S_{д} = 0,713 \text{ см}^2$, закрепляли на цилиндрической поверхности из силикона 2, максимально соответствующего по модулю объемного сжатия

мягким тканям тела (косметологический силикон [83]). Датчик 3 был подключен к омметру 4.

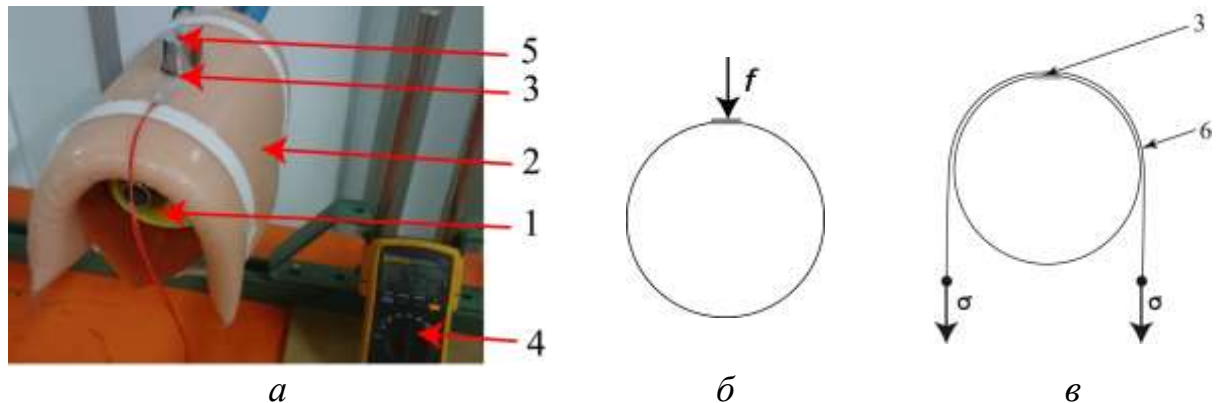


Рисунок 3.1 - Внешний вид экспериментальной установки для изучения компрессионной способности текстильных материалов (а), схема прижатия материала к упругой подложке при калибровке(б): при измерении давления материала (в): 1 - жесткая основа ($d = 8$ см), 2 - упругая подложка из косметологического силикона (толщина 2 см), имитирующая мягкую ткань тела, 3 – датчик давления, 4 – омметр, 5 - калибровочная нагрузка, 6 – материал

3.2.1. Построение калибровочных графиков "сопротивление датчика - давление"

Первоначально была выполнена калибровка датчика, для этого на него устанавливали грузы известной массы и рассчитывали оказываемое ими давление. Для перевода показаний датчика сопротивления в значения давления были построены две калибровочные кривые с использованием грузов с массами 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 150, 170 г, что соответствовало нагрузкам $f = \{0.98, 1.96, 4.90, 9.80, 18.60, 49, 98, 147, 165.60\}$ сН. Первую калибровочную кривую получили при непосредственной установке грузов на датчик с последующим расчетом давления по площади основания груза

$$P_{c1} = 100 \cdot f / S_{гр}. \quad (3.1)$$

где $S_{гр}$ – площадь основания груза, $см^2$

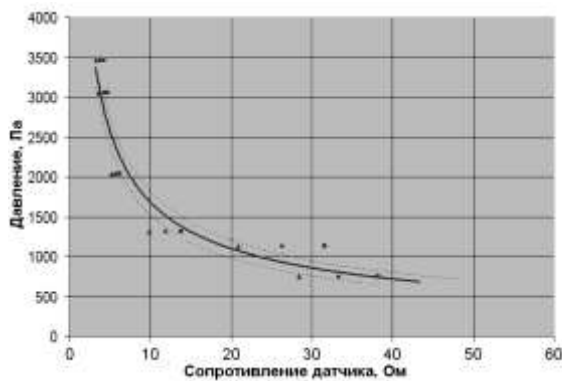
Вторую калибровочную кривую получали при нагружении датчика через тонкую эластичную подложку (далее – «компенсатор»), распределяющую вес груза более равномерно по всей площади датчика. Давление со стороны материала во втором случае рассчитывали по формуле

$$P_{c2} = 100 \cdot (f + p) / S_d, \quad (3.2)$$

где p – вес «компенсатора», равный 11,5 сН, S_d – площадь датчика, см².

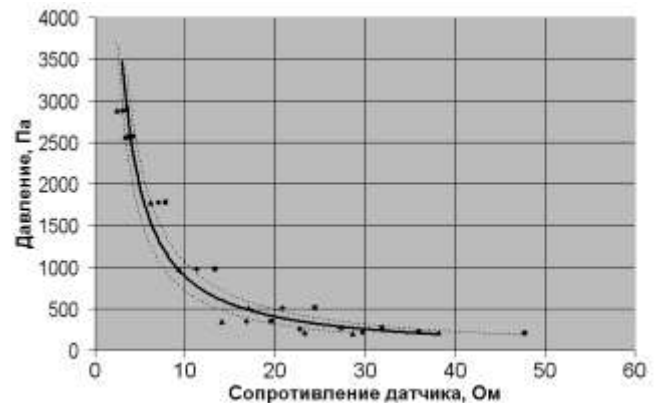
Две параллельные калибровочные схемы, на наш взгляд, позволят дифференцированно подойти к вычислению фактического давления над антропометрическими точками, под которыми имеются костные образования, например, над остисто-подвздошной точкой (первая схема измерений), или они отсутствуют, например, в области ягодич (вторая схема измерений).

Сопротивление датчика под грузом измеряли от семи до 22 раз с последующей обработкой результатов методами математической статистики [82]. Ошибка измерения сопротивления для доверительной вероятности 95 % не превышала в первой схеме $\pm 2,52$ Ом, а во второй схеме $\pm 3,9$ Ом. Калибровочные кривые $P_{c1}(R)$ и $P_{c2}(R)$, аппроксимирующие их уравнения и границы для доверительной вероятности 95% приведены на рис.3.2,



$$P_{c1} = 6875 R^{-0.61}$$

a



$$P_{c2} = 12109 R^{-1.1351}$$

б

Рисунок 3.2 - Калибровочные кривые и аппроксимирующие их уравнения с линиями доверительных интервалов в случае непосредственного воздействия грузов на силикон (*a*) и опосредованно через эластичный «компенсатор» (*б*)

Результаты измерений сопротивления для двух условий калибровки датчика давления приведены в табл. ПЗ.1 и ПЗ.2 Приложения 3.

Из рис.3.2 видно, что интервал измеряемого давления для обеих схем составил 250...3750 Па, что достаточно для исследования компрессионной способности одежды согласно данным табл. 1.4. Согласно полученным зависимостям для 95% уровня доверительной вероятности погрешность определения давления по приведенным калибровкам составила 12 % и 7 % для давлений соответственно 1 кПа и 2,5 кПа соответственно, что сопоставимо с погрешностями для диапазонов малых и средних значений давления, полученных в работе [2].

Формы зависимостей отражают особенности действия приложенного концентрированного усилия на датчик: в первом случае давление может быть распределено неравномерно по площади, во втором случае - только равномерно. В реальной ситуации растяжение материала может вызывать неопределенное распределение давления, поэтому в ходе натурного эксперимента по схеме рис.3.1,б для опеределения фактического давления трикотажных материалов использовали обе калибровочные кривые, а фактический результат опеределляли по выражению

$$P_{C\text{ ср}} = (P_{c1} + P_{c2})/2 \quad (3.3)$$

где P_{c1} - давление, полученное по кривой на рис.3.1, а при показаниях омметра R , Па; P_{c2} - давление, полученное по кривой на рис.3.1, б при показаниях омметра R , Па.

Предложенное усреднение измерений позволило получить значение давления для участков тела с разными физическими свойствами поверхности. Для измерения возникающего давления в конкретных случаях могут быть выполнены расчеты только компоненты P_{c1} - для тканей тела, под которыми имеются костные образования, компоненты P_{c2} - для мягких тканей.

3.2.2. Построение комплексных зависимостей "удлинение материала - сопротивление датчика - давление"

Давление на силикон измеряли в условиях растяжения материалов по схеме на рис.3.1в. Для этого на упругую подложку из силикона 2 укладывали пробу материала 6 шириной 5 см и длиной 30 см, к концам которой прикладывали нагрузку, ступенчато нарастающую в диапазоне 12,5 – 165,6 Н/м. Количество испытаний с одним материалом составило от 5 до 12 раз. Пробы выкраивали вдоль и поперек петельных столбиков.

Показания датчика во время прямых измерений давления и измерений через «компенсатор» были использованы для построения зависимостей «Усилие растяжения - сопротивление датчика» $\sigma_{c1}(R)$ и $\sigma_{c2}(R)$.

На рис.3.3 приведены примеры графиков, полученных для двух условий измерения давления, для материала *T4* вдоль петельных столбиков. Графики зависимостей для всех материалов приведены на Рис. ПЗ.1-ПЗ.76 Приложения 3.

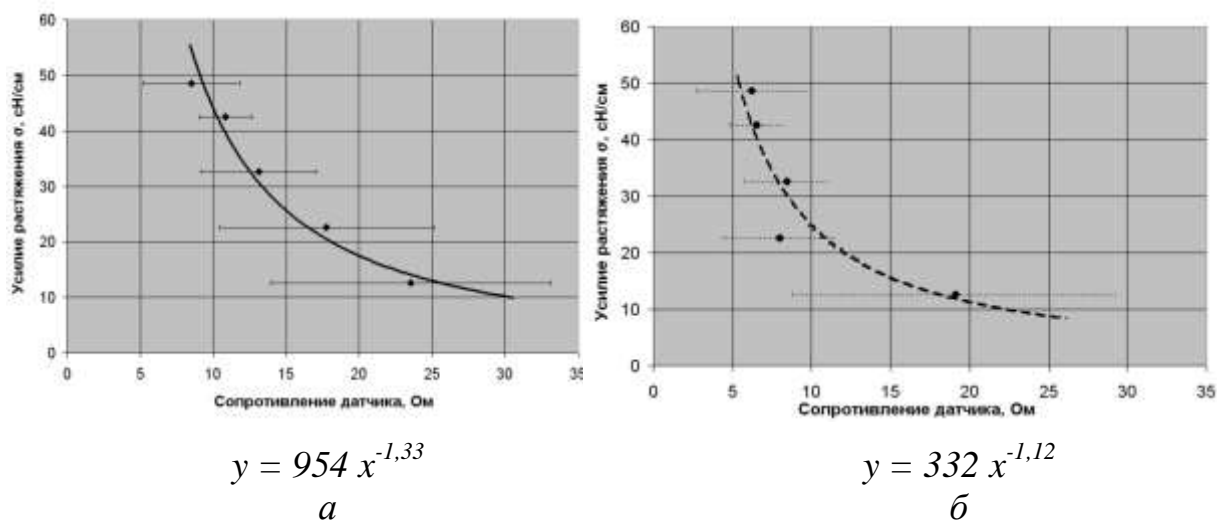


Рисунок 3.3 - Аппроксимированные зависимости между сопротивлением датчика и усилием растяжения материала вдоль петельных столбиков *T4вс* для прямого измерения давления (*a*), и через эластичный «компенсатор» (*б*)

Таким образом, на экспериментальном стенде измеряли три взаимосвязанные физические величины: сопротивление датчика, удлинение материала, давление под материалом. Поэтому логическим решением является их объединение. Совместное использование графиков $\sigma(\varepsilon)$, $P_{c1}(R)$ и $\sigma_{c1}(R)$, позволяет перейти к установлению зависимостей между относительным удлинением материала и развиваемым им давлением. Для этого совместили оси трех графиков, как показано на рис.3.4.

Такое совмещение позволило найти по значению относительного удлинения ε соответствующее ему усилие растяжения σ_{c1} (верхняя левая часть рисунка), по усилию - сопротивление датчика R (правая верхняя часть рисунка), а затем - давление под материалом P_{c1} (правая нижняя часть).

Алгоритм поиска величины давления P_{c1} показан на рис.3.4 белой стрелкой. Аналогичный алгоритм для графиков зависимостей $\sigma(\varepsilon)$, $P_{c2}(R)$ и $\sigma_{c2}(R)$ связывает величины ε и P_{c2} .

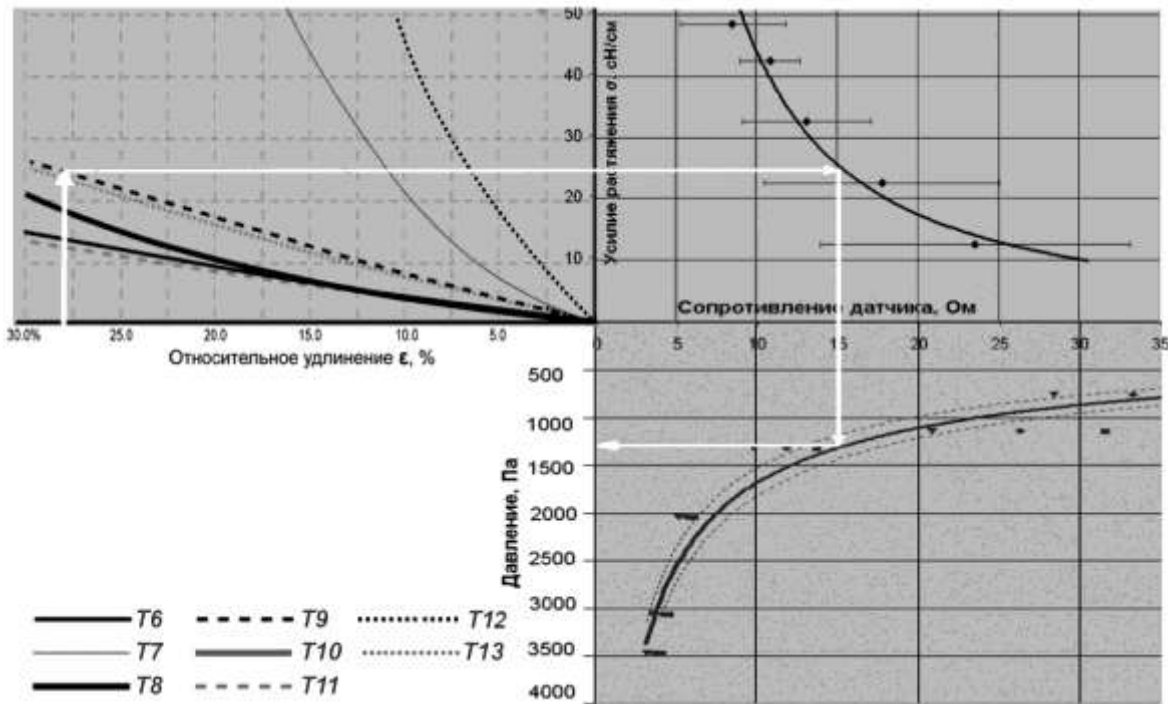


Рисунок 3.4 - Номограмма для определения давления материала $T9_{пс}$ в зависимости от его относительного удлинения

Пользуясь графической схемой, найдем значения удлинения материала $T9_{\text{пс}}$, необходимое для создания давления 1,3 кПа. Для этого необходимо от оси давлений из заданного значения давления провести влево горизонталь до пересечения с линией графика «давление-сопротивление датчика», затем вверх вертикаль до пересечения с линией графика «усилие растяжения-относительное удлинение» и затем влево горизонталь до линии графика «усилие-относительное удлинение».

Необходимое удлинение этого материала поперек петельных столбиков - 27,5 %. Для материала $T7_{\text{пс}}$ и $T12_{\text{пс}}$ заданное давление 1,3кПа будет достигнуто при их относительных удлинениях 11 и 13 % соответственно, т.е. почти в 2 раза меньше.

Таким образом, последовательность графического нахождения парных сочетаний параметров - от давления P к относительному удлинению ε - позволяет определить относительное удлинение материала, а именно, запроектировать необходимую величину отрицательной конструктивной прибавки) для заданного (желаемого) давления одежды, т.е. может быть использована для расчета отрицательных прибавок компрессионной одежды.

3.3. Исследование на реальных фигурах

Физические и геометрические свойства поверхности тела человека зависят от расположения участка на фигуре, а также имеют различные значения для разных людей. Для изучения зависимости давления от относительного удлинения базовым элементом компрессионной одежды считалась полоса материала, замкнутая вокруг тела в горизонтальной плоскости. 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.

3.3.1. Объекты исследования

Измерение давления на тело было проведено для семи женских фигур, без антропометрических особенностей и видимых нарушений, Рис.3.5. Размерные признаки фигур, возраст, масса тела приведены в табл. 3.1.

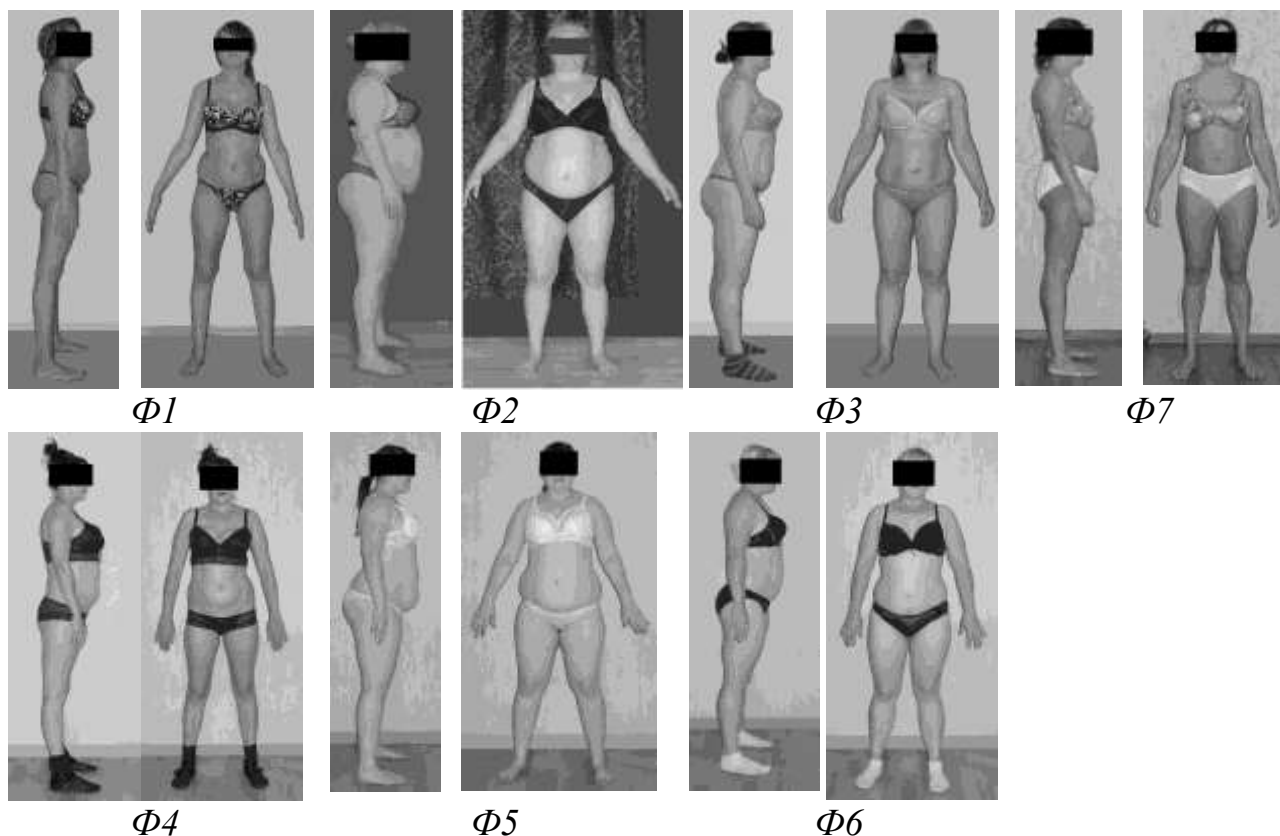


Рисунок 3.5 - Фотографии исследованных фигур

Таблица 3.1 - Характеристики фигур, выбранных для измерения компрессионного давления

Размерный признак	Значения размерных признаков для выбранных фигур, см						
	Ф1	Ф2	Ф3	Ф4	Ф5	Ф6	Ф7
O_r	86	112	97	97	102	102	100
$O_{т}$	68	105	83	85	94	82	84
$O_б$	92	126	108	102	119	102	104
$O_{бед}$	49	64	62	55	64	58	60
$O_к$	34	38	37	36	37	36	36
Рост	164	162	165	169	168	165	170
Масса тела	62	88	79	73	86	77	74
Возраст	28	36	24	31	22	24	38

3.3.2. Построение зависимостей «удлинение материала - давление под оболочкой»

Компрессионное воздействие на тело создавали с помощью контрольной полосы трикотажного материала шириной 10 см, которая в растянутом состоянии образовывала замкнутую вокруг тела поверхность и скреплялась сбоку компактным зажимом. На каждом из измеряемых обхватов была выбрана контрольная точка для измерения давления. Измерение проводили на шести участках поверхности фигуры с использованием материала *T19* обладающим достаточной упругостью для сжатия мягких тканей на начальном участке графика зависимости «усилие-растяжение» (рис. П2.37).

Участки создания компрессионного воздействия для фигуры $\Phi 1$ показаны на рис.3.6, для фигур $\Phi 2$ - $\Phi 7$ в Приложении 4. Контрольные точки измерения давления P_i показаны на рис.3.7.

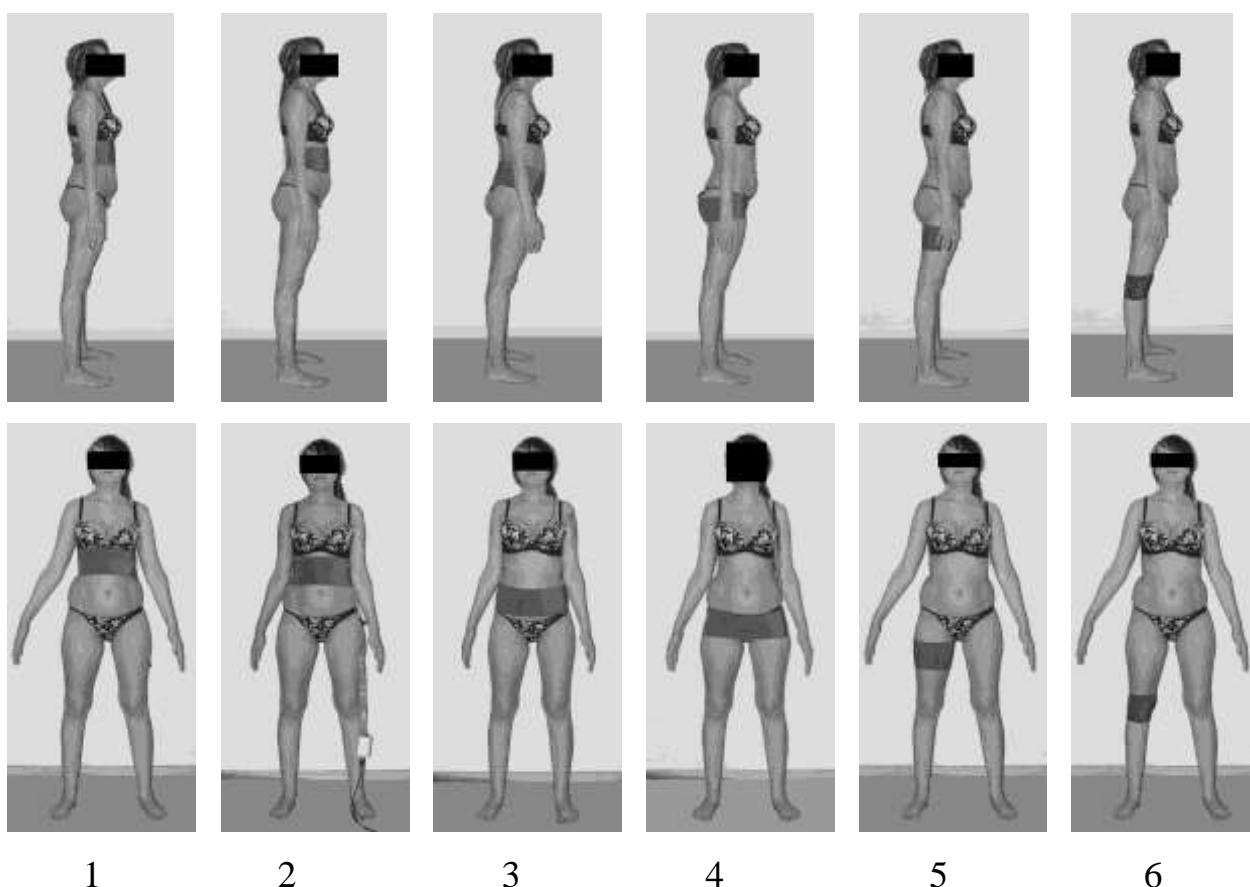


Рисунок 3.6 - Расположение полосы материала для измерения допустимого давления на тело

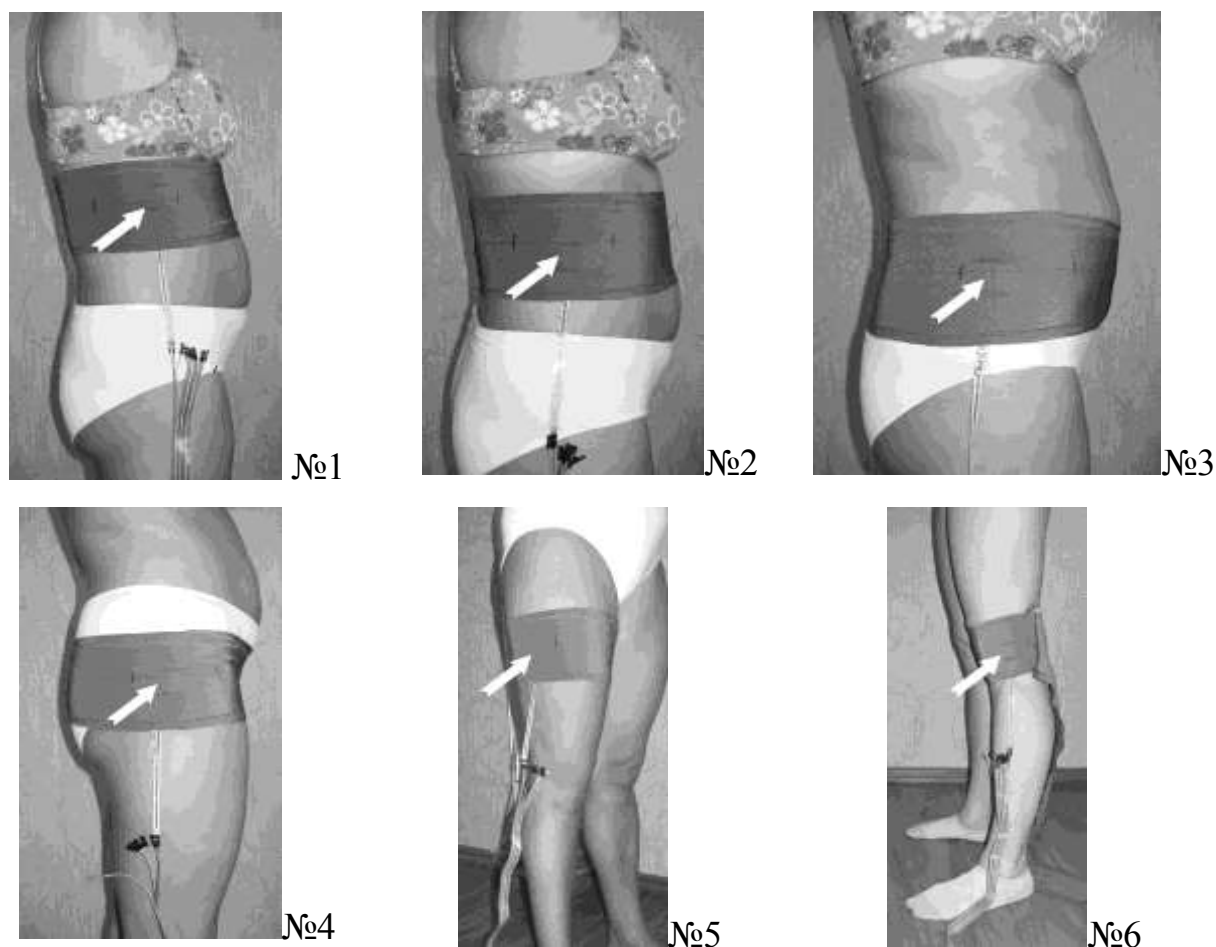


Рисунок 3.7 - Точки измерения допустимого давления на тело указаны стрелкой

В ходе эксперимента усилие растяжения полосы материала увеличивали до тех пор, пока ее компрессионное воздействие не оказывало дискомфортного ощущения. Растяжение фиксировали и по прошествии 1-2 минут ослабляли в случае возникновения дискомфортного ощущения до приемлемого значения.

Кроме давления, в ходе эксперимента, по фотоснимкам фиксировали относительные деформации участков фигуры $\delta_{i\Phi}$ и δ_{iC} во фронтальной и сагиттальной проекциях (показано на рис. 3.8).

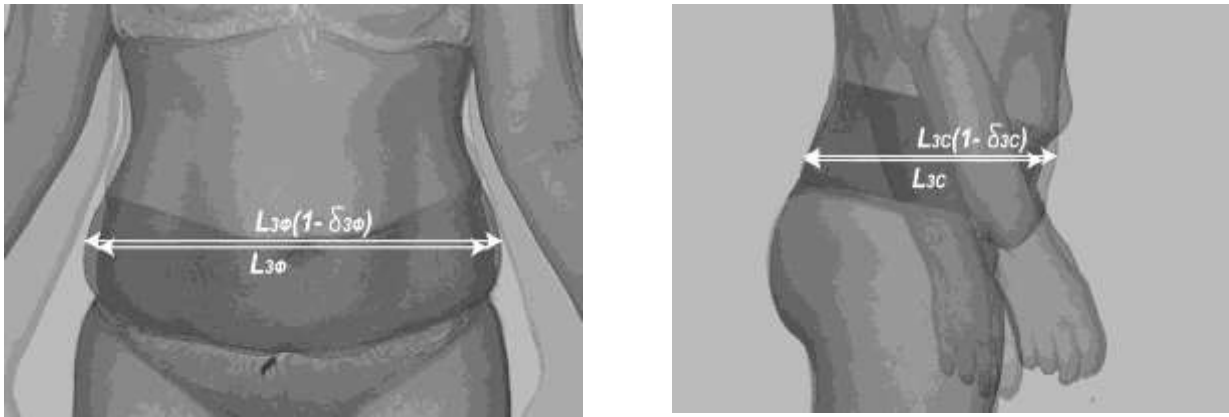


Рисунок 3.8 - Определение значений $\delta_{3\phi}$ и δ_{3c} для фигуры $\Phi 3$

Относительное удлинение полосы трикотажного материала ε_i , определяли по увеличению расстояния между контрольными метками нанесенным через 10 см на контрольную полосу трикотажного материала. По измеренным значениям ε_i затем определяли возникающие усилия растяжения материала σ_i на основе графических зависимостей, полученных в главе 2. Измеренные значения P_i , ε_i , $\delta_{i\phi}$, δ_{ic} и рассчитанные по графической зависимости значения σ_i приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2 Значения параметров P_i , ε_i , σ_i , $\delta_{i\phi}$ и δ_{ic}

Показатель, символ	Значения показателей для разных фигур						
	$\Phi 1$	$\Phi 2$	$\Phi 3$	$\Phi 4$	$\Phi 5$	$\Phi 6$	$\Phi 7$
1	2	3	4	5	6	7	8
P_1	1550±140	1670±150	1580±140	1850±170	1655±150	1350±125	1600±145
P_2	1150±100	1450±130	1370±120	1200±110	1250±115	1175±105	1365±125
P_3	3550±320	3150±290	3365±300	3050±270	3750±340	3460±310	3175±290
P_4	3100±280	2870±260	3120±280	2900±260	2880±260	2800±255	2950±265
P_5	1650±150	1450±130	1200±110	1550±140	1350±105	1330±120	1550±140
P_6	1550±140	1100±100	1320±120	1710±155	1200±110	1350±125	1400±130
$\varepsilon_1, (\%)$	13	15	15	14	15	13	14
$\varepsilon_2, \%$	10	10	11	10	11	11	10
$\varepsilon_3, \%$	23	24	24	24	25	23	24
$\varepsilon_4, \%$	25	22	23	21	23	24	21
$\varepsilon_5, \%$	9	8	8	10	8	9	9
$\varepsilon_6, \%$	8	8	8	8	8	8	8
σ_1	55	70	70	60	70	55	60
σ_2	42	42	50	42	50	50	42

Окончание табл.3.2							
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
σ_3	125	140	140	140	150	125	140
σ_4	150	115	125	110	125	135	110
σ_5	40	39	39	42	39	40	40
σ_6	39	39	39	39	39	39	39
$\delta_{1\Phi}/\delta_{1C}\%$	2,5/0	2/0	2/0,5	1,5/0	1/0,5	1,5/0,5	1/-0,5
$\delta_{2\Phi}/\delta_{2C}\%$	4/-2,5	4/0	1,5/0	3/-0,5	0,5/0,5	2/0,5	2,5/0
$\delta_{3\Phi}/\delta_{3C}\%$	5,5/4,5	2,5/5	4,5/8,5	5/5	5,5/4,5	3,5/3	3/4,5
$\delta_{4\Phi}/\delta_{4C}\%$	2/2	0/1	3/1	1,5/2	3/1	1,5/2	1,5/1
$\delta_{5\Phi}/\delta_{5C}\%$	4/2	3/1,5	2,5/1,5	2,5/1	3/1	2,5/1,5	2/1
$\delta_{6\Phi}/\delta_{6C}\%$	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0

В ходе предварительного изучения особенностей восприятия компрессионного давления было выявлено, что выше $O_{Г4}$ и ниже $T_{вж}$ коррекция фигуры происходит преимущественно с использованием «пуш-ап» эффекта, вызывающего поддержку и смещение мягких тканей в вертикальном направлении. Сдавливающее воздействие на область O_6 приводило к нежелательному уменьшению величины профильной проекции этого участка, сдавливающее усилие материала на область $O_{Г3}$ также было нежелательным и дискомфортным без использования поддерживающего эффекта.

В области торса на участке от $O_{вж}$ до $O_{Г4}$ корректирующее давление направлено преимущественно на сжатие мягких тканей. Эту область торса можно разделить на три зоны с различными условиями создания давления:

зона 1 – от тазобедренного сустава до подвздошной ости тазовой кости;

зона 2 – от остисто-подвздошной кости до нижнего ребра грудной клетки;

зона 3 – от нижнего ребра до $O_{Г4}$.

В зоне 1 при создании давления материал во фронтальной части воздействует на нижнюю область брюшной полости, а по бокам опирается на область поддерживаемую мышцами и фасцией тазовой кости. Корректирующее воздействие в этой зоне направлено на создание «плоского

живота» и устранение видимых неровностей, вызванных жировыми отложениями. С увеличением давления материала происходит уменьшение кривизны поверхности фронтальной части этой зоны, что способствует уменьшению давления в этой области, а основное воздействие приходится на боковые участки, где кривизна поверхности больше и она не уменьшается с возрастанием давления материала. Исходя из этого, для этой зоны 1 давление измерялось на боковом участке, в области тазобедренного сустава. Зафиксированный уровень допустимого давления в этой области оказался наибольшим из измеренных и составил 3750 Па (фигура $\Phi 5$).

В зоне 2 во фронтальной и боковой частях отсутствуют костные образования, поэтому давление материала приводит к «скруглению» этой области, уменьшению фронтальной проекции обхвата талии. Увеличение передне-заднего диаметра было зафиксировано на фигурах $\Phi 1$ и $\Phi 3$ (отрицательные значения δ_{2C}). С ростом компрессионного давления радиус кривизны фронтальной части фигуры в этой области уменьшается, происходит компрессионное воздействие на органы пищеварения и другие органы, находящиеся в брюшной полости; допустимые давления здесь оказались наименьшими из измеренных в области торса – 1150 Па ($\Phi 1$).

В зоне 3 сжатию тела под давлением материала препятствует грудная клетка. Факторами, определяющими комфорт давления в этой зоне являются ограничение легкости дыхания и ощущение давления на область солнечного сплетения во фронтальной части.

Из проведенных наблюдений было выявлено, что морфология измеряемых участков поверхности тела человека имеет сложный характер кривизны и упруго-эластичных свойств, поэтому зависимость комфортного значения давления от размерных признаков и морфологических особенностей телосложения (для заданной антропометрической точки) требует создания обширной базы данных и трудно поддается формализации.

Поэтому зависимость давления $P_i(\sigma)$, создаваемого контрольной полосой материала в заданной точке, для каждой фигуры рассчитывалось на основе полученных графических зависимостей $P_{c1}(\sigma)$ и $P_{c2}(\sigma)$ давления на силиконовый цилиндр и значения $P_i(\sigma_i)$ для материала *T19bc* в виде:

для участков мягких тканей, опирающихся на костный каркас,

$$P_i(\sigma) = P_{c2}(\sigma) (P_i(\sigma_i) / P_{c2}(\sigma_i)). \quad (3.4)$$

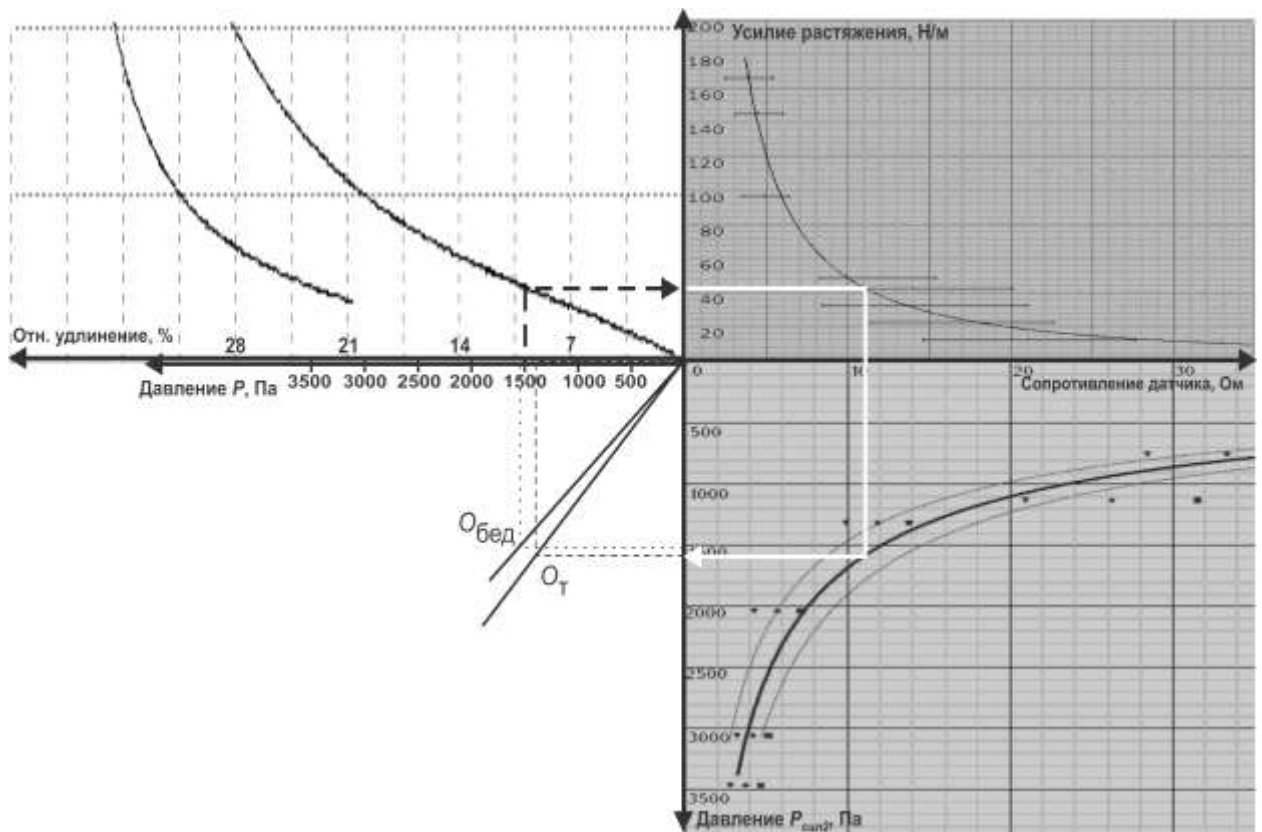
для участков мягких тканей, не опирающихся на костный каркас.

$$P_i(\sigma) = P_{c1}(\sigma) (P_i(\sigma_i) / P_{c1}(\sigma_i)) \quad (3.5)$$

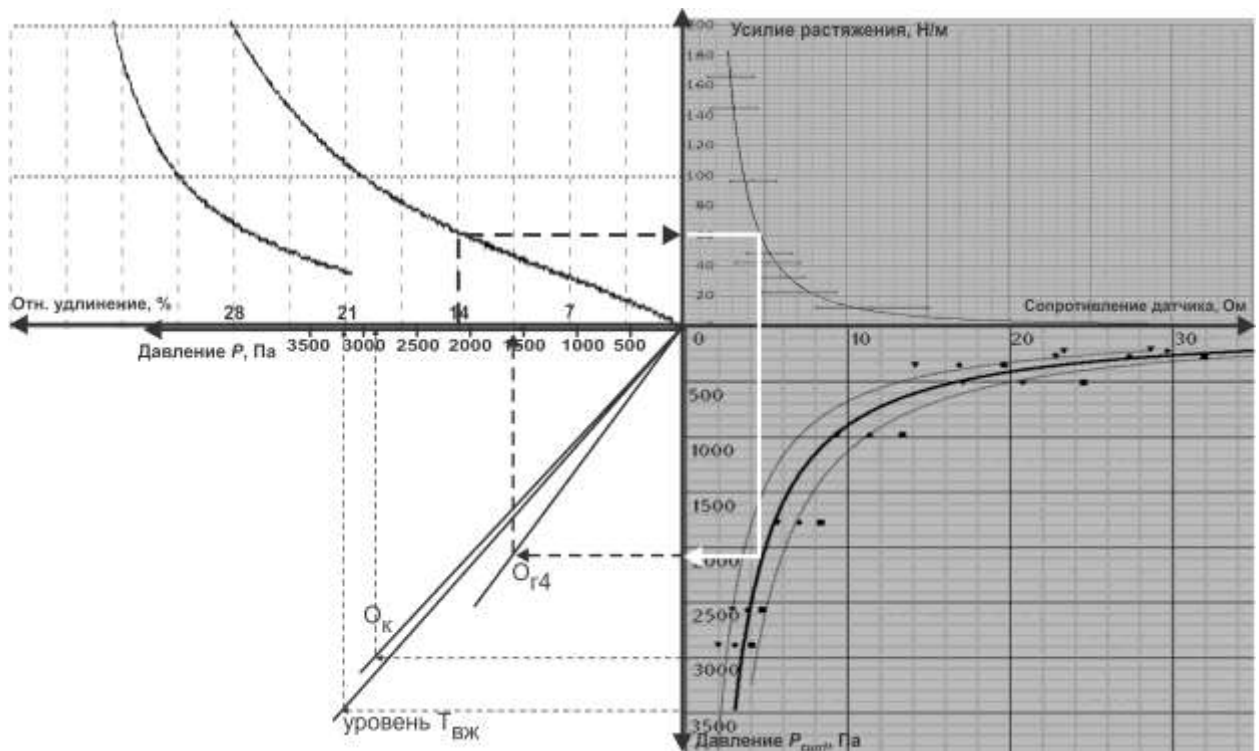
При таком способе вид зависимости давления от усилия, полученной для силиконового цилиндра сохранялась с точностью до постоянного множителя, который учитывает морфологию мягких тканей и кривизну поверхности тела на измеряемом участке. Рассчитанные значения множителей $(P_i/P_{c1}(\sigma_i))$ и $(P_i/P_{c2}(\sigma_i))$ для каждой из 6 контрольных точек фигуры $\Phi 7$ приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3 - Расчет коэффициентов зависимости давления на участки фигуры $\Phi 7$ на основе зависимостей давления на силиконовый материал

Номер точки i	1	2	3	4	5	6
Усилие упругой деформации контрольной полосы материала σ , Н/м	60	42	140	110	40	39
Измеренное давление на тело P , Па	1600	1365	3175	2850	1550	1400
Давление на силиконовом цилиндре $P_{c1}(\sigma)$, Па	2100	1750	3500	3000	1700	1600
Давление на силиконовом цилиндре, $P_{c2}(\sigma)$,	1850	1570	2770	2450	1530	1500
Непосредственная опора на костный каркас, да/нет	да	нет	да	да	нет	да
Угловой коэффициент: $P/P_{c1}(\sigma)$ для «да», $P/P_{c2}(\sigma)$ для «нет»	0,76	0,87	0,91	0,95	1,01	0,88



а



б

Рис.3.9 - Зависимости для согласования результатов параллельных испытаний с учетом характеристик материала, его компрессионной группы, зоны и геометрии поверхности фигуры: а – для точек 2,5; б – для точек 1,3,4,6

Для построения зависимостей давления от удлинения материала $P(\varepsilon)$ для заданных участков фигуры с учетом их кривизны и состава мягких тканей необходимо найти сложную функцию $P(\sigma(\varepsilon))$, на основе графической номограммы, показанной на рис. 3.9. Принцип ее построения аналогичен схеме, использованной в п.3.2.2 (рис 3.4), и дополнительно включает график в левом нижнем углу. Тангенс угла наклона графика линейной зависимости соответствует найденным значениям коэффициентов в табл. 3.3.

По проведенным измерениям уменьшение обхвата мягких тканей с опорой на костный каркас составляет 0-4 % для верхнего уровня давления, для второго типа мягкой ткани (без опоры на костный каркас) составляет 0-8,5% (табл. 3.2). Для случая неопределенного характера морфологии мягких тканей необходимо использовать среднее значение расчетных величин, относящихся к двум предложенным типам мягких тканей

3.4. Разработка классификации компрессионного воздействия одежды и групп трикотажных материалов

В основу классификации материалов для компрессионной одежды положены два показателя - растяжимость материала при нагрузках, возникающих в одежде, и создаваемое под ним давление. Коэффициент пропорциональности, объединяющий эти величины, был нами назван коэффициентом компрессионной способности материала $K_{\text{компр}}$. На основе проведенных исследований материалы по своей способности к созданию компрессионного давления были разделены на четыре группы *I, II, III, IV*. Значения $K_{\text{компр}}$ были выбраны на основе значений давления P , создаваемого в компрессионной одежде:

группа I - 400-1300 Па. Допустимое давление для комфортной повседневной одежды, воздействие менее 400 Па считали малым и не учитывали как компрессионное;

группа II - 1300-2000 Па. Критические для комфортной повседневной одежды;

группа III - 2000-3300 Па. Допустимое давление для компрессионной одежды медицинского и корректирующего назначения;

группа IV - более 3300 Па. Критические для одежды медицинского и корректирующего назначения повседневного использования (корсеты, сильная регуляция нарушений лимфотока и т. д.).

Значения $K_{\text{компр}}$ и диаграмма изменения $K_{\text{компр}}$ для разных групп при базовом значении $\Delta\varepsilon = 20\%$ приведены в табл. 3.4 и показаны на рис.3.10.

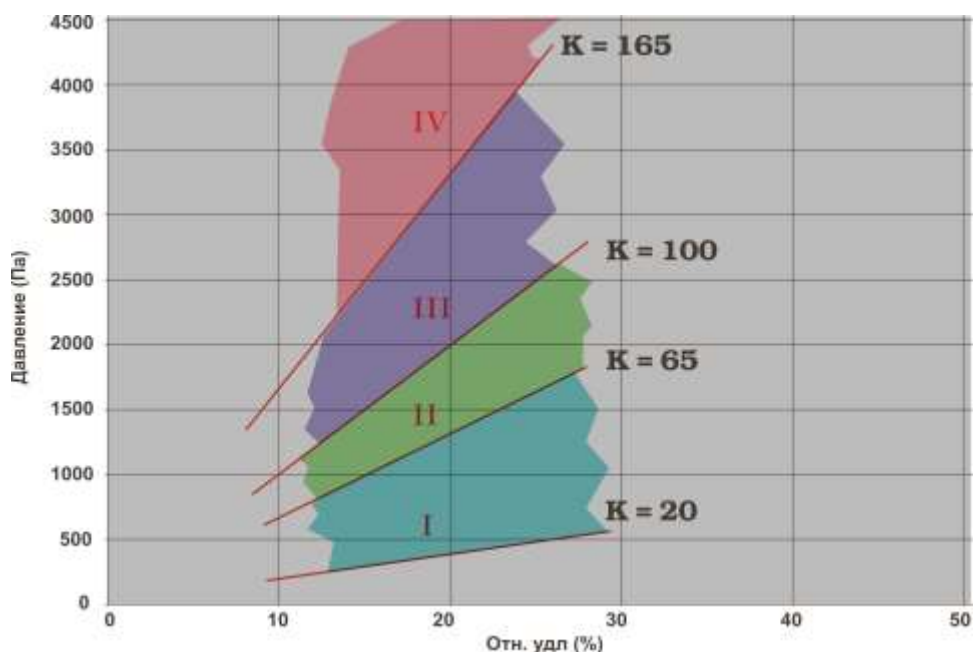


Рисунок 3.10 - Зоны значений $K_{\text{компр}}$ для трикотажных материалов

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.

Для нахождения значений $K_{\text{компр}}$ необходимо рассчитать значения производной сложной функции $P(\sigma(\varepsilon))$ в виде $(dP/d\sigma) \cdot (\Delta\sigma/\Delta\varepsilon)$ для значения $\varepsilon=20\%$. Расчет значений $dP/d\sigma$ был выполнен для зависимостей $P(\sigma)=P_{\text{ср}}$ (3.3), полученных для каждого из 19 материалов на силиконовой поверхности. (рис.ПЗ.77-ПЗ.80 Приложения 3). Исходя из графического вида зависимости усилия от относительного удлинения $\sigma(\varepsilon)$ (рис.П2.39-П2.76) были рассчитаны значения $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ в окрестности значения $\varepsilon=20\%$. Аналитические зависимости, интерполирующие $P_{c1}(\sigma)$ и $P_{c2}(\sigma)$, значения σ и $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ при $\varepsilon=20\%$ и рассчитанные на их основе значения $K_{\text{компр}}$ приведены в табл. ПЗ.3 Приложения 3.

Таблица 3.4. Характеристика компрессионных групп материалов

Компрессионная группа	Интервал создаваемого давления, Па	Коэффициент компрессии
<i>I</i>	400-1300	20-65
<i>II</i>	1300-2000	65-100
<i>III</i>	2000-3300	100-165
<i>IV</i>	Более 3300	Более 165

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, включающая проведение следующих испытаний.

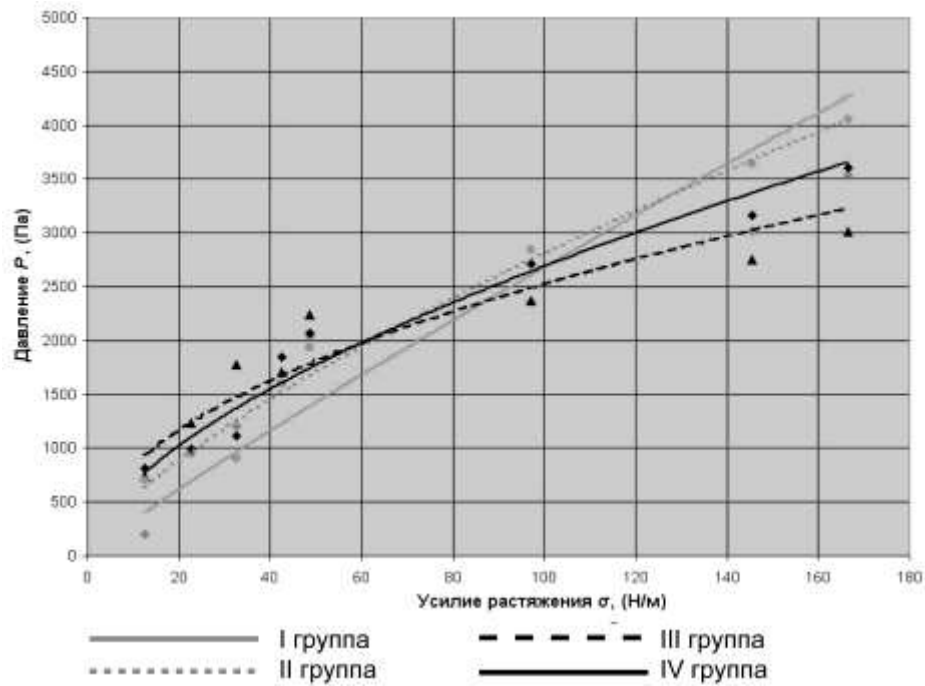
1. На специальном стенде, состоящим из основания с покрытием косметологическим силиконом, датчика давления и механизма растяжения материалов, необходимо измерить давления P_i под материалом в момент его растяжения σ_i . Построить поле корреляции для $P(\sigma)$ и определить аналитический вид функции $P(\sigma)$

2. Измерить удлинения ε материала под действием усилия растяжения σ . Построить зависимость $\sigma(\varepsilon)$.

3. На основе зависимостей $\sigma(\varepsilon)$ и $P(\sigma)$ определить значения $K_{\text{компр}} = dP/d\sigma \cdot \Delta\sigma/\Delta\varepsilon$. Для расчета $K_{\text{компр}}$ в работе использовалось базовое значение относительного удлинения $\varepsilon=20\%$.

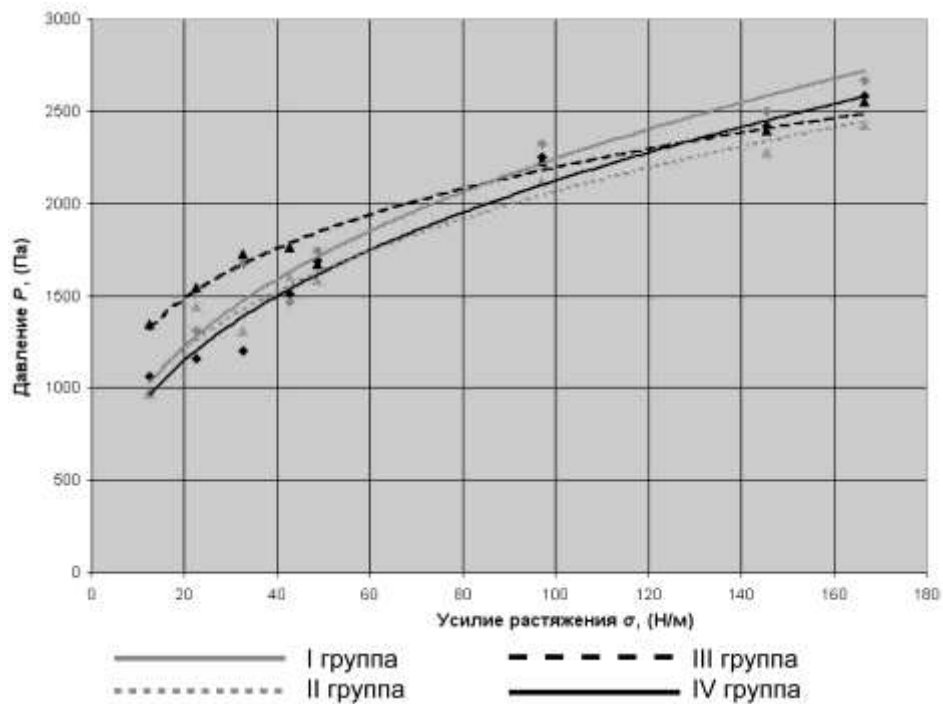
4. На основании $K_{\text{компр}}$ определить группу компрессионной способности материала (*I-IV*) и тип компрессионной одежды (Табл.1.4).

Результаты испытаний могут быть использованы либо для конфекционирования материалов, либо для выбора величины отрицательной конструктивной прибавки. Для удобного использования разработанной классификации графики зависимостей $P(R)$ и $\sigma(\varepsilon)$, стоящие в правой части номограмм были объединены для каждой из компрессионных групп для каждого из двух типов мягких тканей (рис.3-11). Аналогично номограммам приведенным на рис.3.9, с их помощью можно рассчитать зависимость давления от усилия растяжения материала заданной компрессионной группы для любой точки поверхности фигуры по единственной паре измеренных значений давления P и усилия растяжения σ контрольной полосы материала.



$$\begin{array}{ll}
 I & - P = 40,40 \sigma^{0,91} \\
 II & - P = 102,81 \sigma^{0,72} \\
 III & - P = 275,11 \sigma^{0,48} \\
 IV & - P = 168,93 \sigma^{0,60}
 \end{array}$$

a



$$\begin{array}{ll}
 I & - P = 397,16 \sigma^{0,38} \\
 II & - P = 448,12 \sigma^{0,33} \\
 III & - P = 714,90 \sigma^{0,24} \\
 IV & - P = 368,29 \sigma^{0,38}
 \end{array}$$

б

Рисунок 3.11 - Зависимости давления материала от усилия растяжения материала для четырех компрессионных групп для случая опоры мягкой ткани на костный каркас (*a*) и для случая отсутствия непосредственной опоры мягкой ткани на костный каркас (*б*)

3.5. Исходные данные для разработки теоретической модели (часть 2)

Необходимыми для разработки конструкции компрессионной одежды исходными данными в части проведенных измерений давления материала на трехмерную форму модельного стенда и фигуры человека являются:

- диапазон допустимых комфортных значений давления и задание участков фигуры для его измерения.

- компрессионная способность $P(\varepsilon)$ материала одежды для заданных участков фигуры, необходимая для расчета деформаций и задания конструктивных прибавок.

Для определения искомой зависимости $P(\varepsilon)$ необходимо провести измерение давления на объемную трехмерную форму, так как на плоскую поверхность материал давления не оказывает. Величины давления P и возникающего напряжения материала σ являются исходными для расчета двухфакторной зависимости $P(\sigma(\varepsilon))$ с использованием данных растяжения материала в плоском состоянии, полученных в главе 2.

При формировании набора исходных данных, и задания материала в соответствии с уровнем компрессионного давления необходимо учитывать упруго-эластичные свойства материалов и использовать классификацию материалов по их компрессионному свойству. Предложенный в работе способ выбора материала на основе значения компрессионной группы обеспечивает наиболее правильный подход, так как давление, создаваемое материалом одежды, может быть измерено инструментально и является объективным показателем воздействия на поверхность тела и уровня комфортности компрессионной одежды.

Выводы по главе 3

1. Разработан экспериментальный стенд для моделирования компрессионного давления, возникающего под замкнутыми напряженными текстильными оболочками на поверхности тела.

2. Проведены измерения границы допустимых значений комфортного компрессионного давления, создаваемых замкнутой полосой трикотажного материала в области 5 конструктивных обхватов фигуры человека.

3. Разработан графический метод определения компрессионной способности $P(\varepsilon)$ трикотажного материала для случаев цилиндрической поверхности экспериментального стенда и участков торса фигуры. Построены зависимости $P(\varepsilon)$ для 6 конструктивных обхватов фигуры человека.

4. Разработан новый показатель компрессионного воздействия - коэффициент компрессии $K_{\text{компр}}$ одежды на тело, учитывающий способность материалов создавать давление P при его относительном удлинении ε .

5. Разработана методика определения $K_{\text{компр}}$ и предложено группирование текстильных материалов по показателю $K_{\text{компр}}$, основанная на их способности к одноосному растяжению под влиянием малых нагрузок и созданию компрессионного давления в системе «мягкие ткани тела - компрессионная одежда».

6. Разработаны рекомендации по определению области применения трикотажных материалов на основе значения $K_{\text{компр}}$, облегчающие конфекционирование материалов в зависимости от назначения одежды.

Глава 4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТРЕХМЕРНЫХ ОБОЛОЧЕК ИЗ ТРИКОТАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПЛОТНООБЛЕГАЮЩИХ И СДАВЛИВАЮЩИХ ЧЕЛОВЕЧЕСКУЮ ФИГУРУ

Ключевыми направлениями в исследованиях облегающей одежды являются расчет деформаций сдвига и растяжения в оболочке, необходимых для облегания и исключения появления напряженных складок, и прогнозирование распределения компрессионного давления на тело.

В главе выполнена разработка алгоритма построения развертки поверхности трехмерной формы с учетом анизотропных свойств моделируемого материала, полученных с помощью измерительного комплекса KES-F (Kawabata).

Результаты, полученные в этой главе, опубликованы в работе [72], изложены в тезисах доклада [115].

4.1. Исходные данные для расчета

Исходным элементом для построения развертки принят участок триангулированной полигональной сети в трехмерном пространстве, моделирующий деталь одежды. Этот элемент полигона считали деформируемым, а потому изменение расстояний между узлами сети при его развертывании на плоскость рассматривали как условие возникновения упругих напряжений. Развертка исходного участка полигональной сети будет иметь минимальную энергию возникающих напряжений. В качестве элементов упругой деформации полигона использованы двумерные элементы – грани поверхности полигональной сети.

Использованная для расчета развертки зависимость напряжений от деформаций была рассчитана на основе измеренных с помощью специализированного комплекса KES-F зависимостей реального текстильного материала.

Чтобы учесть растяжение, которому подвергается материал при одевании на тело, построение разверток выполняли для ненапряженного состояния одежды. Для преобразования полигональной оболочки к этому состоянию её уменьшали на величину, равную сумме относительных деформаций растяжения материала и сжатия мягких тканей фигуры. Таким образом, в ненапряженном состоянии оболочка имеет иную объемно-пространственную форму, чем «аватар» фигуры. Изменение формы системы «аватар фигуры-одежда» выполняли с помощью масштабирования с весовыми коэффициентами контрольных обхватов формы объектами joint (сустав), расположенных в плоскостях контрольных сечений трехмерной формы и используемыми для компьютерного морфинга и анимации виртуальных персонажей [48].

4.2. Теоретический расчет напряжений в триангулированной полигональной сетке

Рассмотрим деформацию отдельной треугольной грани и силы, действующие на вершины треугольника (nodal force) при его деформации и 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 совпадают с единичными векторами системы координат. После деформации векторы u и v переходят в векторы U, V (рис.4.1).

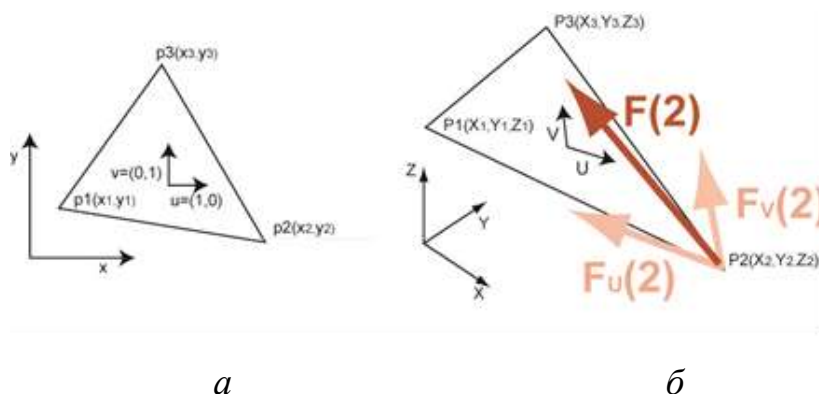


Рисунок 4.1 - Деформация элемента полигональной сетки: а – треугольная грань развертки, б – треугольная грань трехмерной полигональной сетки

Деформации в материале в направлениях поперек и вдоль петельных столбиков могут быть записаны в виде:

$$\varepsilon_{uu}=|U|-1, \varepsilon_{vv}=|V|-1, \quad (4.1)$$

а изменение угла между направлениями в виде [73]

$$\varepsilon_{uv}=(|U+V| - |U-V|) / \sqrt{2}. \quad (4.2)$$

Векторы U, V определим из уравнений:

$$U=(1/(x_{13}y_{23}-x_{23}y_{13})) (y_{23}P_1 + y_{13}P_2 + y_{12}P_3), \quad (4.3)$$

$$V=(1/ (x_{13}y_{23}-x_{23}y_{13}))(x_{23}P_1 + x_{13}P_2 + x_{12}P_3), \quad (4.4)$$

где $x_{ij} = x_i - x_j, y_{ij} = y_i - y_j$ - разности между координатами вершин треугольной грани развертки (рис.4.1, а), P_i – трехмерные векторы координат вершин грани.

По найденным деформациям можно рассчитать возникающие напряжения $\sigma_{uu}, \sigma_{vv}, \sigma_{uv}$. В классической теории упругости зависимость деформации от напряжения для главных направлений и коэффициенте Пуассона, равном нулю, рассчитывают по закону Гука:

$$\sigma_{uu}=E_1 \varepsilon_{uu} \quad (4.5)$$

$$\sigma_{vv}=E_2 \varepsilon_{vv} \quad (4.6)$$

$$\sigma_{uv}=G \varepsilon_{uv} \quad (4.7)$$

где E_1 – модуль упругости материала по оси x (соответствует направлению поперек полотна), Н/м; E_2 - модуль упругости материала по оси y (соответствует направлению вдоль полотна), Н/м, G – модуль сдвига материала, Н/м.

Однако реальный процесс деформации текстильных материалов имеет более сложный характер, чем описываемый зависимостями (4.5-4.7), поскольку на разных этапах развития деформации, начиная от исходного недеформированного состояния и заканчивая максимально-напряженным

состоянием, задействованы различные механизмы взаимодействия волокон и нитей. Для наполнения теоретических моделей реальным содержанием мы предварительно изучали физические свойства реальных материалов с помощью специализированных измерительных комплексов KES-F [75], FAST [105]. Типичная зависимость деформации растяжения под действием приложенного усилия 490 Н/м имеет нелинейный вид из-за влияния макроструктуры переплетения нитей и возникновения трения между ними.

Очевидно, что при таком характере деформирования невозможно рассчитать зависимость коэффициента сдвига G от коэффициентов E_1 , E_2 , кроме этого, зависимость деформаций от напряжения имеет смысл измерять только при растяжении - сжатый материал легко изменяет форму, собираясь в складки на свободной поверхности. По этим причинам использование закона деформации для трикотажного материала в виде (4.5) и (4.6) не отражает всех происходящих в ней изменений.

4.2.1. Расчет напряжений растяжения

Для расчета напряжений, возникающих при растяжении материала ($\varepsilon_{uu} > 0$, $\varepsilon_{vv} > 0$) были использованы экспериментальные данные измерительного комплекса KES-FB-1. Для интерполяции кривой растяжения на рис.2.2, $\sigma = f(\varepsilon)$ используем функцию f вида [38]:

$$f(\varepsilon) = (e^{\alpha\varepsilon} - 1) / \beta, \quad (4.8)$$

где α , β – коэффициенты, характеризующие свойства материала.

Коэффициенты α и β определим путем численного решения системы двух уравнений:

$$\begin{aligned} f_1(\varepsilon) &= (e^{\alpha\varepsilon_1} - 1) / \beta \\ f_2(\varepsilon) &= (e^{\alpha\varepsilon_2} - 1) / \beta, \end{aligned} \quad (4.9)$$

Значения $f_1, f_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2$, экспериментально измеренные для верхней ветви кривой растяжения на рис.2, равны:

$f_1 = 500 \text{ Н/м}$, $\varepsilon_1 = 15,79 \%$ (значение ЕМТ, равное максимальному удлинению под этой нагрузкой);

$f_2 = 134 \text{ Н/м}$, $\varepsilon_2 = 9 \%$ (в этой области угол наклона кривой примерно вдвое меньше чем в ЕМТ).

После решения уравнений (4.9) имеем $\alpha=0,1679, \beta=2,634$.

Расчетные зависимости для вычисления напряжений σ_{uu} , σ_{vv} для положительных значений деформаций имеют вид:

$$\sigma_{uu}(\text{Н/м})=(e^{0,1679 \cdot \varepsilon_{uu}} - 1) / 0,02634 \quad \text{при} \quad \varepsilon_{uu} > 0 \quad (4.10)$$

$$\sigma_{vv}(\text{Н/м})=(e^{0,1679 \cdot \varepsilon_{vv}} - 1) / 0,02634 \quad \text{при} \quad \varepsilon_{vv} > 0 \quad (4.11)$$

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

$$\sigma_{uu} = K\varepsilon_{uu}, K \gg 1 \quad \text{при} \quad \varepsilon_{uu} < 0 \quad (4.12)$$

$$\sigma_{vv} = K\varepsilon_{vv}, K \gg 1 \quad \text{при} \quad \varepsilon_{vv} < 0 \quad (4.13)$$

где K – коэффициент, Н/м.

4.2.2. Расчет напряжений сдвига

Вид кривой деформации сдвига (рис.2.3) считали линейным, однако определяемый по графику коэффициент наклона кривой γ не равен коэффициенту пропорциональности G в (4.7) [38]. При сдвиге материал деформируется неравномерно из-за наличия свободных границ (пробу зажимают только с двух сторон), вдобавок к тестируемой пробе перед

сдвигом прикладывают дополнительное растягивающее усилие 10 Н/м для расправления возникающих напряженных складок. Коэффициент сдвига для расчетов был взят $G=1,4\gamma$. Тангенс угла кривой на рис.2.3 составляет $\gamma = 0,05(\text{Н/м})/0,14(\text{рад})$, поэтому $G=1,4 \cdot 0,05/0,14=50$ (Н/м).

Зависимость для вычисления напряжений сдвига σ_{uv} имеет вид:

$$\sigma_{uv}(\text{Н/м})=50 \cdot \varepsilon_{uv}, \quad (4.14)$$

Определив возникающие в рассматриваемом треугольнике напряжения по выражениям (4.10-4.14), можно рассчитать узловые силы, действующие на его вершины. Силы, действующие по направлению U на точку 1 (рис.4.1), со стороны разных ребер составляют

$$\text{со стороны ребра } \{1-2\} \quad (4.15)$$

$$F_U(1)_{12} = 0.5 \sigma_{uu} (y_1 - y_2) + 0.5 \sigma_{uv} (x_2 - x_1)$$

$$\text{со стороны ребра } \{1-3\} \quad (4.16)$$

$$F_U(1)_{13} = 0.5 \sigma_{uu} (y_3 - y_1) + 0.5 \sigma_{uv} (x_1 - x_3)$$

Суммарная сила составит

$$F_U(1) = F_U(1)_{12} + F_U(1)_{13} = 0.5 \sigma_{uu} (y_3 - y_2) + 0.5 \sigma_{uv} (x_2 - x_3) \quad (4.17)$$

Аналогично запишем уравнения для V:

$$F_V(1) = 0.5 \sigma_{vv} (x_2 - x_3) + 0.5 \sigma_{uv} (y_3 - y_2) \quad (4.18)$$

Для всех вершин треугольника, записывая единичные векторы направлений как $U/|U|$ и $V/|V|$ получим:

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

$$F(2) = 0.5(\sigma_{uu} (y_1 - y_3) + \sigma_{uv} (x_3 - x_1)) U/|U| + 0.5(\sigma_{vv} (x_3 - x_1) + \sigma_{uv} (y_1 - y_3)) V/|V| \quad (4.19)$$

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

Силы, действующая на узлы развертки рассчитывали как:

$$f_u(1) = -F_U(1) \quad (4.20)$$

$$f_v(1) = -F_V(1)$$

$$f_u(2) = -F_U(2)$$

$$f_v(2) = -F_V(2)$$

$$f_u(3) = -F_U(3)$$

$$f_v(3) = -F_V(3)$$

4.3. Виртуальная интерпретация теоретических расчетов напряжений в материале

На основе полученных выражений был выполнен расчет развертки для выпукло-вогнутой трехмерной формы, приведенной на рис.4.2, с помощью C++ плагин-модуля в программе MayaAutodesk.

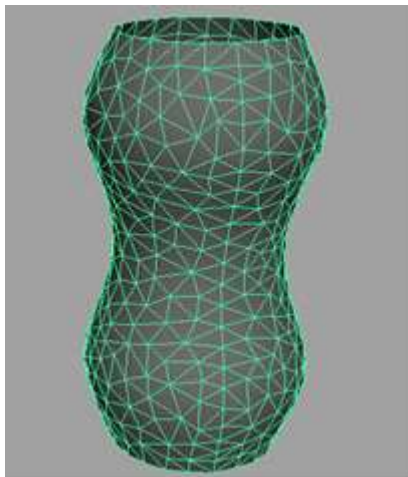


Рисунок 4.2 - Трехмерная полигональная форма

Расчет положений вершин развертки проводился итеративным способом. Вычисляя на каждом шаге итераций сумму сил f_i (20), действующую на i вершину развертки со стороны всех присоединенных к ней граней и сдвигая вершину в направлении вектора f_i на расстояние Δp_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 $\|f_{cp}\|$:

$$\|f_{cp}\| = \frac{\sqrt{\sum (f_i)^2}}{n} < \delta \quad (4.21)$$

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

Вид полученной развертки для материала с характеристиками (4.10-4.14) показан на рис.4.3,а,б. На верхней части рисунка цветом отображена деформация сдвига ε_{uv} , на нижней - деформация поперечного растяжения ε_{uu} . Шкалы отображения деформаций показаны на рис.4.4 и рис.4.5. Форма развертки и распределение деформаций сдвига и растяжения по поверхности материала зависит от соотношения сил упругости и сдвига. Для изучения зависимости были построены развертки с увеличенным и уменьшенным по сравнению с (4.14) коэффициентом сдвига G . Расчетные зависимости для вычисления напряжений сдвига σ_{uv} для них имеют вид:

$$\sigma_{uv} \text{ (Н/м)} = 150 \cdot \varepsilon_{uv} \quad (4.22)$$

$$\sigma_{uv} \text{ (Н/см)} = 0,0017 \cdot \varepsilon_{uv} \quad (4.23)$$

Для исследуемого материала развертки с увеличенным и уменьшенным коэффициентом сдвига (рис.4.3,в,г и рис.4.3,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, поскольку ее линия границы должна совместиться с геодезической линией меридиана трехмерной полигональной поверхности, для чего ей нужно «распрявиться» за счет деформаций сдвига материала, напряжения растяжения (нижняя часть рисунков) будут преобладать в развертке 2 – для совмещения границ материал деформируется без значительного изменения углов, а геодезические линии меридианов остаются на развертке почти прямыми.

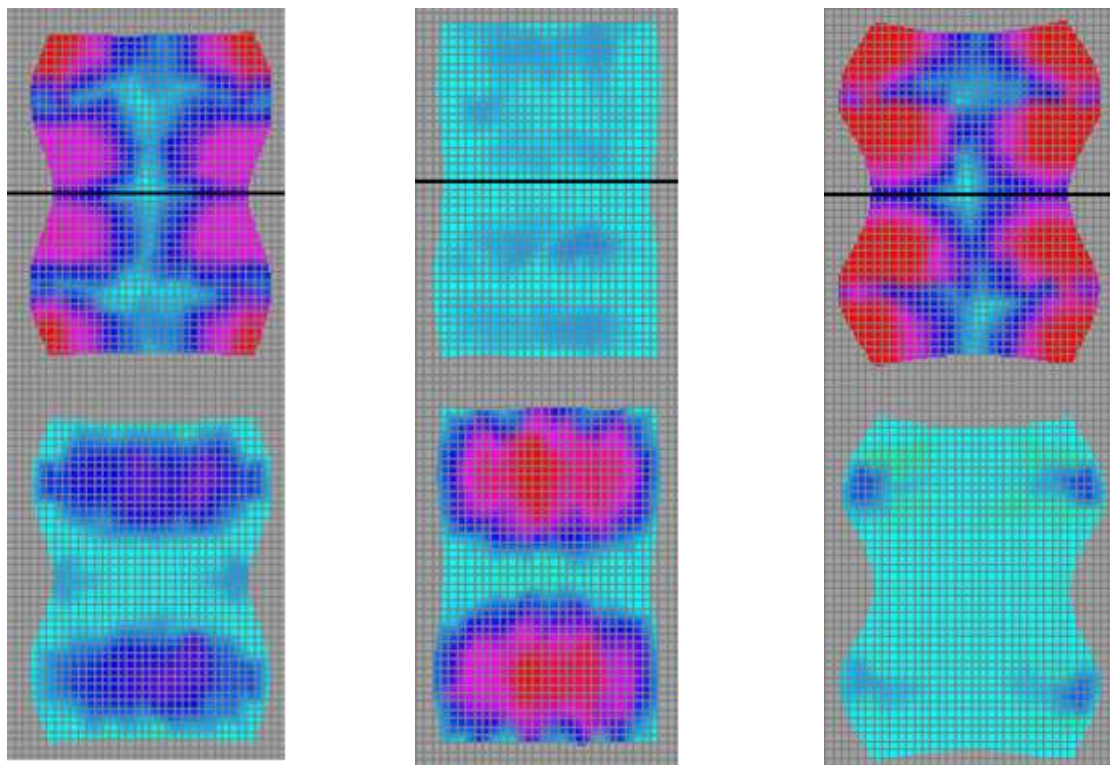
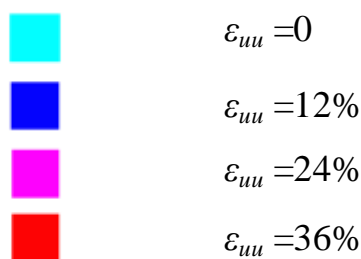
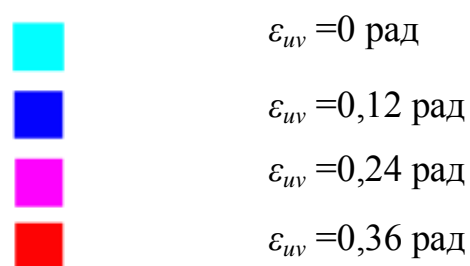
*a, б**в, г**д, е*

Рисунок 4.3. Развертка поверхности выпукло-вогнутой формы

- a*(сверху) - развертка половинки трехмерной полигональной формы, полученная для характеристик материала (4.10-4.14), цветом обозначена деформация сдвига ε_{uv} (2)
б(снизу): то-же, цветом обозначена деформация поперечного растяжения ε_{uu} (1)
в(сверху) - развертка половинки трехмерной полигональной формы, полученная для характеристик материала (4.10-4.13, 4.21), цветом обозначена деформация сдвига ε_{uv} (2)
г(снизу): то-же, цветом обозначена деформация поперечного растяжения ε_{uu} (1)
д(сверху) - развертка половинки трехмерной полигональной формы, полученная для характеристик материала (4.10-4.13, 4.22), цветом обозначена деформация сдвига ε_{uv} (2)
е(снизу): то-же, цветом обозначена деформация поперечного растяжения ε_{uu} (1).

Рис.4.4 - Шкала деформаций ε_{uu} Рис.4.5 - Шкала деформаций ε_{uv}

Границы допустимых значений деформаций сдвига, при которых не возникает напряженных складок и обеспечивается хороший внешний вид изделия из трикотажных полотен были изучены и теоретически обоснованы в

работе [80]. Поэтому при построении разверток для трикотажного полотна можно воспользоваться проведенными расчетами и спрогнозировать появление напряженных складок на поверхности материала. Напряженные складки материала, при заданном относительном удлинении диагонали сетки ε_d , возникнут при углах перекоса $\varphi_{кр} < (90 - \beta_0) - r^* \varepsilon_d$. Для трикотажного полотна I группы усредненные значения: $\beta_0 = 0,52$ град, $r = 95,4$; II группы: $\beta_0 = 1,02$ град, $r = 82,0$ [80].

4.4. Прогнозирование компрессионного давления

Как видно из характеристик исследуемого материала (рис.2.2 и 2.3), напряжение растяжения значительно превышает напряжение сдвига, поэтому увеличение доли энергии растяжения в оболочке будет увеличивать давление на участки фигуры. Увеличение энергии сдвиговых деформаций приведет к возникновению морщин и складок материала.

Для построенных разверток из материала с заданными характеристиками (4.10-4.14) расчет давления под ним был сделан по формуле [70]

$$P_i = F_i / S_i, \quad (4.24)$$

где F_i – проекция действующих сил упругой деформации растяжения в узле сетки на нормаль к поверхности, S_i площадь ячейки Вороного для i точки, рис.4.6,б

$$A_{Voronoi} = \frac{1}{8} \sum_{j \in N(i)} (\cot \alpha_{ij} + \cot \beta_{ij}) \|x_i - x_j\|^2 \quad (4.25)$$

где α_{ij} и β_{ij} – углы оппозитные для ребра, соединяющего точки i и j ; x_i и x_j – векторы координат точек i и j . Суммирование проводится по всем точкам j , присоединенным к точке i , рис. 4.6, а

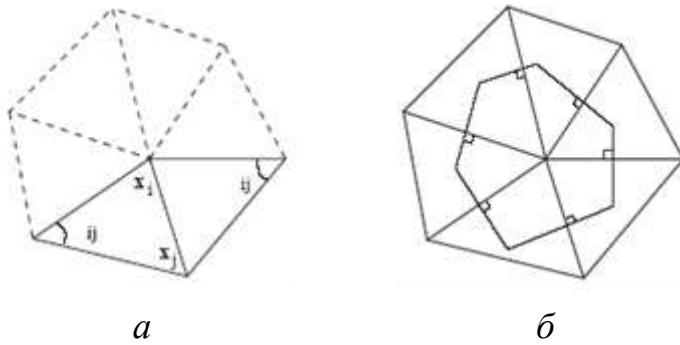


Рисунок 4.6 - Участок полигональной сетки, ограничивающий i -точку (а) и вид ячейки Вороного, соответствующего i точке, для расчета её площади и возникающего в ней давления (б)

Рассчитанные давления под тремя смоделированными оболочками и масштаб цветовых шкал давления показаны на рис.4.7, а-г.

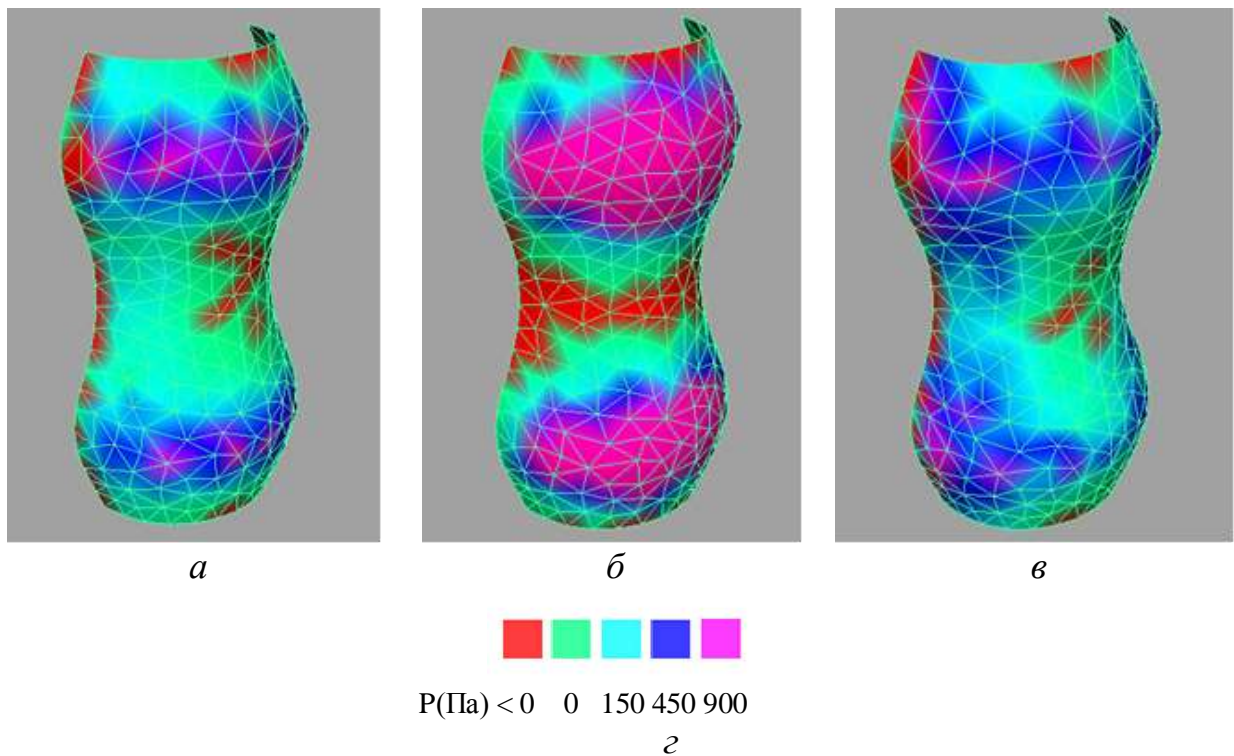


Рисунок 4.7 - Диаграммы распределения компрессионного давления:
 а - развертка показанная на рис.4.3 а,б;
 б – развертка показанная на рис.4.3 в,г;
 в – развертка показанная на рис.4.3 д,е;
 г - масштаб цветовой шкалы

Выводы по главе 4

1. Предложен способ расчета разверток плотнооблегающих текстильных оболочек, представленных в виде триангулированной полигональной сетки. Использованные для расчетов характеристики моделируемого материала

были получены на специализированном оборудовании KES-FB-1, предназначенном для измерения физических свойств текстильных материалов.

2. Путем виртуального проектирования показана возможность визуализации и детального прогнозирования изменений происходящих в текстильном материале с учетом его анизотропных свойств.

Глава 5. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМПРЕССИОННОЙ ОДЕЖДЫ

Результаты этой главы представлены в тезисах доклада [88].

5.1. Алгоритм метода проектирования

Новый метод проектирования компрессионной одежды с виртуальным моделированием деформации фигуры и одежды разработан с использованием зависимостей, полученных в предыдущих главах. Исходные антропометрические данные о сканированных и оцифрованных фигурах были представлены трехмерными сканами в виде файлов F1.obj, F2.obj, F3.obj, F7.obj.

Для расчета и построения разверток деталей компрессионной одежды использованы:

-зависимость между напряжением, возникающим внутри трикотажного материала и его деформацией $\sigma(\varepsilon)$ (глава 2);

-зависимость между давлением на мягкие ткани и напряжением внутри трикотажного материала $P(\sigma)$ (глава 3);

-способ развертывания полигональной сетки на плоскость, позволяющий рассчитать и визуализировать напряжения, возникающие в материале, и давление, оказываемое на поверхность фигуры (глава 4).

Схема реализации разработанного метода показана на рис.5.1. Способ задания исходных данных будет зависеть от объекта проектирования - типовой фигуры (типовое проектирование) или индивидуальной фигуры (адресное проектирование). В первом случае необходимо использовать электронные базы данных о типовых фигурах («аватаров»), значения комфортного давления и показатели физико-механических свойств поверхности участков тела, которые, например, приведены в главе 1. Во втором случае исходными данными являются результаты сканирования и оцифровывания индивидуальной фигуры в виде полигональной сетки, представленной файлом *.obj.

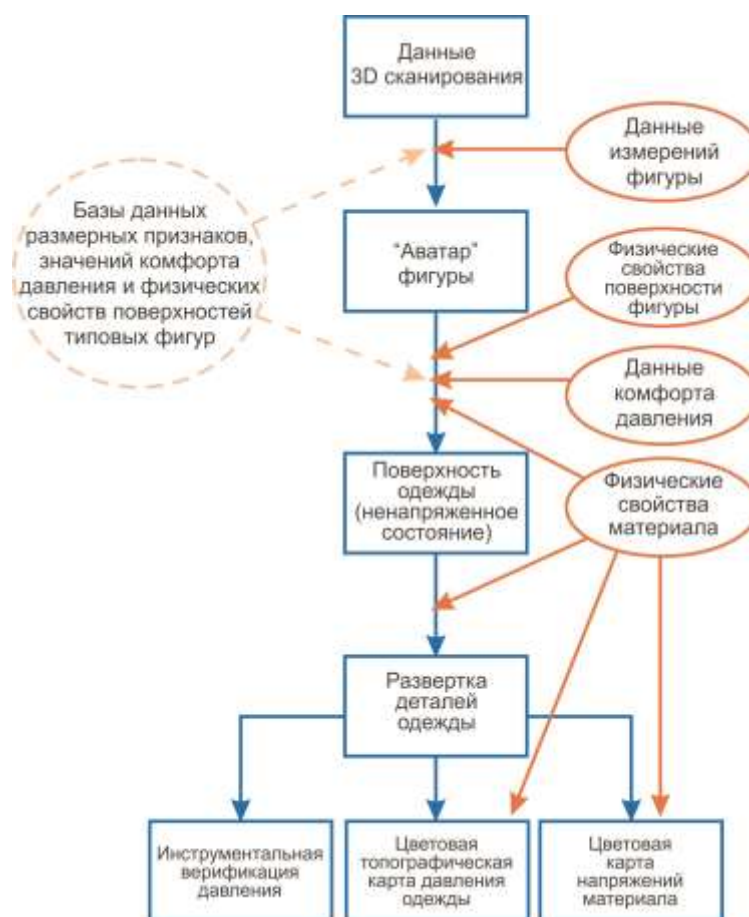


Рисунок 5.1 - Схема процесса проектирования компрессионной одежды по новому методу

Разработанный метод проектирования основан на согласовании размерных признаков фигуры и показателей свойств текстильной оболочки, и включает следующую последовательность действий.

1. Выбор функций проектируемой одежды (см. табл.1.4).
2. Задание давления на участки поверхности фигуры.
3. Определение компрессионной группы трикотажного материала согласно табл. 3.4.
4. Определение функции $P_i(\sigma)$ давления материала на каждый выбранный участок поверхности фигуры.
 - 4.1. Для типового проектирования можно использовать данные разд.1.1
 - 4.2. Для конкретной фигуры измеряют максимально-допустимое давление $P_{i\max}$, которое может перенести потребитель, и соответствующую ему деформацию $\varepsilon_{i\max}$ полосы материала шириной 10 см, замкнутой вокруг

тела. Затем по установленной зависимости $\sigma(\varepsilon)$ строят функцию $P_i(\sigma)$ в виде $P_i(\sigma)=k_i \cdot P_j(\sigma)$, где k_i – коэффициент, определяющий кривизну поверхности i -го участка поверхности фигуры, $P_j(\sigma)$ – зависимость давления на участок цилиндрической силиконовой поверхности от усилия растяжения материала из известной компрессионной группы j ($j=1, \dots, 4$).

5. Определение желаемых величин изменений проекционных размеров фигуры δ_{iC} , $\delta_{i\Phi}$ на заданных участках в сагиттальной и фронтальной проекциях.

6. Определение относительных деформаций растяжения материала ε_i , необходимых для создания заданного уровня давления на основе функций $P_i(\sigma)$ и $\sigma(\varepsilon)$.

7. Определение относительной деформации сжатия ε_{\perp} , необходимой для компенсации уменьшения поперечных размеров детали одежды при одноосном растяжении.

8. Создание виртуальной трехмерной текстильной оболочки, повторяющей «аватар» фигуры.

9. Построение разверток деталей одежды. На первом этапе оболочку уменьшают на величины δ_{iC} , $\delta_{i\Phi}$, ε_i в горизонтальном направлении, увеличивают на ε_{\perp} в вертикальном направлении и переводят ее в ненапряженное состояние (как это происходит при снятии с тела одежды из эластичного материала). На втором этапе способом, разработанным в главе 4, рассчитывают развертки деталей.

10. Верификация заданных значений давления одежды на тело с помощью цветовой карты в программе трехмерной графики и инструментальным способом с помощью датчика давления.

5.2. Экспериментальная проверка

Проверка величин проектируемого давления одежды на поверхность выполнена для реальных фигур $\Phi 1$, $\Phi 2$, $\Phi 3$, $\Phi 7$, представленных в главе 3, и

их виртуальных «аватаров». Для проверки было выбрано компрессионное изделие, покрывающее подкорпусную часть торса женских фигур между уровнями обхвата талии O_T и колена. Оно предназначено для активного отдыха и занятий физкультурой, тренировочной деятельностью. Корректирующая функция такого вида изделий помогает испытывать удовлетворение своим внешним видом и стимулирует поддержание хорошей физической формы. Используемый материал должен не стеснять движений и обеспечивать эстетичный внешний вид и коррекцию в местах жировых отложений.

5.2.1. Проектирование фрагмента «аватара» фигуры

Для задания исходных антропометрических данных использовали трехмерные имиджи фигур, полученные с помощью бодисканирования. Поскольку для проверки разработанного метода планируется использовать только подкорпусную часть фигуры, то ниже будет рассмотрен алгоритм получения виртуальной модели не всей фигуры, а только той ее части, которую будет покрывать компрессионное изделие.

Изображения исходных трехмерных сканов фигур показаны на рис. 5.2.

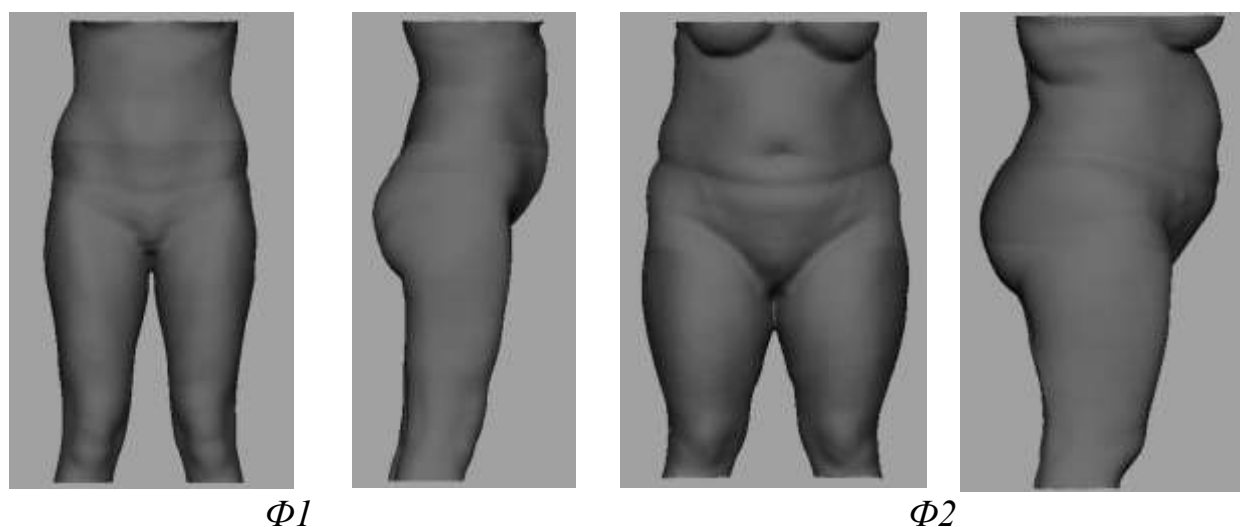


Рисунок 5.2 - Фрагменты сканов реальных фигур $\Phi 1$, $\Phi 2$, $\Phi 3$, $\Phi 7$

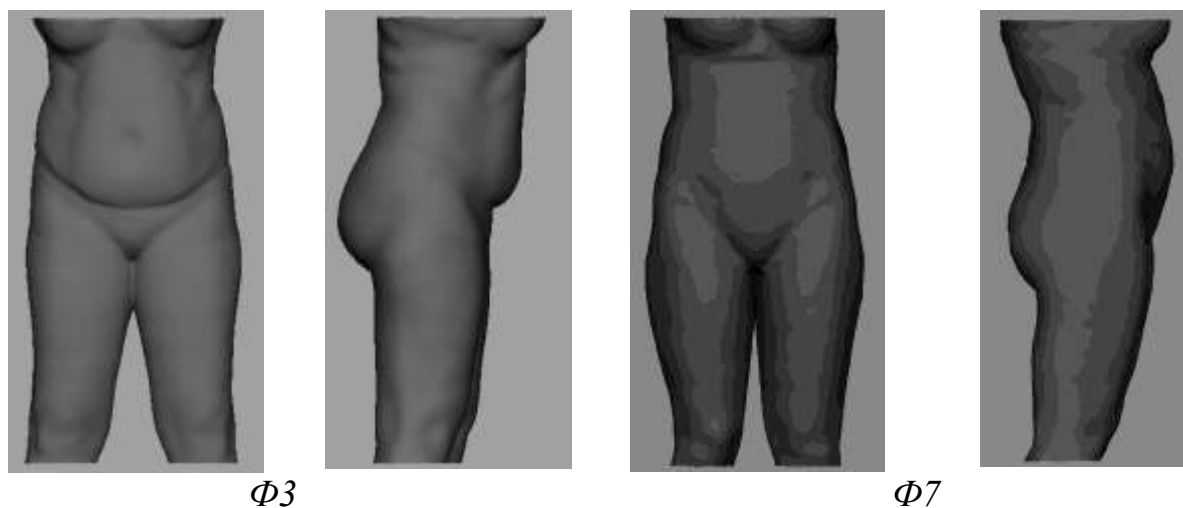


Рисунок 5.2 - (окончание)

Исходная поверхность скана фигуры состоит из более чем миллиона точек и является сложным объектом для задания на его основе линий членения, построения деталей одежды и их разверток. Для упрощения задачи и сокращения числа точек полигональной поверхности сначала строили на ее основе горизонтальные сечения в виде сплайнов с шагом не более 2 см выше отбхвата бедра и 4 см - ниже [8] (рис.5.3, б). Для построения сечений использовали программу трехмерной графики Maya Autodesk.

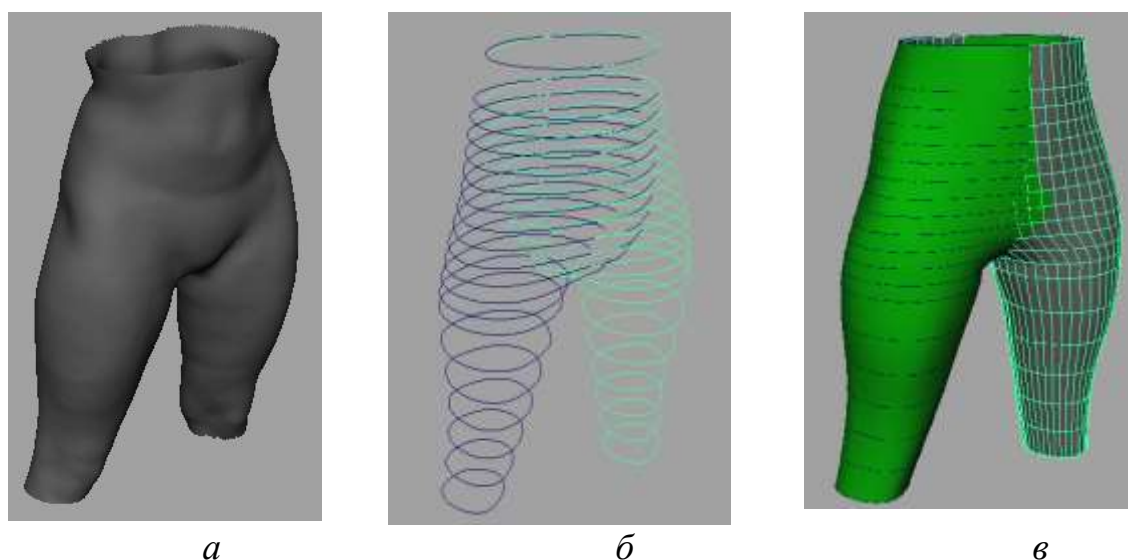


Рисунок 5.3 - Алгоритм обработки исходных антропометрических данных реальной фигуры после сканирования для создания участка «аватара» фигуры:
а - полигональная поверхность, полученная в результате трехмерного сканирования фигуры,
б - сечения полигональной поверхности, заданные кубическими сплайнами,
в - трехмерная NURBS поверхность, построенная на основе сплайнов

На основе полученного каркаса линий строили одинаковые правую и левую NURBS сплайн поверхности «аватара» с сохранением информации о размерных признаках фигуры (рис.5.3, в).

5.2.2. Задание давления и выбор трикотажного материала

Перед расчетом конструкции компрессионного изделия необходимо задать величины компрессионного давления и выбрать материал с соответствующими показателями свойств. Возможные значения давления и соответствующие им деформации мягких тканей фигуры и трикотажного материала представлены в табл. 5.1.

Для эксперимента был выбран материал *T9*, характеристики которого поперек полотна соответствуют 1 компрессионной группе, а вдоль – 2 группе.

Значения давления компрессионного изделия были согласованы с рекомендуемыми значениями, применяемыми для спортивной компрессионной одежды (табл 1.4), и соответствовали легкой компрессии класса *A* по медицинской терминологии. На рис.5.4 показаны точки задания и желаемые значения давления компрессионной одежды. Точки расположены на фронтальной проекции на уровнях шести обхватах как наиболее удаленные от средней саггитальной плоскости.

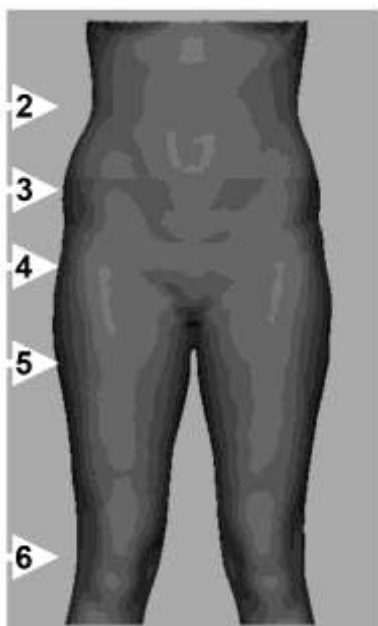


Рисунок 5.4 - Точки на фигуре $\Phi 1$ для проектирования давления под компрессионным изделием: 2 – 1150 Па, 3 – 2000 Па, 4 – 1530 Па, 5 – 1065 Па, 6 – 1065 Па.

Значения давлений в точках **6** и **5** (на O_k и $O_{бед}$) было задано 1,065 кПа.

Давление на область выступающей точки живота было выбрано по верхней границе для компрессионной группы 2 – 2 кПа, на область O_6 – по среднему значению для давлений на обхватах бедра $O_{бед}$ и выступающей точки живота, и составило: $(1,07+2)/2=1,53$ кПа, что также соответствует компрессионной группе 2 (табл. 3.4).

Значения давления в точке **2** (на O_T) было выбрано по верхним границам допустимых значений согласно данным проведенных измерений для каждой из фигур (табл. 3.2).

Необходимые значения уменьшения проекционных размеров обхватов фигур соответствующих точкам **2 - 6** δ_{iC} , $\delta_{i\Phi}$ были рассчитаны исходя из их линейной зависимости от давления на тело по табл. 3.2. Значения δ_{iC} , $\delta_{i\Phi}$ приведены в табл.5.1.

Для задания относительных удлинений трикотажного материала $T9$ были рассчитаны возникающие в нем напряжения. Расчет зависимостей $P_i(\sigma)$ для каждого участка фигур выполнен на основе данных табл. 3.2 и рис.3.11, а,б.

Например, рассчитаем $P_i(\sigma)$ для фигуры $\Phi3$ при значении $i=3$ (уровень $T_{вж}$). Для расчета давления используем зависимость на рис.3.11, а как для мягких тканей, опирающихся на тазобедренный сустав. При усилии растяжения материала $\sigma=140$ Н/м в точке измерения было зафиксировано давление $P_3=3365$ Па, при аналогичном усилии растяжения на силиконовый цилиндр возникало давление $P_{cl} = 102,81 \sigma^{0,72}=3608$ Па, Коэффициент пропорциональности, связывающий теоретическое и практическое давления равен $P_3/P_{cl} =0,93$. Поэтому в этой области фигуры теоретическому давлению $P_3=2000$ Па будет соответствовать давление на силиконовый цилиндр $P_{cl}=2144$ Па.

Значение σ найдем с помощью функции обратной к $P_{cl}(\sigma)$: $\sigma=(P_{cl}/102,81)^{1/0,72} = 0,0016 P_{cl}^{1,38} = 68$ Н/м. По графику зависимости на рис.П1.9 определим, что этому усилию соответствует относительное

удлинение 43,0 % или предел заужения 30 %.

Все значения проектируемого давления, угловые коэффициенты $Y_k = P_i/P_{c1}$ (для точек **3,4,6**) и $Y_k = P_i/P_{c2}$ (для точек **2,5**) и рассчитанные пределы заужений для фигур $\Phi 1, \Phi 2, \Phi 3, \Phi 7$ приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1 - Теоретические значения параметров для проектируемого компрессионного изделия

Параметр	Номер точки	Фигура			
		$\Phi 1$	$\Phi 2$	$\Phi 3$	$\Phi 7$
<i>l</i>	2	3	4	5	6
Проектируемая величина давления $P_{\text{теор}}$	2	1150	1450	1370	1365
	3	2000	2000	2000	2000
	4	1530	1530	1530	1530
	5	1065	1065	1065	1065
	6	1065	1065	1065	1065
Угловой коэффициент, Y_k , рассчитанный на основе измерений давления контрольной полосой и графиков (рис.3.80,а,б)	2	0,75	0,94	0,84	0,89
	3	1,07	0,87	0,93	0,95
	4	0,82	0,92	0,94	0,97
	5	1,09	0,97	0,8	1,02
	6	1,08	0,77	0,92	0,97
Эквивалент давления на силикон, $P_c = P_{\text{теор}}/Y_k$	2	1533	1543	1631	1534
	3	1869	2299	2151	2105
	4	1866	1663	1628	1577
	5	977	1098	1331	1044
	6	986	1383	1158	1098
Расчет величины усилия растяжения: $\sigma = 0,0016 P_{c1}^{1,38}$ или $\sigma = 0,009 * 10^{-6} P_{c2}^{3,03}$	2	40	41	49	40
	3	52	70	64	62
	4	52	45	43	41
	5	10	15	26	13
	6	22	35	27	25
Значение относительного удлинения ε при усилнии $\sigma_{\text{теор}}$ (по кривым растяжимости)	2	23	24	27	23
	3	29	40	37	35
	4	29	25	24	24
	5	6	8	13	7
	6	11	20	15	13
Предел заужения = $\varepsilon/(1 + \varepsilon)$	2	19	19	21	19
	3	22	29	27	26
	4	22	20	19	19
	5	6	7	12	7
	6	10	17	13	12

Окончание табл. 5.1					
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
Уменьшение проекционных размеров фигур $\delta_{iФ} / \delta_{iС}$	2	4/-2,5	4/0	1,5/0	2,5/0
	3	3,1/2,6	1,7/3,3	2,7/5,2	1,9/2,9
	4	2/2	0/1	3/1	1,5/1
	5	4/2	3/1,5	2,5/1,5	2/1
	6	0/0	0/0	0/0	0/0
Среднее значение ε , % для каждой из фигур		21	26	26	22
Поперечное сокращение материала ε_{\perp} , %		4	6	6	4

5.2.3. Проектирование виртуальной оболочки объемной формы одежды и ее разверток

Исходной поверхностью для проектирования оболочки является поверхность «аватара» фигуры, представленная на рис 5.3. На рис. 5.5 показана последовательность проектирования деталей компрессионного изделия.

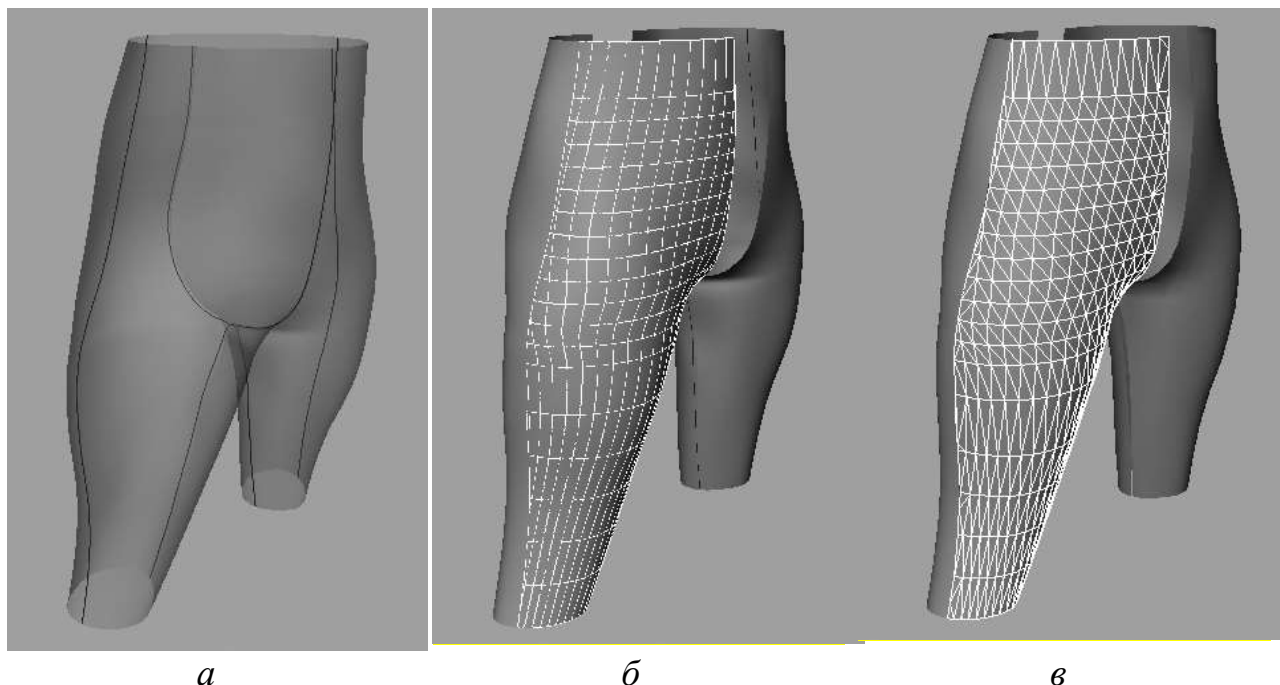


Рисунок 5.5 – Задание деталей компрессионного изделия:
а - задание линий членения на поверхности «аватара»,
б - детали в виде участков NURBS поверхности,
в - детали в виде участков полигональной сети

Линии членения изделия задавали на поверхности аватара (рис.5.5, *а*) в виде NURBS кривых, которые использовали для последующего разбиения поверхности на детали (рис.5.5, *б*). Затем отделяли получившиеся участки и переводили в полигональный вид штатными командами программы Maya Autodesk (рис.5.5, *в*).

Фронтальная и боковая проекции «аватаров» фигур $\Phi 1$, $\Phi 2$, $\Phi 3$, $\Phi 7$, разделенных на детали компрессионного изделия после проведения линии шаговых, боковых и среднего швов, показанных на рис.5.6.

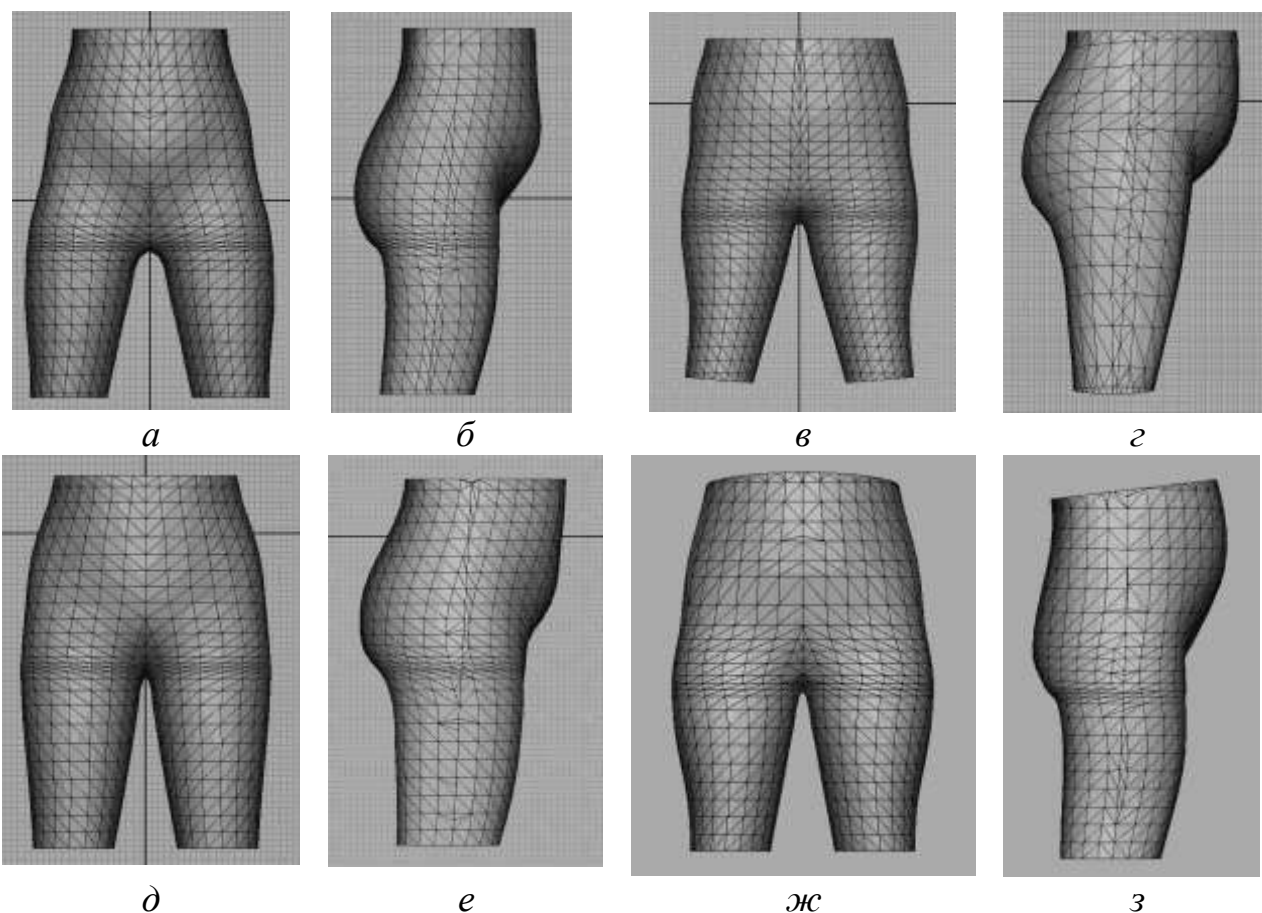


Рисунок 5.6 Текстильные оболочки, повторяющие поверхности «аватаров» фигур:
а, в, д, ж – фронтальные проекции для фигур $\Phi 1$, $\Phi 2$, $\Phi 3$, $\Phi 7$;
б, г, е, з – профильные проекции для фигур $\Phi 1$, $\Phi 2$, $\Phi 3$, $\Phi 7$.

На **первом этапе** построения разверток поверхности деталей были использованы рассчитанные значения деформации поверхности фигуры δ и материала ε (табл.5.1). Для этого на горизонтальных сечениях фигур выбирали центры деформации, относительно которых выполняли

масштабирование полигональной формы (рис.5.7, а).

Поверхность фигуры масштабировали относительно точек, смещенных от центров горизонтальных сечений фигуры:

-на уровнях O_T и $T_{вж}$ смещали назад так, чтобы соотношение расстояний от задней границы сечения к расстоянию от середины профильной проекции составляли $\varepsilon_2/\delta_{2C}$ для O_T и $\varepsilon_3/\delta_{3C}$ для $T_{вж}$ соответственно;

-на уровне O_6 смещали вперед так, чтобы соотношение расстояний от передней границы сечения к расстоянию от середины профильной проекции составляло $\varepsilon_4/\delta_{4C}$ (рис.5.7, а).

В табл.5.2 указаны координаты центров масштабирования.

Таблица 5.2 - Координаты центров масштабирования текстильной оболочки относительно «аватара»

Номер участка	Координаты центра		
	по высоте	на профильной проекции	
		направление	величина смещения
2	линия O_T	назад от центра профильной проекции	$(l_2/2) \cdot \delta_{2C} / (\delta_{2C} + \varepsilon_2)$, l_2 – ширина профильной проекции на уровне линии талии
3	высота $T_{вж}$	назад от центра профильной проекции	$(l_3/2) \cdot \delta_{3C} / (\delta_{3C} + \varepsilon_3)$, l_3 – ширина профильной проекции на уровне $T_{вж}$
4	линия O_6	вперед от центра профильной проекции,	$(l_4/2) \cdot \delta_{4C} / (\delta_{4C} + \varepsilon_4)$, l_4 – ширина профильной проекции на уровне линии обхвата бедер
5	линия $O_{бед}$	на середине профильной проекции	-
6	линия O_k	на середине профильной проекции	-

Масштабирование в горизонтальной плоскости относительно координат центров выполняли на величины: «Предел заужения» + $(\delta_{iФ} + \delta_{iC})/2$ из табл. 5.1. Для этого использовали плагин-модуль SeeJeeCAD2 (от англ. CG – compression garments), созданный в программе MayaAutodesk.

Интерфейс плагин-модуля программы масштабирования показан на рис.5.8. В рабочем окне программы Maya Autodesk задавали «аватар» кнопкой «Set_Body», затем поверхность дублировали, получая, таким образом, исходное состояние для поверхности НСО, задавали ее кнопкой «Set_Cloth». Центры масштабирования (joint), секущие плоскости (plane), необходимые для расчета обхватов и значения их уменьшения в процентах (%), задавали в интерфейсе рис. 5.8 в соответствии с рис. 5.7. После задания объектов и величин масштабирования кнопкой Calculate выполняли программу масштабирования для создания НСО (приведена в Приложение 5).

Для учета сокращения трикотажного материала в поперечном направлении вертикальный размер оболочки уменьшали на величину усредненного значения ϵ_{\perp} согласно данным табл. 5.1.

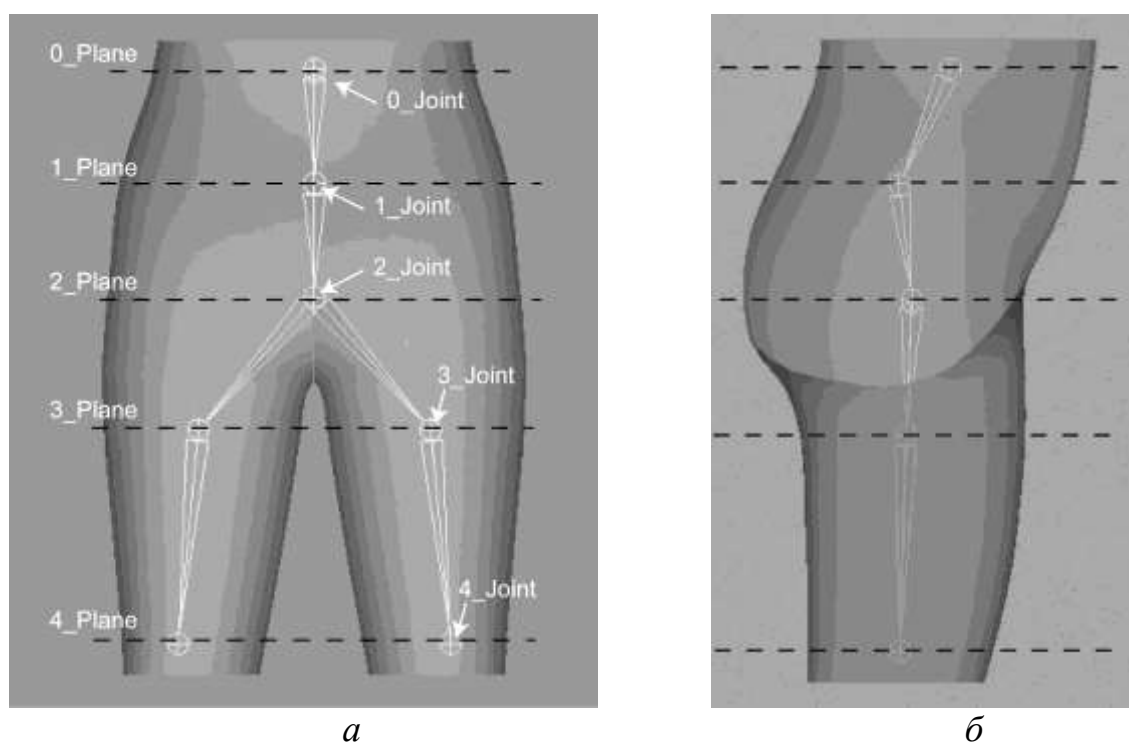


Рисунок 5.7 - Расположение центров масштабирования «аватара» фигуры для получения поверхности НСО: *а* – профильная проекция, *б* – фронтальная проекция

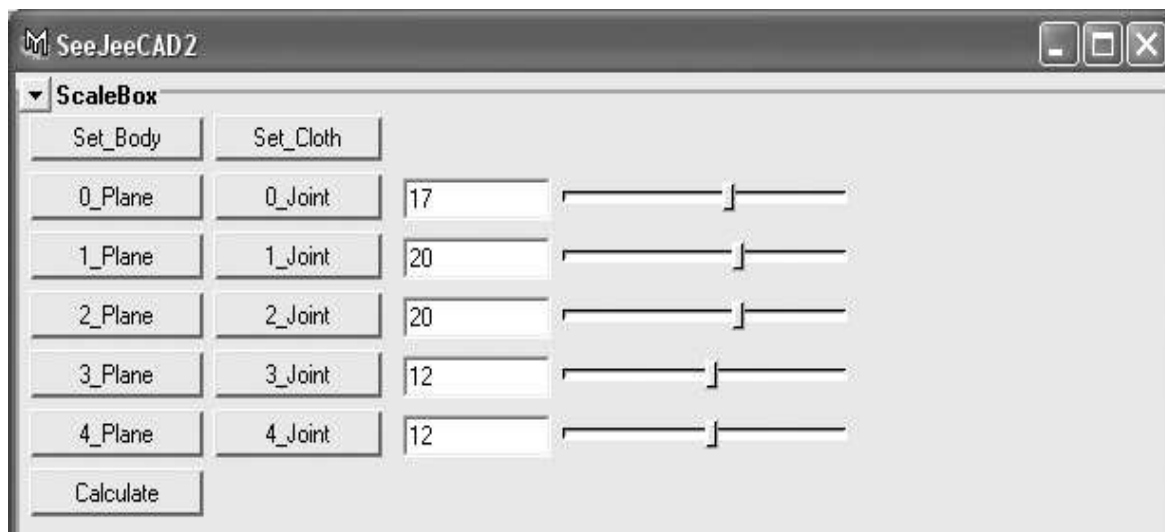


Рисунок 5.8 - Интерфейс плагин модуля «SeeJeeCAD2» для расчета формы НСО. Изображенные значения приведены в качестве примера и соответствуют уменьшению: обхвата талии на 17 %, обхвата через $T_{вж}$ на 20 %, обхвата бедер на 20 %, обхвата бедра на 12%, обхвата колена на 12 %. Нумерация обхватов соответствует рис.5.7.

На рис.5.9 показаны формы поверхностей «аватаров» фигур и полученные из них поверхности НСО.

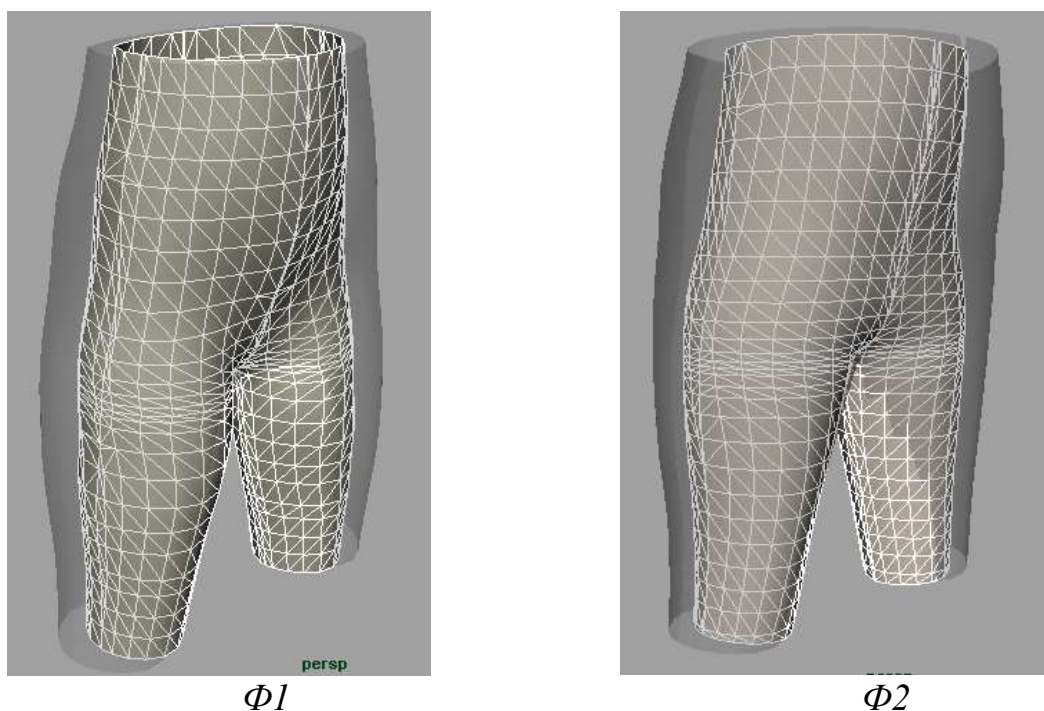


Рисунок 5.9 - Фрагменты поверхности виртуальных «аватаров» (снаружи) и компрессионных изделий (внутри) для разных фигур

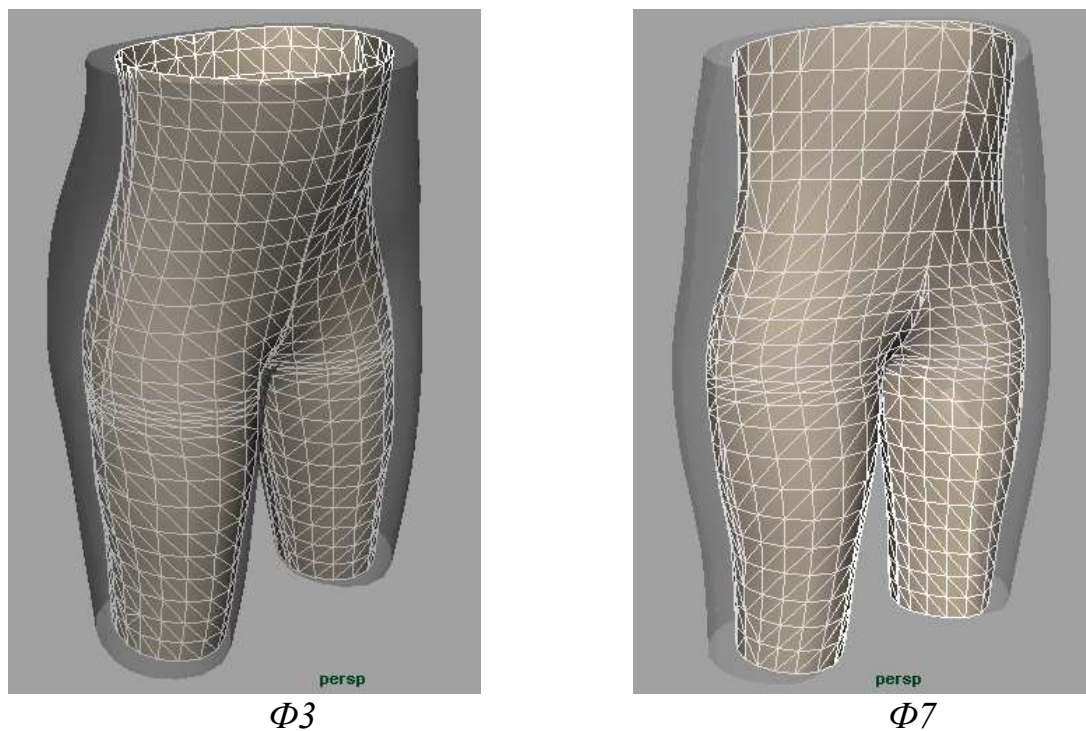


Рисунок 5.9 - (окончание)

На **втором этапе** получали плоские отображения деталей одежды способом, разработанным в главе 4. Изображения разверток совмещали с цветовыми топографическими схемами растяжения трикотажного материала, полученных в программе Maya Autodesk, запускаемых из интерфейса плагин-модуля SeeJeeCAD1 нажатием кнопки Color_X_Stress. На рис.5.10 показаны развертки передней и задней половин компрессионного изделия для фигур $\Phi 1$, $\Phi 2$, $\Phi 3$, $\Phi 7$ совмещенные с цветовыми картами относительного удлинения материала в горизонтальном направлении. Масштаб цветовой шкалы показан на рис. 5.10, б. Цветовые карты были сгенерированы после получения разверток, на основе сравнения их размеров с размерами «аватаров» рис. 5.6.

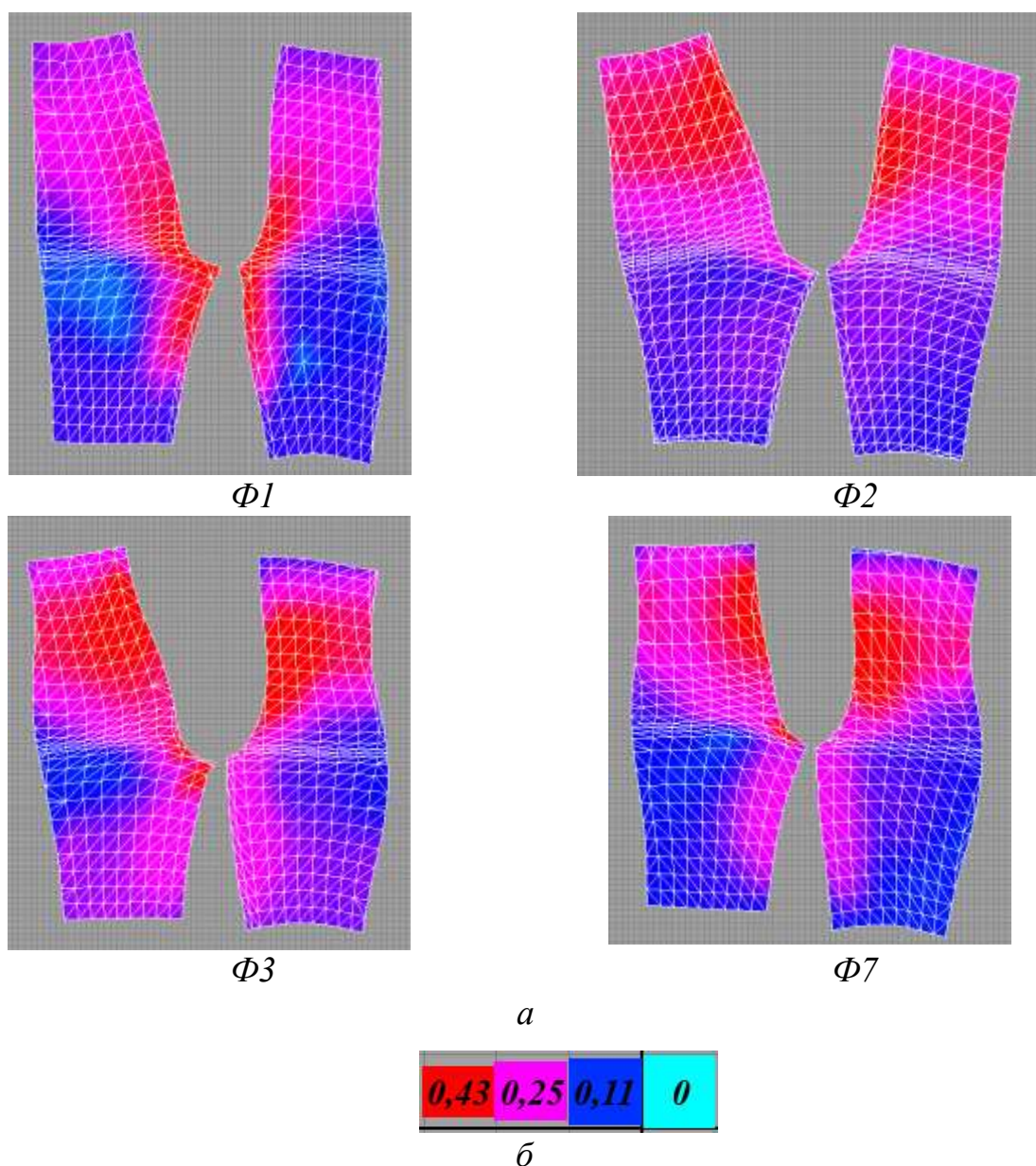


Рисунок 5.10 - Развертки деталей компрессионного изделия с цветовыми схемами относительного удлинения трикотажного материала в горизонтальном направлении (а), масштаб цветовой шкалы - в единицах относительного удлинения (б)

Задание объектов исходной и развертываемой полигональных сеток выполняется в интерфейсе плагин-модуля развертывания и закрашивания SeeJeeCAD1, выполненного в программе Maya Autodesk (рис.5.11). Нажатием на кнопку Calculate программа рассчитывала развертку (Приложение 5).

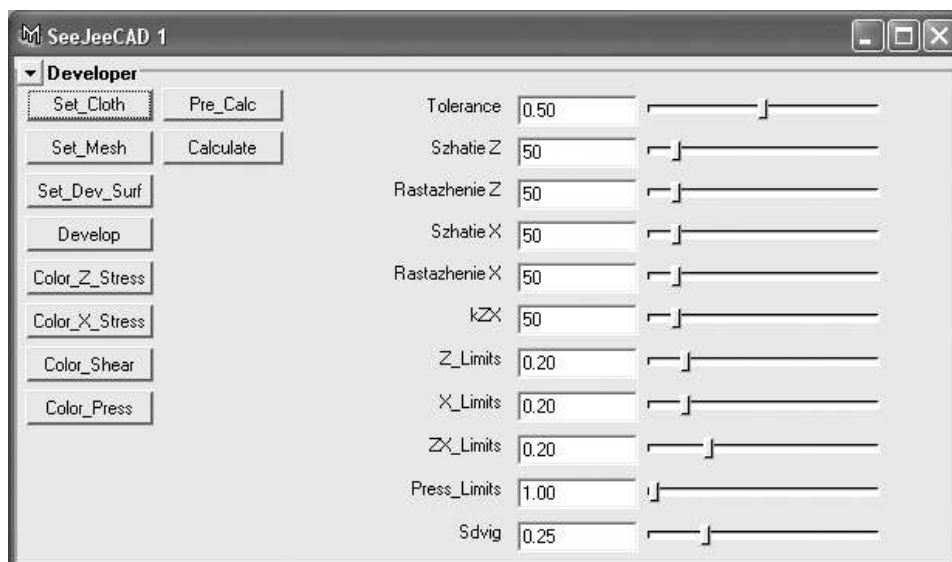
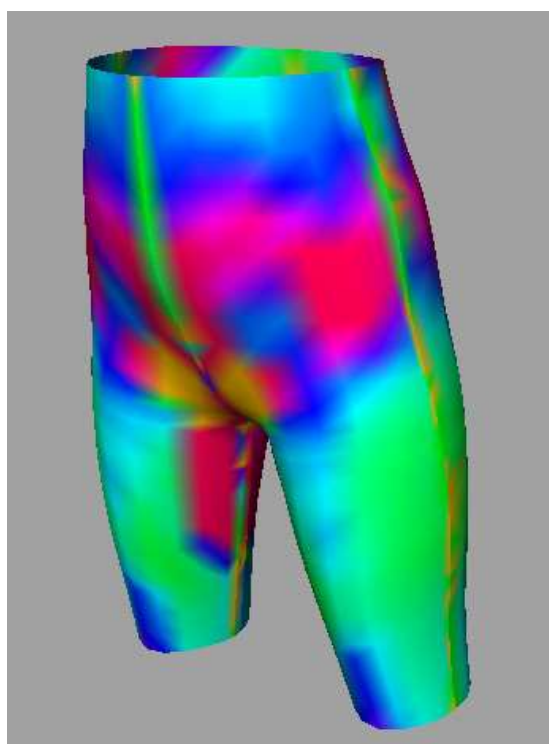
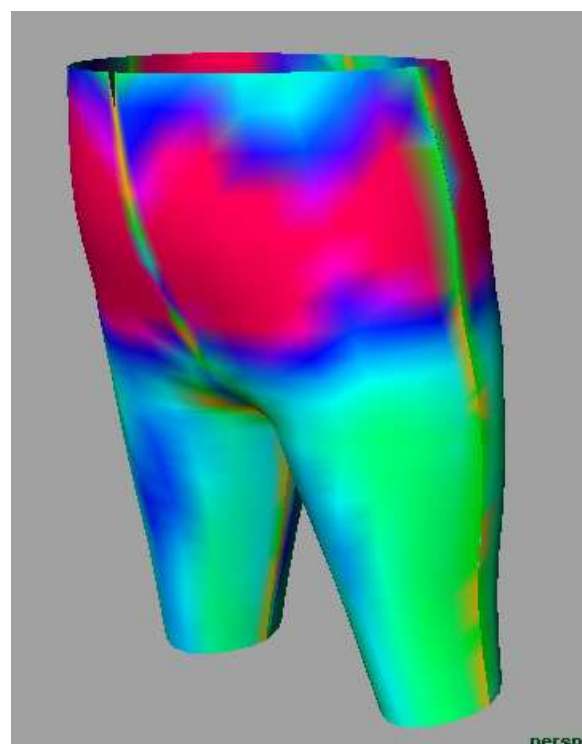


Рисунок 5.11 - Интерфейс плагин-модуля «SeeJeeCAD1» для расчета разверток деталей КО и визуализации напряжений трикотажного материала

На рис.5.12 представлены топографические схемы давления материала на поверхность тела, рассчитанного по формулам из главы 4. Расчет давления и закрашивание полигональной сетки выполняется нажатием кнопки Color_Press плагин модуля SeeJeeCAD1.



$\Phi 1$



$\Phi 2$

Рисунок 5.12 - Топографические схемы распределения давления компрессионного изделия для фигур $\Phi 1$, $\Phi 2$, $\Phi 3$, $\Phi 7$

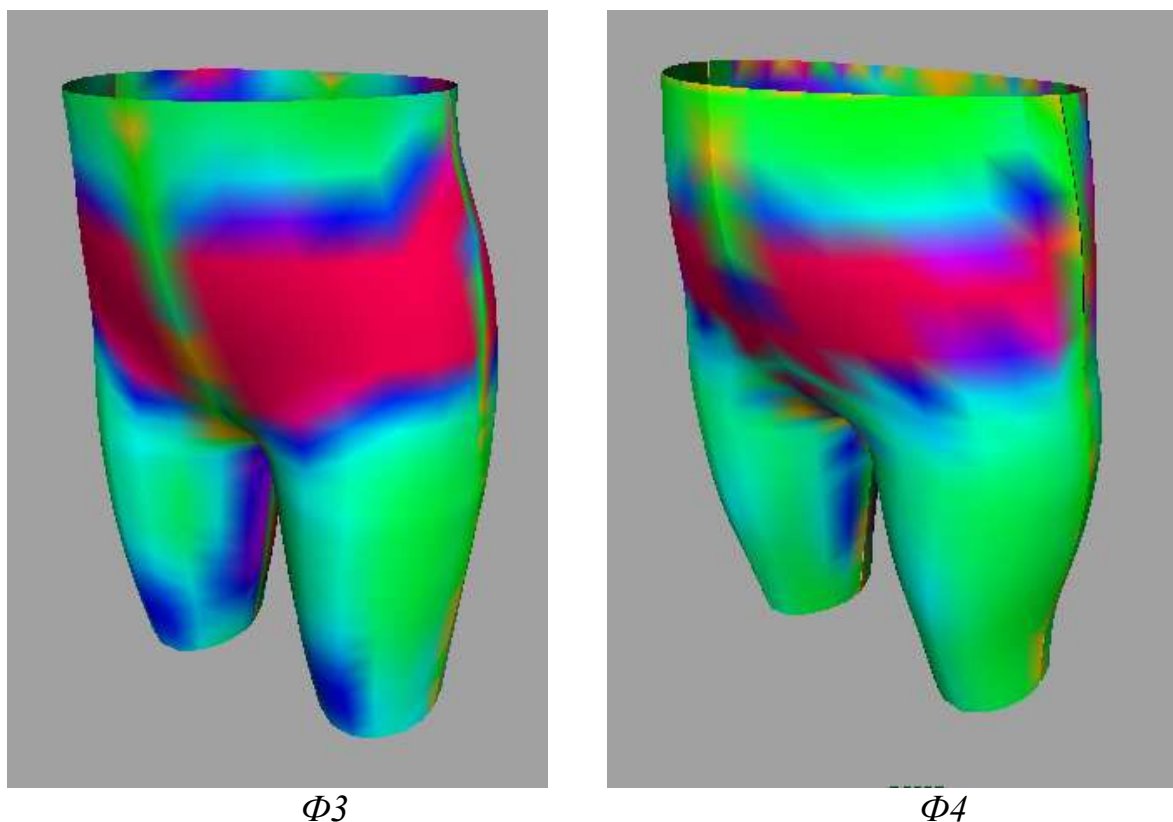


Рисунок 5.12 - (окончание)

Таким образом, были получены плоские развертки деталей компрессионного изделия, цветовые карты деформаций полигональной сетки в горизонтальной плоскости, топографические схемы давления, возникающего под материалом компрессионной одежды.

5.2.4. Построение материальных оболочек одежды

Для раскроя материала полученные развертки (см. рис.5.10) распечатывали в масштабе 1:1 на принтере формата А3. По разверткам (рис.5.10) были изготовлены изделия с использованием специального оборудования по технологии изготовления трикотажного белья [79]. Внешний вид готовых изделий, сконструированных по разработанной методике, показан на рис.5.13.

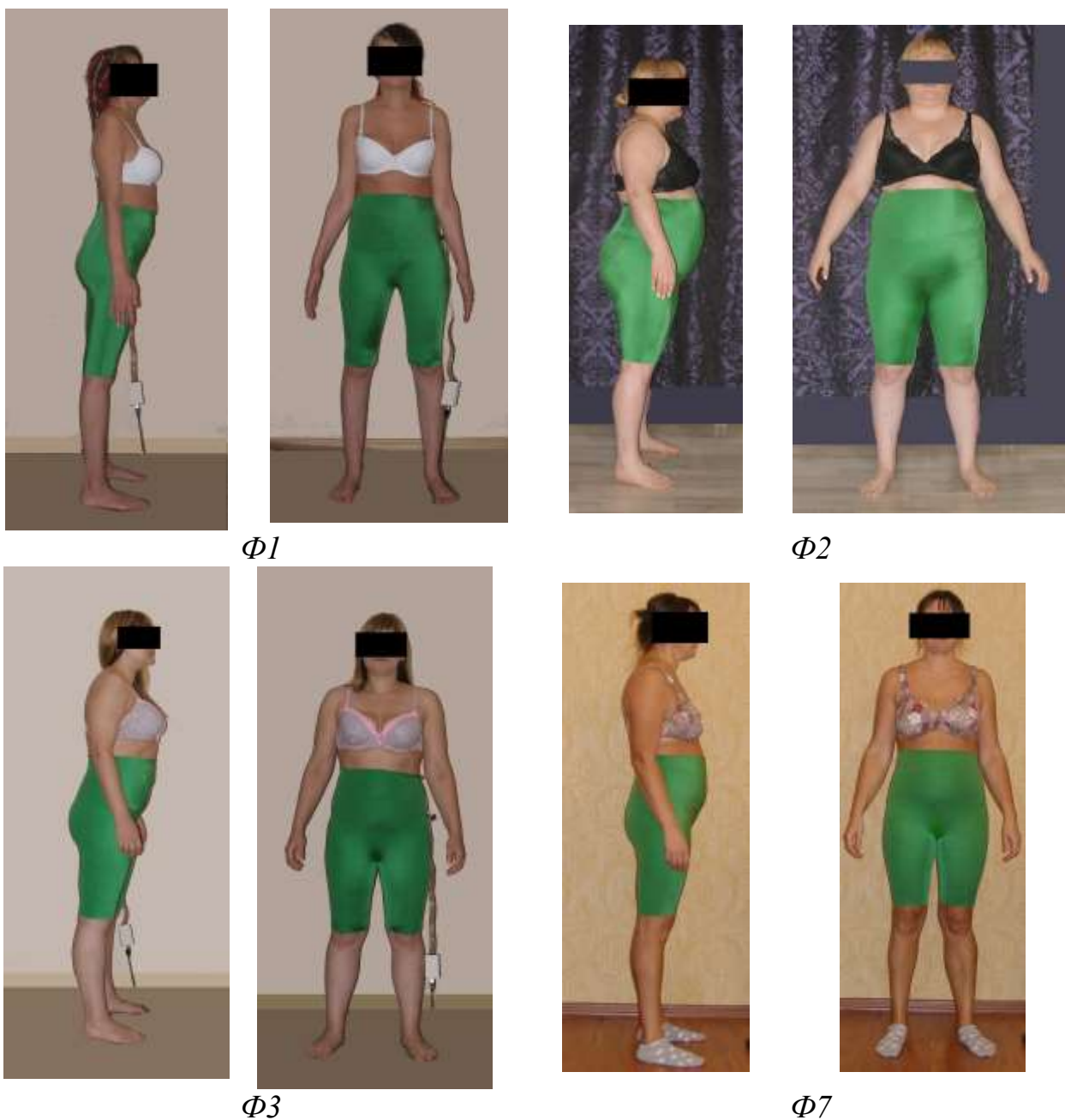


Рисунок 5.13 - Внешний вид компрессионных изделий, спроектированных по разработанному методу

Предварительный экспертный опрос потребителей показал их высокую удовлетворенность качеством компрессионных изделий.

5.2.5. Проектирование компрессионного изделия по известному методу

Для выбранного вида одежды были построены чертежи деталей базовой конструкции шорт по методу «Мюллер и сын». Необходимые для построения размерные признаки фигур были взяты из главы 3, часть 2 «Моделирование брюк» [68].

Отрицательные прибавки к конструктивным участкам базовой конструкции в виде пределов заужения конструктивных участков были рассчитаны согласно [77] для материала второй группы растяжимости и составили 21%. Необходимые для построения исходные данные и схемы чертежей базовых конструкций приведены на рис. 5.14.

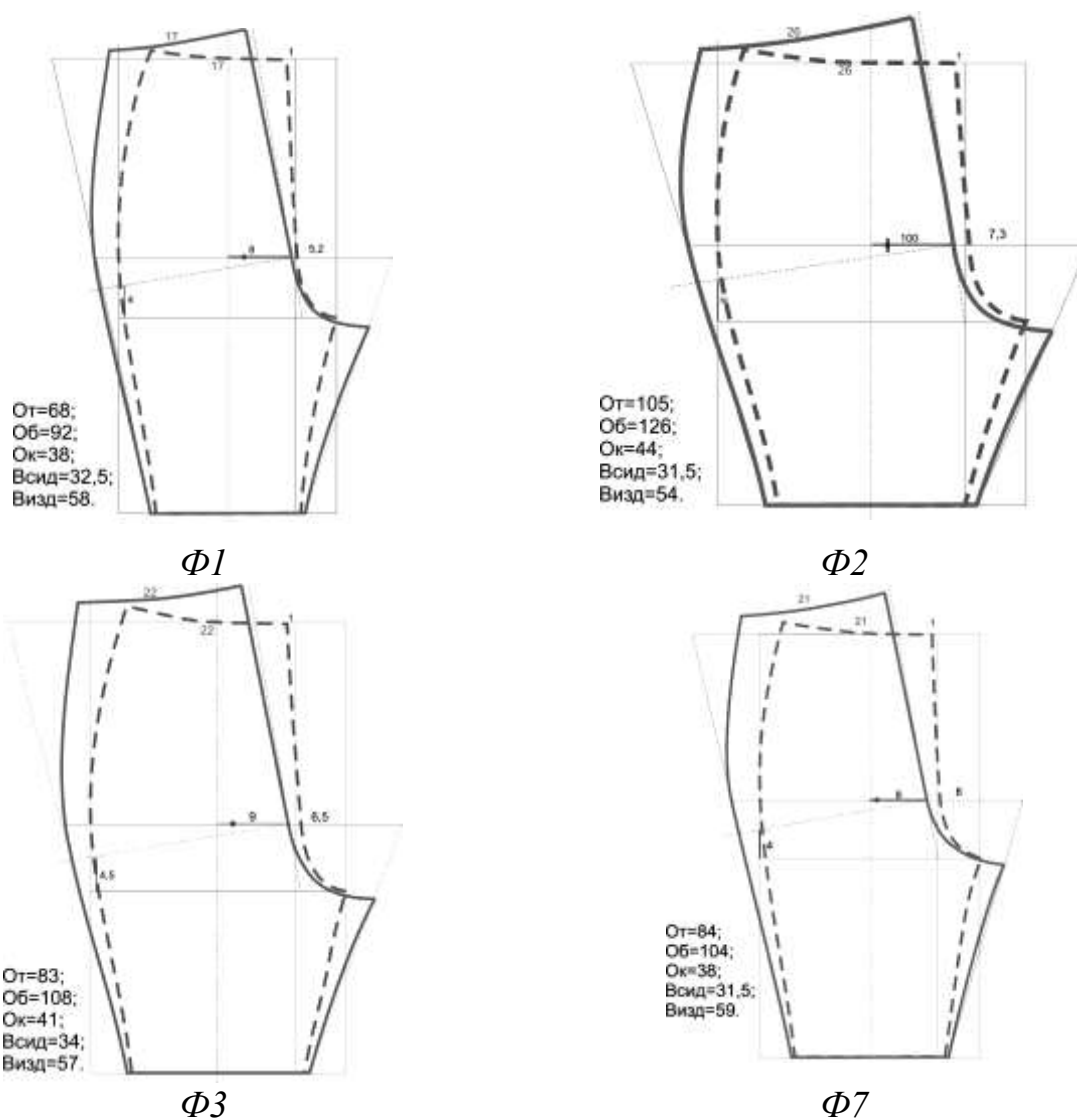


Рисунок 5.14 - Схемы чертежей базовых конструкций, построенные по методу «Мюллер и сын»

Внешний вид изделий, построенных по известной методике, показан на рис. 5.15.

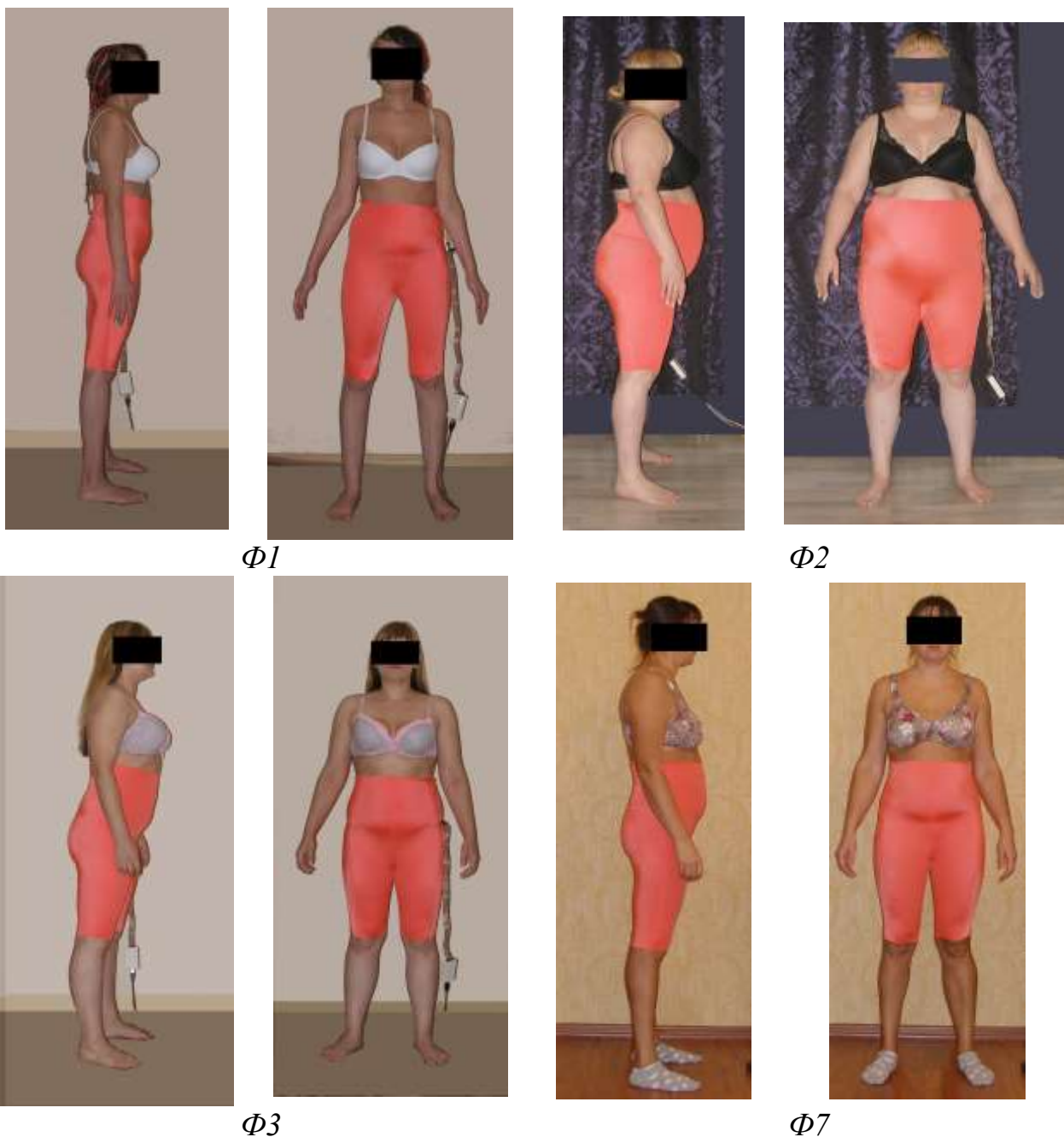


Рисунок 5.15 - Внешний вид компрессионных шорт, спроектированных по методу «Мюллер и сын»

Предварительный экспертный опрос выявил неудовлетворенность некоторых потребителей качеством изделий.

5.2.6. Сравнение плоских разверток, полученных по разным методам

Для сравнения чертежей БК по методу «Мюллер и сын» и новых разверток проводили их совмещение по следующей схеме:

1) находили точку пересечения линии обхвата бедер с биссектрисой угла между боковым и шаговым срезами на участке $O_k - O_{бед}$ на БК и на развертке.

2) из найденной точки проводили луч в направлении середины на уровне O_k , рис. 5.16, а,б

3) совмещали найденные точки и лучи на БК и на развертке, рис. 5.16, в

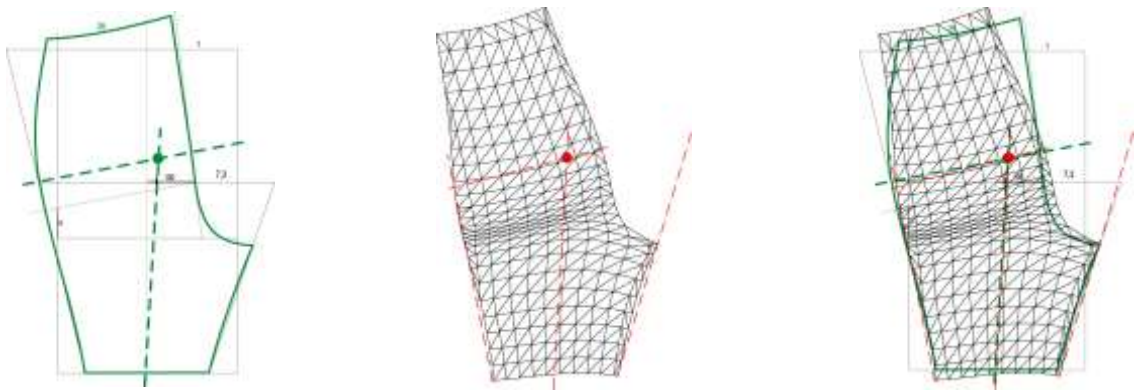


Рисунок 5.16 – Схема совмещения чертежей БК и развертки для задней половины компрессионных изделий для фигуры $\Phi 2$

Совмещенные детали передней и задней частей компрессионных изделий, построенные по разработанному и известному методам, представлены на рис.5.17 для фигур $\Phi 1$, $\Phi 2$, $\Phi 3$, $\Phi 7$.

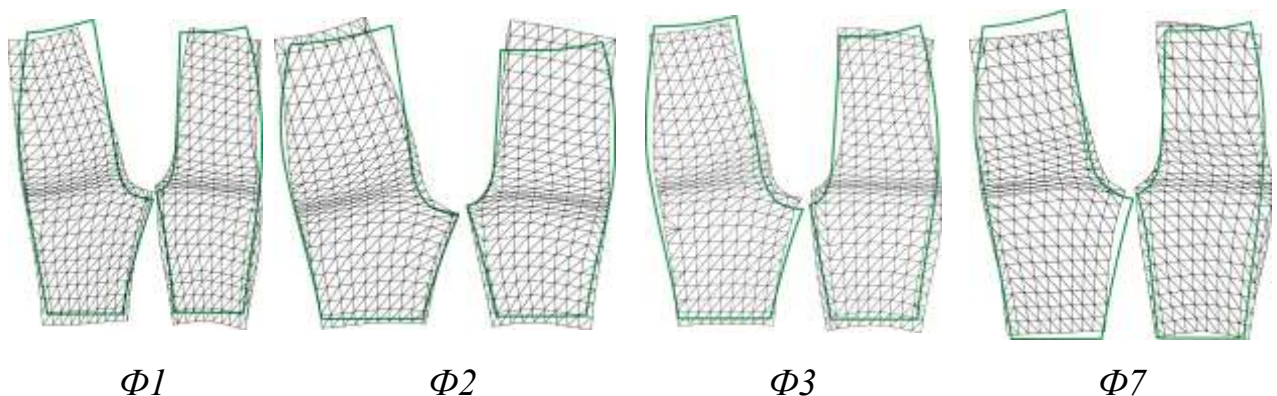


Рисунок 5.17 - Совмещенные схемы чертежей и разверток компрессионных изделий, разработанных для исследованных фигур.

Схемы чертежей деталей по методу «Мюллер и сын» показаны сплошной зеленой линией, а разверток по разработанному методу - триангуляционной сеткой. Из рис.5.17 видно, что имеют место существенные различия между площадями, конфигурациями и длиной контурных линий практически для всех фигур, что свидетельствует о существовании разных подходов к расчету габаритных размеров. Поэтому на основании предварительного анализа чертежей и разверток уже можно предположить о разных компрессионных способностях обоих изделий.

5.2.7. Сравнение компрессионных изделий, полученных по разным методам

Изделия, показанные на рис 5.13 и 5.15 были изготовлены из трикотажного материала $T9$ для четырех фигур. Давление измеряли на тех же уровнях в местах, как на рис.5.4 (обхваты O_T , через $T_{вж}$, $O_б$, $O_{бед}$, $O_к$. Положение датчика на фигуре в момент измерения давления показано на рис. 5.18.



O_T - точка 2 Уровень $T_{вж}$ - точка 3 $O_б$ - точка 4 $O_{бед}$ - точка 5 $O_к$ - точка 6

Рисунок 5.18 - Места измерения давления на фигуре $\Phi 7$

Измеренные давления для обеих групп компрессионных изделий представлены в табл. 5.3. Из табл.5.3 видно, что для всех фигур разработанный способ обеспечивает совпадение теоретических и

фактических результатов при очень незначительном отклонении между ними, в среднем составляющем -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 % ($\Phi 2$).

Вместе с тем оба метода не обеспечили достижения необходимого компрессионного давления в области талии на 29...34 %. Это свидетельствует либо о недостаточной компрессионной способности выбранного материала или влиянии нижележащих мягких тканей. Возможными причинами также могут являться близкое расположения края изделия к месту измерения давления и различие в свойствах мягких тканей этого участка и используемого для калибровок силиконового материала.

Для разработанного способа следует внести следующие коррективы в алгоритм проектирования: проектировать край изделия на расстоянии не менее 5 см от расположения контрольных точек измерения давления. В дальнейшем необходимо исследовать возможность использования для калибровки датчика разных силиконовых материалов.

Также в области обхвата бедра, где использованный набор размерных признаков не учитывает особенностей морфологии, а именно наличие возможных жировых отложений, было отмечено избыточное дискомфортное компрессионное воздействие для обоих способов: отмечено превышение фактического давления над необходимым в области бедер на 22...23,9 %.. На развертках фигур $\Phi 1$, $\Phi 3$, $\Phi 7$ в этой области можно увидеть большой прогиб боковой линии, что соответствует морфологии этого участка фигуры и создает давление, соответствующее целевым значениям. Причиной превышения давления может являться влияние области обхвата, проходящего через выступающую точку живота, давление в которой было задано на верхней границе компрессионной группы.

Таблица 5.3 - Давление компрессионных шорт, изготовленных по разработанному (1) и известному (2) методам, кПа

Точка	Метод	Значения давления для разных фигур												Среднее значение разности, %, для каждой точки
		$\Phi 1$			$\Phi 2$			$\Phi 3$			$\Phi 7$			
		m	ϕ	Δ	m	ϕ	Δ	m	ϕ	Δ	m	ϕ	Δ	
А	1	1,15	0,89	-22,6	1,45	0,94	-35,2	1,37	0,78	-43,1	1,37	1,12	-17,9	-29,7
	2		0,82	-28,7		0,90	-37,9		0,85	-38,0		0,89	-34,8	-34,8
В	1	2,00	2,37	18,5	2,00	2,15	7,5	2,00	2,12	6,0	2,00	1,93	-3,5	+7,1
	2		2,12	6,0		2,36	18,0		1,95	-2,5		1,88	-6,0	+3,8
С	1	1,53	1,92	25,5	1,53	1,75	13,7	1,53	1,94	26,8	1,53	1,55	1,3	+16,8
	2		1,81	18,3		1,97	28,8		1,78	16,3		2,02	32,0	+23,9
D	1	1,07	1,05	-1,4	1,07	1,12	5,2	1,07	1,03	3,3	1,07	0,97	-8,9	-4,5
	2		2,15	101,9		1,98	85,9		1,53	43,7		1,48	39,0	+67,6
Е	1	1,07	0,84	-21,1	1,07	1,25	17,4	1,07	1,05	-1,4	1,07	1,14	7,0	4,8
	2		1,59	49,3		1,40	31,5		1,57	47,4		1,06	-0,5	31,9
Среднее значение разности Δ , %, для каждой фигуры	1			-0,2			+5,9			-1,7			-4,4	-1,2
	2			+29,4			+25,3			+13,4			+5,94	+18,5

Примечания. 1. m - теоретическое значение из табл.5.1, Па; ϕ - фактическое измеренное давление, Па; Δ - разность между фактическим и теоретическим значениями, рассчитанную по выражению $\Delta = 100 (\phi - m) / m$, %. 2. Серым цветом показаны результаты, для которых установлено недостижение требуемого давления.

Для разработанного способа следует внести следующие коррективы в алгоритм проектирования: рассмотреть возможность комбинирования материалов различных компрессионных групп для областей с соответствующими значениями проектируемого давления.

В известном методе проектирования такая возможность не рассматривается, поэтому локализованное воздействие на заданный участок фигуры может достигаться только за счет изменения кривизны или количества линий членения.

Таким образом, результаты экспериментальной проверки показали, что разработанный метод позволяет рассчитать 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 или им можно пренебречь по сравнению с деформацией материала одежды.

Предлагаемая технология учитывает все факторы, поэтому созданные на ее основе базы данных и методы смогут обеспечить высокую степень прогнозирования давления независимо от растяжимости материала, но с учетом его компрессионной способности и морфологии мягких тканей любого участка фигуры.

Выводы по главе 5

1. Разработан метод проектирования компрессионной одежды с заданным уровнем давления и виртуальным моделированием деформаций фигуры и одежды. Сравнение с известным способом проектирования

показало преимущество в точности задания компрессионного давления по новому методу.

2. Исходные данные для разработки конструкции компрессионной одежды были получены для индивидуальных фигур. Наличие новых баз данных об оцифрованных фигурах (в виде «аватаров»), значениях переносимого давления и показателей физико-механических свойств поверхности фигур и материалов впервые позволило формализовать процесс проектирования компрессионной одежды и открыло возможность для получения кастомизированных изделий.

3. По результатам апробации было сделано заключение, что для локализации корректирующего эффекта на заданных областях подкорпусной части фигуры целесообразно комбинировать в компрессионном изделии материалы разных компрессионных групп. В случае получения корректирующего эффекта, близкого к максимальному значению для всех областей этой части фигуры, целесообразно комбинировать материалы из разных компрессионных групп.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Gupta, D. Functional clothing – Definition and classification // *Indian Journal of Fibre & Textile Research*, 2011, 36(4), pp. 321-326.
- [2] Мэнна, Го. Разработка технологии виртуального проектирования одежды с элементами симуляции комфортности: дис. ... канд. техн. наук: 05.19.04. – Иваново: ИВГПУ, 2015. – 215 с.
- [3] Kanai, H. Evaluation of kinetic performance for men's suit jacket in exercise of shoulder joint / H. Kanai, H. Tsuji, M. Kamijo et al. // *Seni Gakkaishi*, 2007, 63(6), pp. 159-164.
- [4] Macintyre, L. Designing pressure garments capable of exerting specific pressures on limbs // *Burns*, 2007, 33(5), pp. 579-586.
- [5] Yildiz, N. A novel technique to determine pressure in pressure garments for hypertrophic burn scars and comfort properties// *Burns*, 2007, 33(1), pp. 59-64.
- [6] Leung, W. Y. Evaluation of compression design factor and prediction of garment pressure on wearer // *Thesis of Master of Philosophy Dissertation*. Hong Kong Polytechnical University, 2009.
- [7] Филатов, В. Н. Упругие текстильные оболочки // -М.: Легпромиздат, 1987. – 248 с.
- [8] Иванова, З.Т. Разработка метода проектирования компрессионных изделий: дисс. ... канд. техн. наук: 05.19.04. –Москва: МГУДТ, 1998. – 262 с.
- [9] Ng-Yip, F. Medical Clothing. A tutorial paper on pressure garments// *International journal of clothing science and technology*, 1993, 5(1), pp. 17-24.
- [10] Hirai, M. Effect of elastic compression stockings in patients with varicose veins and healthy controls measured by strain gauge plethysmography/ M.Hirai, H. Iwata, N. Hayakawa // *Skin Research and Technology*, 2002, 8, pp. 236-239.

[11] Partsch, H. Use of compression therapy в книге: Sclerotherapy treatment of varicose and telangiectatic leg veins // Elsevier Press, 2011, pp. 123-156.

[12] Проектирование изделий легкой промышленности в САПР: учебное пособие для вузов. Сурикова Г.И., Сурикова О.В., Кузьмичев В.Е., Гниденко А.В. – М., Инфра-М, 2012, 476 с.

[13] Ng-Yip, F. Medical Clothing. The stress relaxation and shrinkage of pressure garments // International journal of clothing science and technology, 1994, 6 (4), pp. 17-27.

[14] Старкова, Г.П. Методологические основы проектирования спортивной одежды из высокоэластичных материалов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.19.04. – Владивосток, 2004. – 308 с.

[15] Новикова, А.В. Совершенствование процессов проектирования плотнооблегающей одежды на основе исследования свойств высокоэластичных материалов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.19.04. - Владивосток, 2009. – 177 с.

[16] Коваленко, Ю. А. Расчет конструктивных параметров изделий из высокоэластичных полимерных материалов / Ю. А. Коваленко, О. Е. Гаврилова // Вестник Казанского технологического университета, 2011, №6. –с. 141-146.

[17] Jeong, Y. 3D Pattern construction and its application to tight-fitting garments for comfortable pressure sensation / Y. Jeong, K. Hong, S. Kim //Fibers and polymers, 2006, 7(2), pp. 195-202.

[18] Kirk, W. Jr. Fundamental relationship of fabric extensibility to anthropometric requirements and garment performance/ W. Kirk, Jr., S. M. Ibrahim //Textile Research Journal, 1966, 36(1), pp. 37-47.

[19] Ashayeri, E. An investigation into pressure delivery by sport compression garments and their physiological comfort properties // Thesis of Master of Technology Dissertation. – RMIT University, 2012. – 166 p.

- [20] Senthilkumar, M. Dynamics of Elastic fabrics for sportswear / M. Senthilkumar, N. Anbuman // *Journal of industrial textiles*, 2011, 41(1), pp. 13-24.
- [21] Voyce, J. Elastic textiles / J.Voyce, P. Dafniotis, S. Towlson // Shishoo, R. (ed) *Textiles in sport. – Cambridge, Woodhead Publishing in textiles*, 2005. – 204 p.
- [22] Engel, F. Compression garments in sports: Athletic performance and recovery / F.Engel, B. Sperlich // Springer, 2016, pp.134-136.
- [23] Bradely, T. Compression garments and a method of manufacture/ T.Bradley, K.Susan //US Pat. №2009/0025115 A1, 2009.
- [24] Lawrence, D. Graduated, static, external compression of the lower limb: a physiological assessment / D. Lawrence, V. Kakkar // *British Journal of Surgery*, 1980, 67, pp. 119-121.
- [25] Watanuki, S. Effects of wearing compression stockings on cardiovascular responses / S. Watanuki, H. Murata // *The annals of physiological anthropology*, 1994, 13(3), pp. 121-127.
- [26] Hill, J. The variation in pressures exerted by commercially available compression garments / J. Hill, G. Howatson, K. Someren, D. Gaze, et al.// *Sport Engeneering*, 2014, 18, pp.115-121.
- [27] Brophy-Williams, N. Confounding compression: the effects of posture, sizing, and garment type on measured interface pressure in sports compression clothing / N. Brophy-Williams, M. Driller, S. Halson // *Journal of sport sciences*, 2014, 33, pp. 1403-1410.
- [28] Young, G. Compression garments or method of manufacture /US Pat. 2009/0113596, 2009.
- [29] McLaren, J. Compression garments and method of manufacture / J. McLaren, A. Herrod, B. Payne //US Pat. №2012/0222187 A1, 2012.
- [30] Venkatraman, P. Application of compression sportswear / P. Venkatraman, D. Tyler // S. Hayes, P. Venkatramann, (eds.) *Materials and*

technology for sportswear and performance apparel. – CRC Press, 2015, pp. 171-204.

[31] Баландина, Г.В. Исследование воздействия корсетного изделия на торс женской фигуры / Г. В. Баландина, Н. В. Корнилова // Швейная промышленность. – 2007, №4. – С. 52-53.

[32] Youngjoo, N. Clothing pressure and physiological responses according to boning type of non-stretchable corsets / *Fibers and Polymers*, 2015, 16(2), pp. 471-478.

[33] Селезнева, А.В. Определение моделирующего эффекта женской фигуры, создаваемого корсетом, с учетом психофизиологического комфорта / А. В. Селезнева, А. Л. Славинская // *Технология текстильной промышленности*, 2014, 2(350). –с.102-106.

[34] Rocke, H. *Foundation garments. Selecting. Fitting. Care* // *Historical materials from university of Nebraska*, 1956.

[35] Dickinson, R.L. Questions of pressure and displacement // *The New York Medical Journal*, 1887, 11.

[36] Баландина, Г.В. Разработка информационного и методического обеспечения для трехмерного проектирования корсетных изделий: дисс.... канд. техн. наук: специальность 05.19.04. – Иваново, ИГТА, 2009. – 245с.

[37] Андреева, Е.Г. Методологические основы проектирования одежды из эластичных полотен: дисс. ... доктора техн. наук: специальность 05.19.04. –М., МГУДТ, 1997. – 470 с.

[38] Hu, J. *Structure and mechanics of woven fabrics* // Woodhead Publishing Ltd, 2004. – 307 p.

[40] Kawabata, S. *The Standartization and analysis of hand evaluation* / Textile Machinery Society of Japan, Nishi-ku, Osaka, Japan, 1980.

[41] <http://www.instron.us/en-us/products/testing-systems>

[42] Петросова, И.А. Разработка методологии проектирования внешней формы одежды на основе трехмерного сканирования /И.А.Петросова //Дисс... доктора техн. наук, специальность 05.19.04.

[43] ГОСТ 8847-85. Полотна трикотажные. Методы определения разрывных характеристик и растяжимости при нагрузках, меньше разрывных.

[44] Европейский стандарт EN 14704-1:2006. Determination of the elasticity of fabrics. Strip tests.

[45] ГОСТ 26435-85. Полотна трикотажные основовязанные эластичные. Методы испытаний при растяжении.

[46] Американский стандарт ASTM D2594 -04(2016) Standard test method for stretch properties of knitted fabrics having low power.

[47] Sloan, W. Cotton stretch fabrics by slack mercerization: Part 1: The effects of yarn and fabric construction / W. Sloan, A. Murphy, M. Hoffman, et al.// Textile research journal, 1963, 33, pp. 191-199.

[48] Kasap, M. Skeleton-aware size variations in digital mannequins / M. Kasap, N. Magnenat-Thalmann // The Visual Computer, 2011, 27(4), pp. 263–274.

[49] Ibrahim, S.M. Mechanics of form-persuasive garments based on spandex fibers / Textile Research Journal, 1968, 38 (9), pp. 37-47

[51] Sinclair, R. Textiles and Fashion. Materials, Design and Technology // Woodhead Publishing, 2014, – 894 p.

[52] Bartels, V.T. Physiological comfort of sportswear / Shishoo, R. (eds), Textiles in sport. Cambridge, Woodhead Publishing in textiles, 2005. – 376 p.

[53] Macintyre, L. Pressure garment design tool to monitor exerted pressures / L. Macintyre, R. Ferguson // Burns, 2013, 39. pp. 1073-1082.

[54] Troynikov, O. Influence of material properties and garment composition on pressure generated by sport compression garments / O. Troynikov, W. Wardiningsih, A. Koptug, et al. // Procedia Engineering, 2013, 60. pp. 157-162.

[55] Yamada, T. Clothing Pressure of knitted fabrics estimated in relation to tensile load under extension and recovery processes by simultaneous measurements / T. Yamada, M. Matsuo // *Textile research journal*, 2009, 79(11), pp. 1021-1033.

[56] Zeigert, B. Stretch Fabric Interaction with Action Wearables: Defining a Body Contouring Pattern System / B. Ziegert, G. Keil // *Clothing and Textiles Research Journal*, 1988, 6 (4), pp. 54-64.

[57] Macintyre, L. The study of pressure delivery for hypertrophic scar treatment / L. Macintyre, M. Baird, P. Weedall // *International Journal of Clothing Science and Technology*, 2004, 16, pp. 173 – 183.

[58] Liu, R. Quantitative assessment of relationship between pressure performances and material mechanical properties of medical graduated compression stockings / R. Liu, Y. Kwok, Y. Li, et al. // *Journal of Applied Polymer Science*, 2007, 104 (1), pp. 601–610.

[59] Macintyre, L. New design tool for delivering graduated compression // Paper presented at NED University of Engineering and Technology's International Textile Conference. March 2014, Karachi, Pakistan.

[60] Macintyre, L. Pressure garments for use in the treatment of hypertrophic scars - a review of the problems associated with their use / L. Macintyre, M. Baird // *Burns*, 2006, 32(. pp. 10–15

[61] Troynikov, O. 3D body scanning method for close-fitting garments in sport and medical applications / O. Troynikov, E. Ashayeri // *HFESA 47th Annual Conference*, 2011.

[62] Болдовкина, О. С. Конструирование одежды: учебное пособие/ О.С.Болдовкина. – Владивосток: ВГУЭС, 2005. – с. 27.

[63] Hang, T.W. The evaluation of pressure and tactile comfort of girdles: Thesis Submitted for the Degree of Bachelor of Arts // *Institute of Textiles & Clothing*. – The Hong Kong Polytechnic University, 2013.

[64] Leung Kin Ping, Jennes. Study on shapewear preferences for women in Hong Kong intimate apparel market: Thesis Submitted for the Degree of Bachelor of Arts // Institute of Textiles & Clothing. – The Hong Kong Polytechnic University, 2012.

[65] Chu Sau Wa, Sarah. Development of a men's body re-shaper: Thesis Submitted for the Degree of Bachelor of Arts. // Institute of Textiles & Clothing. – The Hong Kong Polytechnic University, 2012.

[66] http://en.wikisource.org/wiki/Toleration_of_the_corset

[67] <http://www.sigvaris.com/usa/en-us/knowledge/compression-levels-and-indications>

[68] Шиглер, М. Юбки и брюки. М. Мюллер и сын. Конструирование / М. Шиглер, Л. Кролопп // – М.: Эдипресс-Конлига, 2004. – с. 208.

[69] Lim, N-Y. Innovation of girdles / N-Y Lim, W Yu, J Fan, J Yip // Innovation and technology of women's intimate apparel. – Woodhead Publishing, 2006, pp.114-131.

[70] Meyer, M. Discrete Differential-Geometry Operators for Triangulated 2-Manifolds / M. Meyer, M. Desbrun, P. Schröder, A. Barr. // In: Hege HC., Polthier K. (eds) Visualization and Mathematics III. Springer, Berlin, Heidelberg, 2003, pp. 35-57.

[71] Aghajani, M. Investigating the accuracy of prediction pressure by Laplace law in pressure-garment applications / M. Aghajani, A. A. Jeddi, M. A. Tehran // Journal of applied polymer science, 2011, 121(5), pp. 2699-2704.

[72] Тисленко, И.В. Теоретический расчет плотнооблегающих оболочек из текстильных материалов / И.В.Тисленко, В.Е.Кузьмичев // Швейная промышленность, 2014, № 6. - С. 32-37.

[73] Volino, P. Accurate garment prototyping and simulation / P.Volino, N.Thalman // Computer-aided design and application, 2005, 2(5), pp. 645-654.

[74] Park, J.H. The Change of garment pressure and body measurement by material of women's girdle / J.H. Park, J.S. Chun // Journal of the Ergonomics Society of Korea, 2012, 31(3), pp. 455-461.

[75] Kawabata, S. Fabric Performance in Clothing Manufacture / S. Kawabata, M. Niwa // Journal Textile Institute, 1989, 80 (1), pp. 19–50.

[76] http://whdf.ru/catalog/compress_clothes/therapy/

[77] Шеромова, И. А. Совершенствование процесса получения рациональных конструкций изделий из высокоэластичных материалов на основе принципов типового проектирования: учебное пособие / И. А. Шеромова, Г. П. Старкова, А. В. Новикова, Н. В. Щенникова, Н.А. Коноплева, О. А. Дремлюга. – Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, 2008. – 165с.

[78] Коваленко, Е. Высокоэластичные трикотажные полотна / Е.Коваленко, О. Кучеренко // В мире оборудования. – 2006. - №1 (60)

[79] Конопальцева Н.М., Рогов П.И., Крюкова Н.А. Конструирование и технология изготовления одежды из различных материалов. В 2 ч. Ч.2: Технология изготовления одежды: учебное пособие для вузов / Н.М. Конопальцева, П.И. Рогов, Н.А. Крюкова. -М.:Издательский центр «Академия», 2007. -288 с.

[80] Сурикова, Г. И. Использование свойств полотна при конструировании трикотажных изделий / Г. И. Сурикова, Л. Н. Флерова, Л. П. Юдина. - Москва, Легкая индустрия, 1982.

[81] Корнилова, Н. Л. Теоретические основы и методическое обеспечение процессов проектирования и изготовления функционально-эргономических корсетных изделий: дисс. ... доктора техн. наук: специальность 05.19.04. - Иваново, ИГТА. 2011. –517 с.

[82] Большев, Л. Н. Таблицы математической статистики / Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов // – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. - 416 с.

[83] <https://www.asds.net/TechnologyReportLiquidInjectableSilicone.aspx>

[84] <http://www.nanomedicine.com/NMI/Tables/7.3.jpg>

[85] Ng, S.F. Pressure model of elastic fabric for producing pressure garments / S.F. Ng, C.L. Hui // *Textile Research Journal*, 2001, 71(3), pp. 275-279.

[86] Kamhala, E. The comfort dimension. A review of perception in clothing / E. Kamalha, Y. Zeng, J. Mwasiagi, S. Kyatuheire // *Journal of Sensory Studies*, 2013, 28. pp. 423–444.

[87] Mitsuno, T. Waistband pressure and its sensory evaluation / T. Mitsuno, H. Makabe, H. Momota, K. Kazuo // *Sen Gakkaishi*, 1991, 41(6). pp. 282-290.

[88] 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.

[89] Makabe, H. Effect of covered area at the waist on clothing pressure / H. Makabe, H. Momota, T. Mitsuno, K. Kazuo / *Sen Gakkaishi*, 1993, 49(10), pp. 513-521.

[90] 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.

[91] Olivera, S. Measurement of compression in different last generation swimsuits using three-dimensional body scanner / Undergraduate Thesis, University of Porto, 2009.

[92] 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, Kaferelsheikh University, Egypt.SMARTexEGYPT\smartexCD\smartexCD\res.html.

[93] 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. 257-266.

[94] Li, L. Using 3D Body Scans for Shaping Effects Testing Developed by Foundation Garment / L. Li, Z. Weiyuan // The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments, ICEMI 2007.

[95] Shin, K. A method for planar development of free-form surfaces made of anisotropic materials// Journal of Mechanical Science and Technology, 2011, 25 (11), pp. 2817-2825.

[96] Pourazadi, S. On the design of a DEA-based device to potentially assist lower leg disorders: an analytical and FEM investigation accounting for nonlinearities of the leg and device deformations / S. Pourazadi, S. Ahmadi, C. Menon // Biomedical engineering online, 2015, 14, 14:103.

[97] Wang, J. The Application of the Volumetric Subdivision Scheme in the Simulation of Elastic Human Body Deformation and Garment Pressure / J. Wang, X. Luo // Textile Research Journal, 2005, 75(8), pp. 591–597.

[98] Yu, W. Softness measurements for open-cell foam materials and human soft tissue. / W.Yu, Y.Li, Y. Zheng, et al. // Measurement Science and Technology, 2006, 17, pp. 1785–1791.

[99] Hendrics, F.M. A numerical-instrumental method to characterize non-linear mechanical behaviour of human skin / Skin Research and Technology, 2003, 9, pp 274-283.

[100] Hayes, W. A mathematical analysis for indentation tests of articular cartilage / W. Hayes, L. Keer, G. Herrmann, et al. // *Journal of Biomechanics*, 1972, 5, pp. 541–551.

[101] Р. Фейнман. Фейнмановские лекции по физике. Том 7. Физика сплошных сред. – М., Наука, 1972. – 152с.

[102] Geerligs, M. A literature review of the mechanical behavior of the stratum corneum, the living epidermis and the subcutaneous fat tissue // *Koninklijke Philips Electronics*, 2006. – 39 p.

[103] Cai, Y. A Finite element mechanical contact model of 3D human body and a well-fitting bra / Y. Cai, W. Yu, L. Chen // in *Advances in applied digital human modeling*. Vincent Duffy (Ed.). 2014. pp. 157-165.

[104] Linneweber, B. Towards a coupled simulation of cloth and soft tissue / Linneweber B., Fuhrmann A. // *Proceedings of 6th Industrial Simulation Conference*, 2008. pp. 401–409

[105] Pier Giorgio Minazio, P.G. (1995) FAST – Fabric Assurance by Simple Testing / *International Journal of Clothing Science and Technology*, 1995, 7 (2), pp.43-48.

[106] Chan, A. Effect of clothing pressure on the tightness sensation of girdles / A. Chan, J. Fan // *International Journal of Clothing Science and Technology*, 2002, 14 (2), pp. 100-110.

[107] Wang, C. C. L. Geometric modeling and reasoning of human-centered freeform products / Springer, London, 2013. – 228 p.

[108] Методика конструирования одежды из трикотажных полотен. – М.: ЦНИИШП, 1982.

[109] Методика конструирования женской одежды из трикотажных полотен. – М.: ВДМТИ, 1979.

[110] Nakahashi, M. An analysis of waist-nipper factors that affect subjective feeling and physiological response // *Seni Gakkaishi*, 2005, 61(1), pp. 40-46.

[111] Kemmler, W. Effect of compression stockings on running performance in men runners // *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2009, 23(1), pp. 101-105.

[112] MacRae, B. Compression garments and exercise. Garment considerations, physiology and performance / B. MacRae, J. Cotter, R. Laing // *Sports Medicine*, 2011, 41(10), pp. 815-843.

[113] Watanuki, S. Improvements on a design of girdle by using cardiac output and pressure sensation / *The annals of physiological anthropology*, 1994, 13(4), pp. 157-165.

[114] Yao, L. Effects of clothing on skin physiology / Thesis on PhD. HonKong, 2008. - 247с.

[115] 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.141-143.

[116] Doan, B. Evaluation of a lower-body compression garment / B. Doan, Y. Kwon, R. Newton, J. Shim // *Journal of Sports Sciences*, 2003, 21, pp. 601–610.

[117] Perrey, S. Graduated compression stockings and delayed onset muscle soreness / S. Perrey, A. Bringard, S. Racinais, et al. // in Estivalet M., Brisson P., eds. *The Engineering of Sport*, 2008, Paris: Springer. –vol 1, pp. 547-554.

[118] Bieuzen, F. Effect of wearing compression stockings on recovery after mild exercise-induced muscle damage / F. Bieuzen, J. Brisswalter, C. Easthope, et al. // *International Journal of Sports Physiology Performance*, 2014, 9(2), pp. 256-264.

[119] <http://www.cadcamcube.jp/lookstailorx2.html>

[120] <http://optitex.com/>

[121] Hsiao, S.W. Surface flattening assisted with 3d mannequin based on minimum energy / S.W. Hsiao, R.Q. Chen, C.Y. Lin //International Journal of Computer, Information, Systems and Control Engineering, 2014, 8(8), pp. 87-94.

[122] Liang, W. Optimal flattening of freeform surfaces based on energy model / W. Liang, H. Bin //The International Journal of Advanced Manufacturing, 2004, 24(11), pp.853-859.

[123] Wang, C.C.L. Surface flattening based on energy model /C.C.L. Wang, S. F. Smith, M. F. Yuen // Computer-Aided Design, 2002, 34 (11), pp. 823-833.

[124] Li, J. Flattening triangulated surfaces using a mass-spring model /J. Li, D. Zhang, G. Lu, et al. // The International Journal of Advanced Manufacturing, 2005, 25, pp. 108-117.

[125] Zhang, Q. L. Finite element method for developing arbitrary surfaces to flattened forms / Q. L. Zhang, X. Q. Luo // Finite Elements in Analysis and Design, 2003, 39(1), pp. 977–984.

[126] Wang, C.C.L. Woven model based geometric design of elastic medical braces / C.C.L. Wang, K. Tang // Comput. Aided Design, 2007, 39(3), pp. 69–79.

[127] Wang, C.C.L. Pattern computation for compression garment by a physical/geometric approach / C.C.L. Wang, K. Tang // Comput. Aided Design, 2010, 42(2), pp. 78–86.

[128] Sheffer, A. ABF++: Fast and robust angle based flattening/ A. Sheffer, B. Levy, M. Mogilnitsky, A. Bogomyakov // ACM Trans. Graph. 2005, 24, pp. 311–330.

[129] Azariadis, P.N. Geodesic curvature preservation in surface flattening through constrained global optimization / P.N. Azariadis, N.A. Aspragathos // Computer-Aided Design, 2001, 33(8), pp. 581-591.

[130]http://help.optitex.com/Optitex_3D/Using_the_Tension_Map.htm?rhto cid=4.5.0_2

[131] Кузьмичев, В.Е. Исследование компрессионной способности трикотажных материалов / В.Е.Кузьмичев, Тисленко И.В., Чен Ч., Д.С. Адольф // Вестник Казанского технологического университета, 2015, т.18, № 20. - С.179-181.

[132] Чжэ, Ч. Экспериментальное обоснование прогнозирования компрессионного давления под одеждой свободной формы / Ч.Чжэ, И. В. Тисленко, М. Го, В. Е. Кузьмичев //Известия вузов. Технология текстильной промышленности, 2016, № 2. - С.165-172.

[133] 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.

[134] ГОСТ 28554-90 Полотно трикотажное. Общие технические условия.

[135] Manual for Tensile and Shear Tester KES-FB-1, Kyoto, Japan:KATO Tech Co., Ltd.

Приложение 1.

**Показатели геометрических и структурных свойств
исследованных материалов**

Таблица П1.1 - Перечень свойств исследованных трикотажных полотен

№	Цвет, область применения	Внешний вид	Состав	Тип переплетения нитей	Группа растяжимост по ГОСТ 31409-2009, в.с./п.с	Линейная плотность, г/м ²
1	2	3	4	5	6	7
T1	Серый, костюмная группа		40%Хлопок 30% Лен, 25% Лиоцел 5% Эластан	Ластик	1/1	170-180
T2	Синий, костюмная группа		98%Модал, 2% Эластан	Интерлок	1/1	300
T3	Темно-серый, спортивная одежда		30%Лен, 65%Хлопок 5%Эластан	Ластик	1/1	170-180
T4	Молочный, спортивная одежда		45% Модал, 55% Хлопок	Ластик	1/1	170
T5	Светло-серый, нижнее белье		47% Cotton, 47% Modal, 6% Spandex	Гладь	1/1	110
T6	Бежевый, нижнее белье		95% Вискоза 5% Эластан	Ластик	3/3	165

Продолжение табл. П1.1						
1	2	3	4	5	6	7
T7	Бежевый с точкой, костюмная группа		100% Хлопок	Интерлок	1/1	210
T8	Серый, спортивная одежда		82% Хлопок, 15% Полиэстр, 3% Эластан	Гладь	1/2	200
T9	Темно-красный, спортивная одежда		90%Полиэстер, 10% Эластан	Трико (сукно)	1/2	225
T10	Голубой, нижнее белье		93%Вискоза, 7%Эластан	Гладь	3/3	150
T11	Оранжевый, нижнее белье		65%Вискоза, 30%Хлопок, 5% Эластан	Гладь	2/3	180
T12	Красный, костюмная группа		100%Полиэстр	Гладь, 2 слоя	1/1	230
T13	Желтый, спортивная одежда		75%Полиэстр, 20%Хлопок, 5% Эластан	Гладь	2/2	200

Окончание табл. П1.1						
1	2	3	4	5	6	7
T14	Черный, спортивная одежда		97%Полиэстр, 3%Эластан	Ластик	1/1	180
T15	Вишневый, спортивная одежда		90%Полиэстер, 10% Эластан	Трико (сукно)	2/2	170
T16	Темно- вишневый, костюмная группа		60%Вискоза, 35% Нейлон, 5% Эластан	Ластик	1/1	210
T17	Серый/зеле ны, спортивная одежда		38% Вискоза, 57%Полиэстр, 5%Эластан	Гладь/гладь	1/1	390
T18	Сиреневый, спортивная одежда		95% Полиэстр, 5%Эластан	интерлок	1/1	260
T19	Темно- серый, костюмная группа		91%Лиоцел, 9%Эластан	Интерлок	1/1	350

Приложение 2.

Результаты измерений показателей физико-механических свойств.

Таблица П2.1 - Результаты измерений показателей свойств растяжения и сдвига

№	Растяжимость ε , %, при $\sigma=49$ Н/м, в.с./п.с.	Растяжимость при нагрузке 490 Н/м, EMT , %, в.с./п.с.	Модуль сдвига G , N/(m*deg)
<i>T1</i>	14/16	27/32	0,31
<i>T2</i>	8/12	13/28	0,88
<i>T3</i>	48/17	95/40	0,62
<i>T4</i>	18/14	31/32	0,31
<i>T5</i>	12/16	25/32	0,68
<i>T6</i>	65/121	112/230	0,22
<i>T7</i>	16/46	35/112	1,05
<i>T8</i>	33/45	85/115	0,41
<i>T9</i>	25/54	175/142	0,95
<i>T10</i>	80/90	146/196	0,40
<i>T11</i>	47/75	104/128	0,70
<i>T12</i>	6/9	26/39	1,41
<i>T13</i>	65/54	106/125	0,62
<i>T14</i>	22/17	96/71	0,23
<i>T15</i>	47/51	180/155	0,12
<i>T16</i>	34/21	105/102	0,24
<i>T17</i>	4/11	19.5/42	0,18
<i>T18</i>	29/52	83/114	0,07
<i>T19</i>	11/12	37/56	0,47
Интервал	4-121	13-230	0,07 – 1,05

Таблица П2.2 Результаты измерений поперечного сокращения материалов ε_{\perp} при одноосном растяжении при усилиях 49, 74, 98 Н/м и коэффициенты аналитических зависимостей $\varepsilon_{\perp}=K\varepsilon + c$

Материал	$\varepsilon_{\perp}/\varepsilon$			K	c
	49 Н/м	74 Н/м	98 Н/м		
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
<i>T1 в.с.</i>	1%/14%=0,07	2/17=0,11	3/19=0,15	0,39	-4,56
<i>T2 в.с.</i>	0,5%/7%=0,07	1/8=0,125	1,5/9=0,16	0,5	-3
<i>T3 в.с.</i>	6%/48%=0,125	11/53=0,21	15/62=0,24	0,62	-22,97
<i>T4 в.с.</i>	2%/18%=0,11	3/19=0,16	5/21=0,24	1	-16
<i>T5 в.с.</i>	1%/12%=0,08	1/15=0,07	2/17=0,11	0,18	-1,37

Окончание табл. П.2.2					
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
<i>T6 в.с.</i>	9%/65%=0,14	16/82=0,19	24/88=0,27	0,60	-30,63
<i>T7 в.с.</i>	0,5%/16%=0,07	1/21=0,05	1/25=0,04	0,06	-0,35
<i>T8 в.с.</i>	3/33=0,09	6/41=0,14	8/48=0,17	0,33	-7,93
<i>T9 в.с.</i>	7/25=0,28	10/45=0,22	13/60=0,2	0,17	2,62
<i>T10 в.с.</i>	5/80=0,06	10/92=0,11	14/100=0,14	0,45	-30,89
<i>T11 в.с.</i>	2/47=0,04	4/65=0,06	5/73=0,07	0,11	-3,40
<i>T12 в.с.</i>	0,5/6=0,08	1/12=0,08	1/14=0,07	0,07	0,12
<i>T13 в.с.</i>	12/65=0,18	18/86=0,21	24/93=0,26	0,40	-14,17
<i>T14 в.с.</i>	4/22=0,18	8/25=0,32	11/33=0,33	0,58	-7,87
<i>T15 в.с.</i>	5/47=0,11	10/65=0,15	13/82=0,16	0,23	-5,48
<i>T16 в.с.</i>	3/34=0,08	6/40=0,15	9/52=0,17	0,32	-7,5
<i>T17 в.с.</i>	0/4=0	0/6=0	1/10=0,1	0,18	-0,86
<i>T18 в.с.</i>	4/29=0,14	8/37=0,22	12/44=0,27	0,53	-11,52
<i>T19 в.с.</i>	0,5/11=0,05	0,5/15=0,03	1/20=0,05	0,06	-0,21
<i>T1 н.с.</i>	2/16=0,125	4/19=0,21	5/21=0,24	0,61	-7,63
<i>T2 н.с.</i>	1/12=0,08	2/16=0,125	3/18=0,17	0,32	-2,93
<i>T3 н.с.</i>	1/17=0,06	2/22=0,9	2/25=0,08	0,13	-1,16
<i>T4 н.с.</i>	0,5/14=0,04	1/18=0,05	1/20=0,05	0,09	-0,71
<i>T5 н.с.</i>	0,5/16=0,03	1/18=0,05	1/20=0,05	0,13	-1,42
<i>T6 н.с.</i>	10/121=0,08	18/130=0,14	27/150=0,18	0,56	-56,9
<i>T7 н.с.</i>	1/42=0,06	1/55=0,02	2/64=0,03	0,04	-0,93
<i>T8 н.с.</i>	3/45=0,07	6/60=0,1	8/70=0,11	0,2	-6
<i>T9 н.с.</i>	6/54=0,11	11/72=0,15	17/82=0,21	0,38	-14,95
<i>T10 н.с.</i>	15/90=0,17	21/110=0,19	28/125=0,22	0,37	-18,48
<i>T11 н.с.</i>	5/75=0,07	12/80=0,15	17/85=0,2	1,2	-84,66
<i>T12 н.с.</i>	1/9=0,1	1/12=0,08	2/16=0,125	0,15	-0,5
<i>T13 н.с.</i>	14/54=0,07	25/70=0,36	27/90=0,32	0,41	-6,42
<i>T14 н.с.</i>	2/17=0,12	4/20=0,2	5/27=0,18	0,27	-2,14
<i>T15 н.с.</i>	9/51=0,18	16/70=0,23	22/97=0,26	0,28	-4,53
<i>T16 н.с.</i>	2/21=0,09	4/30=0,13	5/45=0,11	0,12	-0,14
<i>T17 н.с.</i>	1/13=0,08	2/14=0,14	3/15=0,2	1	-12
<i>T18 н.с.</i>	13%/52%=0,25	20/55=0,36	25/65=0,38	0,82	-27,48
<i>T19 н.с.</i>	0,5/12=0,04	1/19=0,05	1/28=0,04	0,03	-0,25

Графики испытаний материалов при одноосном растяжении на приборе KES (скриншоты графических зависимостей «усилие растяжения – относительное удлинение» для материалов T1-T19 в направлениях вдоль и поперек петельных столбиков)

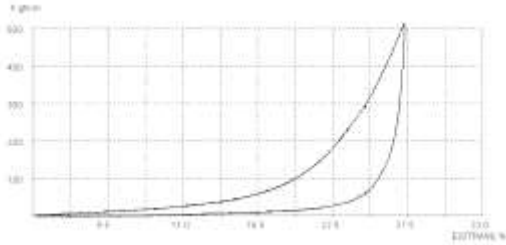


Рис. П2.1 –материал T1в.с.

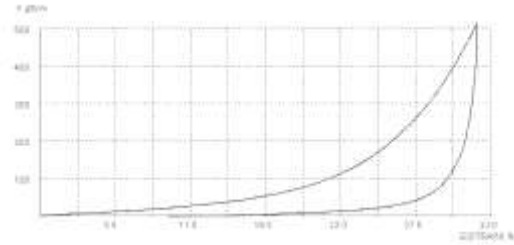


Рис. П2.2 –материал T1п.с.

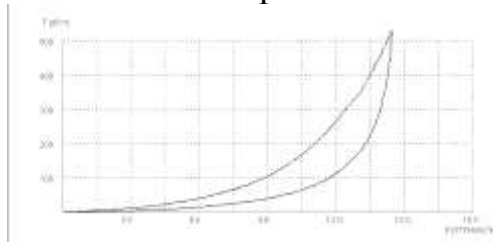


Рис. П2.3 –материал T2в.с.

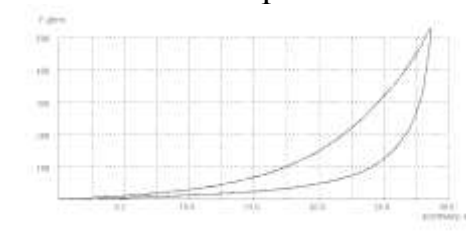


Рис. П2.4 –материал T2п.с.

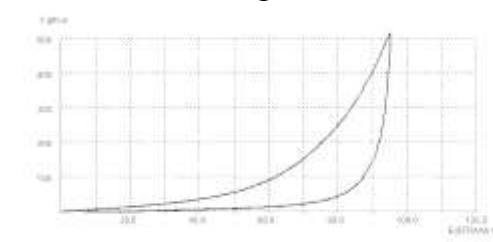


Рис. П2.5 –материал T3в.с.

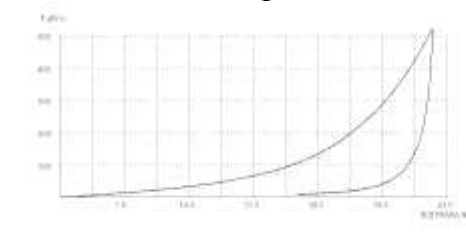


Рис. П2.6 –материал T3п.с.

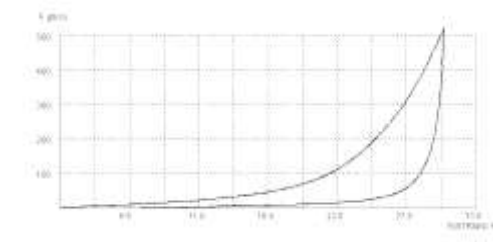


Рис. П2.7 –материал T4в.с.

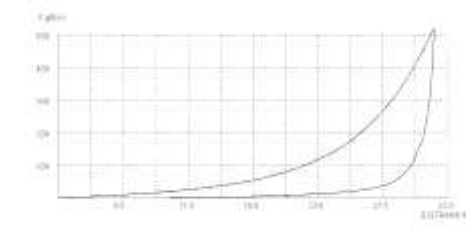


Рис. П2.8 –материал T4п.с.

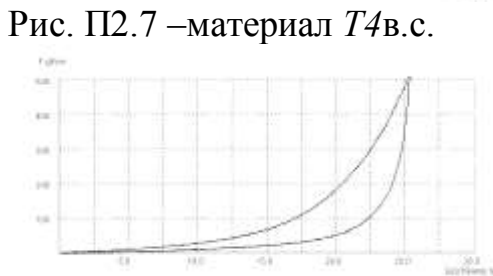


Рис. П2.9 –материал T5в.с.

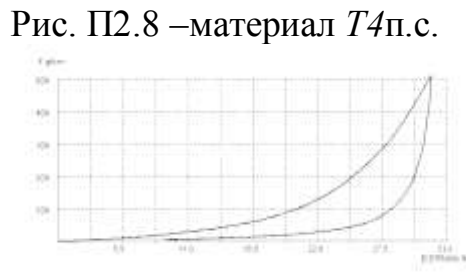


Рис. П2.10 –материал T5п.с.

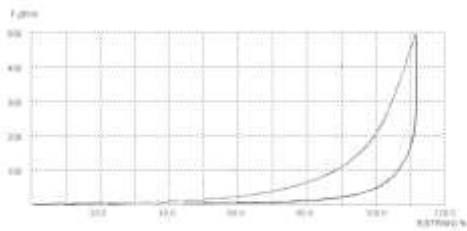


Рис. П2.11 –материал T6в.с.

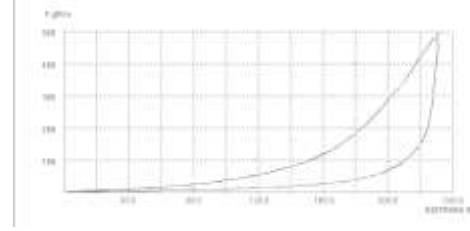


Рис. П2.12 –материал T6п.с.

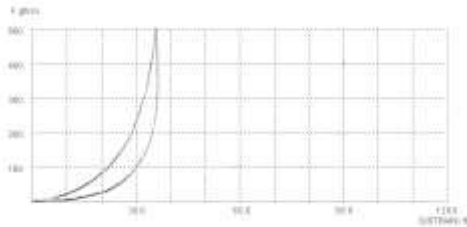


Рис. П2.13 –материал T7в.с.

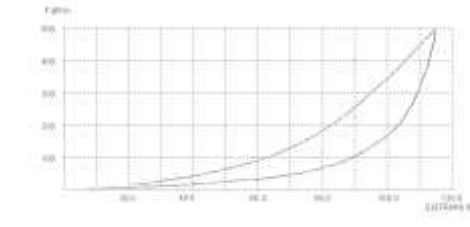


Рис. П2.14 –материал T7п.с.

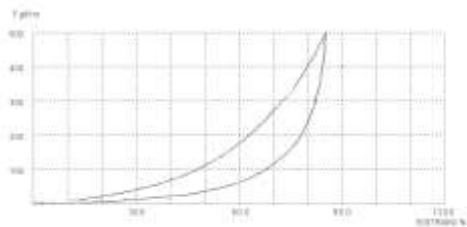


Рис. П2.15 –материал T8в.с.

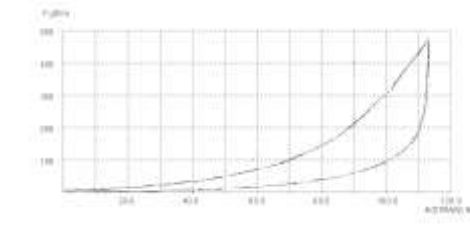


Рис. П2.16 –материал T8п.с.



Рис. П2.17 –материал T9в.с

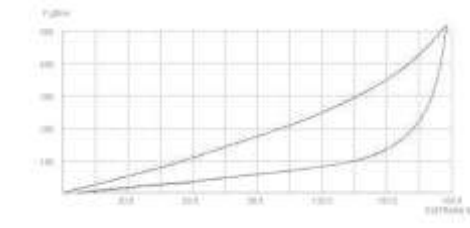


Рис. П2.18 –материал T9п.с

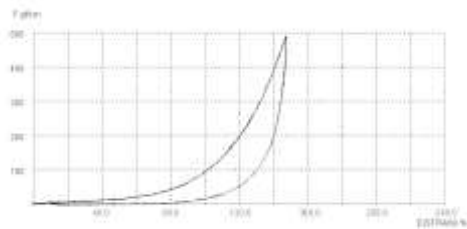


Рис. П2.19 –материал T10в.с

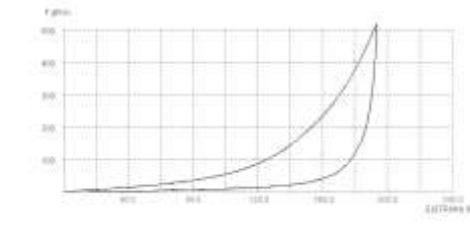


Рис. П2.20 –материал T10п.с

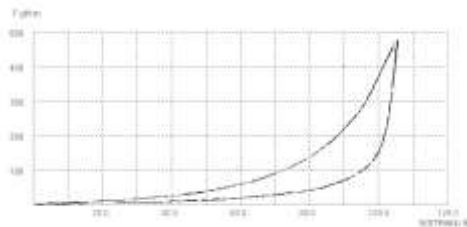


Рис. П2.21 –материал T11в.с

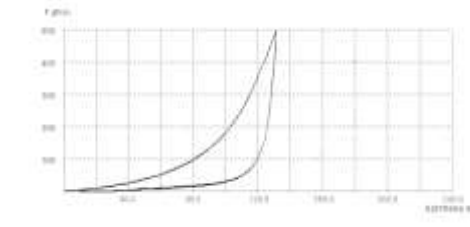


Рис. П2.22 –материал T11п.с

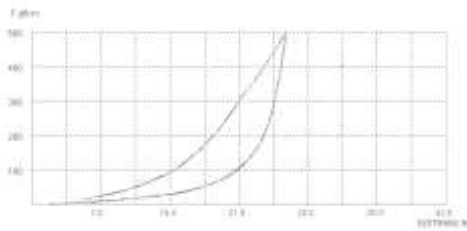


Рис. П2.23 –материал T12в.с

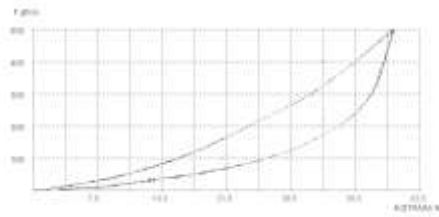


Рис. П2.24 –материал T12п.с

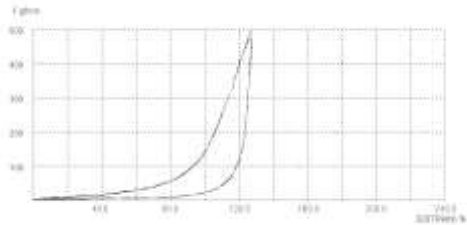


Рис. П2.25 –материал T13в.с

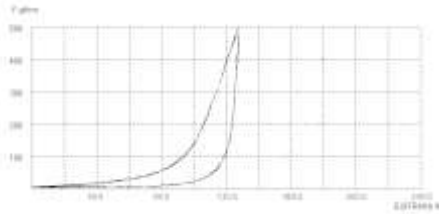


Рис. П2.26 –материал T13п.с

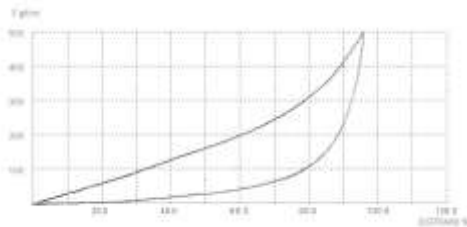


Рис. П2.27 –материал T14в.с

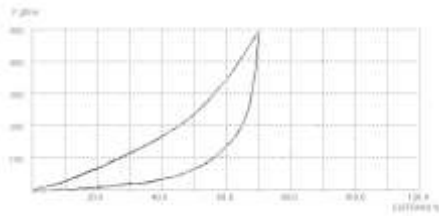


Рис. П2.28 –материал T14п.с

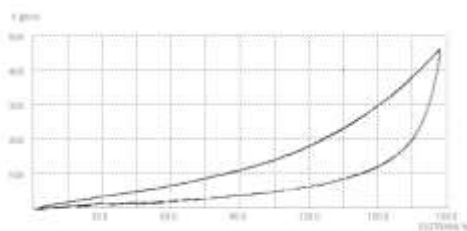


Рис. П2.29 –материал T15в.с

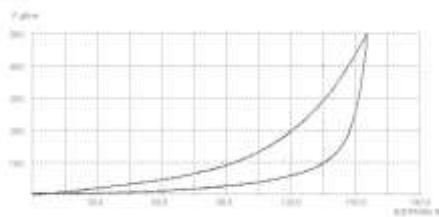


Рис. П2.30 –материал T15п.с

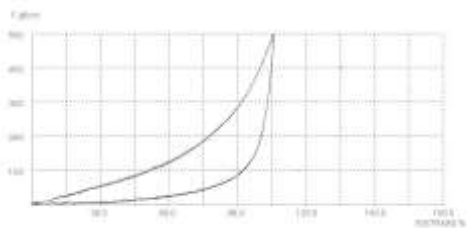


Рис. П2.31 –материал T16в.с

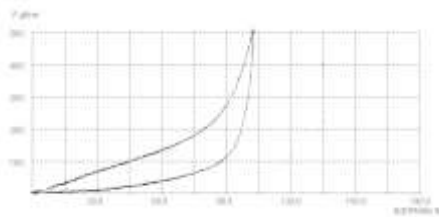


Рис. П2.32 –материал T16п.с

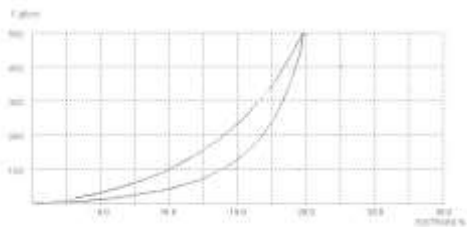


Рис. П2.33 –материал T17в.с

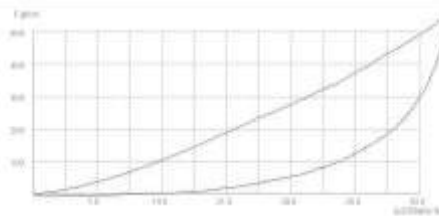


Рис. П2.34 –материал T17п.с

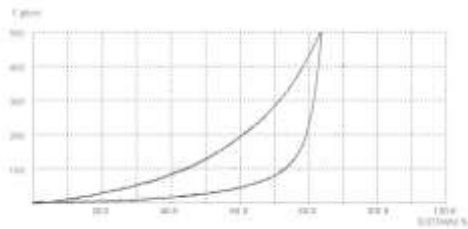


Рис. П2.35 – материал T18в.с

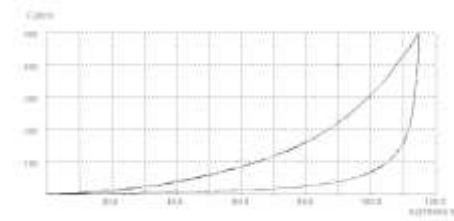


Рис. П2.36 – материал T18п.с

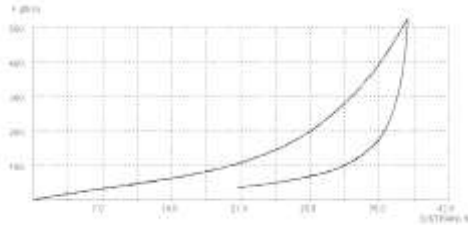


Рис. П2.37 – материал T19в.с

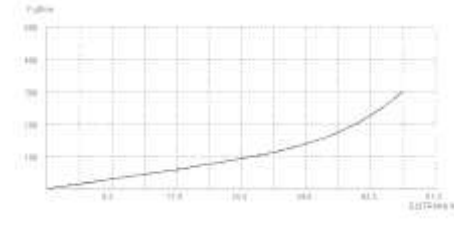


Рис. П2.38 – материал T19п.с

Графические зависимости «усилие растяжения – относительное удлинение» для малых эксплуатационных нагрузок до 49 сН/см

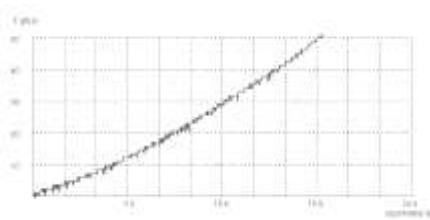


Рис. П2.39 – материал T1в.с.

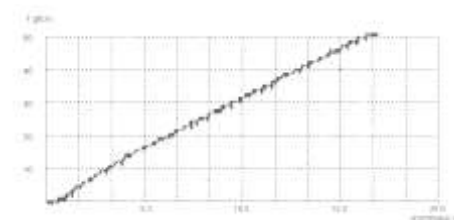


Рис. П2.40 – материал T1п.с.

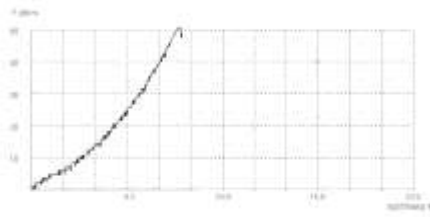


Рис. П2.41 – материал T2в.с.

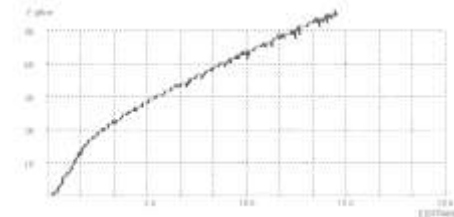


Рис. П2.42 – материал T2п.с.

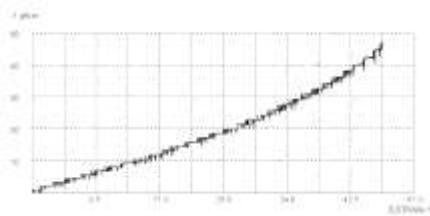


Рис. П2.43 – материал T3в.с.

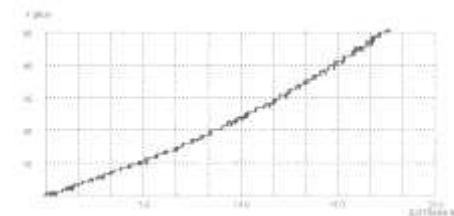


Рис. П2.44 – материал T3п.с.

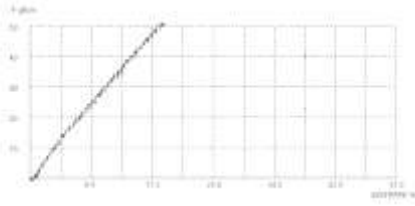


Рис. П2.45 –материал T4в.с.

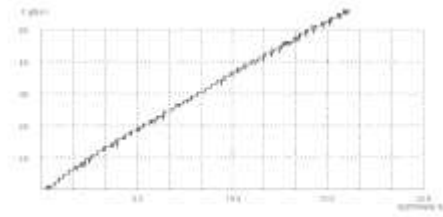


Рис. П2.46 –материал T4п.с.

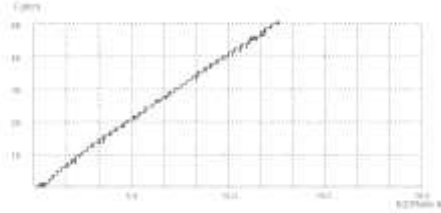


Рис. П2.47 –материал T5в.с.

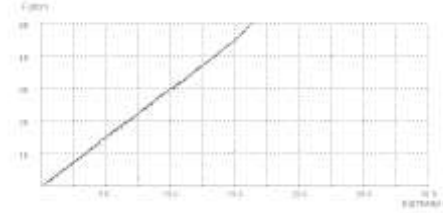


Рис. П2.48 –материал T5п.с.

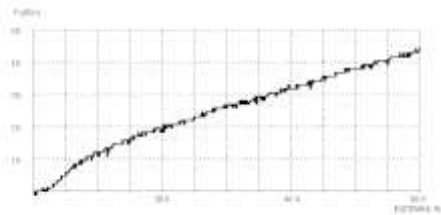


Рис. П2.49 –материал T6в.с.

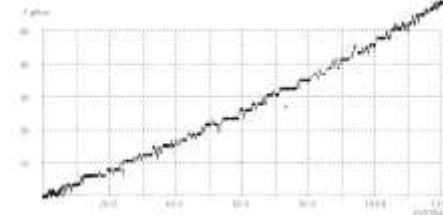


Рис. П2.50 –материал T6п.с.

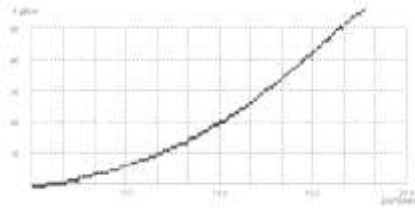


Рис. П2.51 –материал T7в.с.

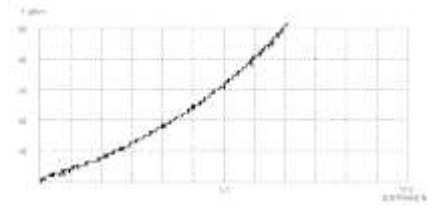


Рис. П2.52 –материал T7п.с.

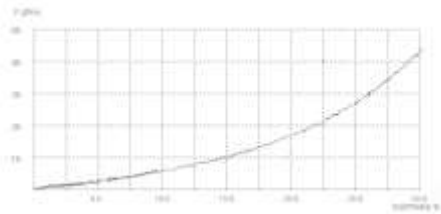


Рис. П2.53 –материал T8в.с.

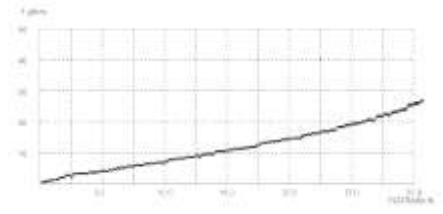


Рис. П2.54 –материал T8п.с.

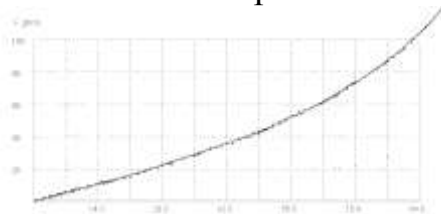


Рис. П2.55 –материал T9в.с.

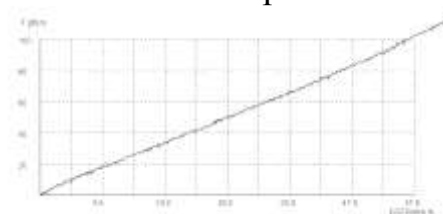


Рис. П2.56 –материал T9п.с.

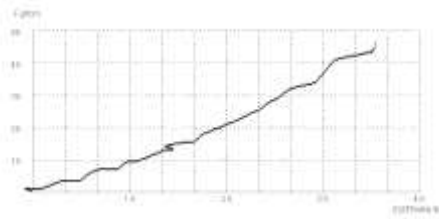


Рис. П2.71 – материал T17в.с.

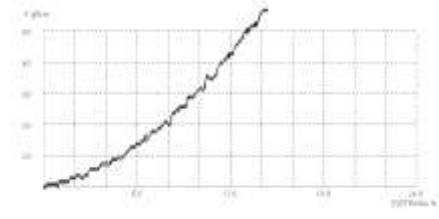


Рис. П2.72 – материал T17п.с.

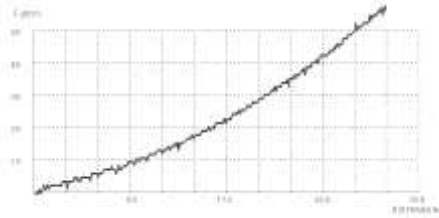


Рис. П2.73 – материал T18в.с.

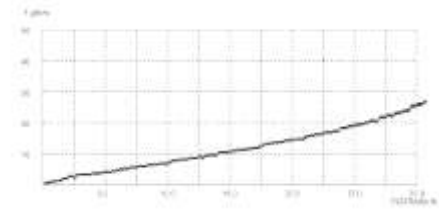


Рис. П2.74 – материал T18п.с.

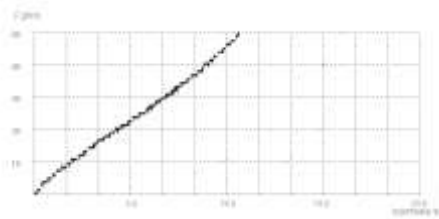


Рис. П2.75 – материал T19в.с.

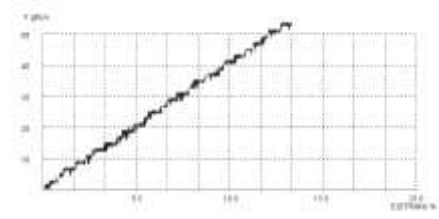


Рис. П2.76 – материал T19п.с.

Графические зависимости «усилие сдвига – угол перекоса нитей»

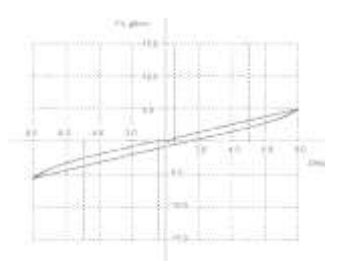
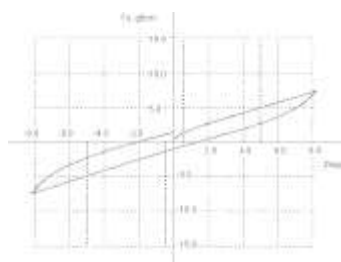
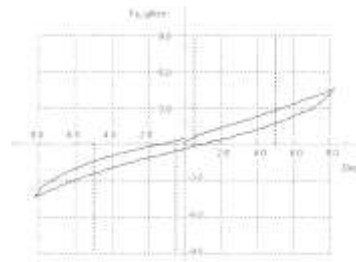


Рис. П2.77 – материал T1 Рис. П2.78 – материал T2 Рис. П2.79 – материал T3

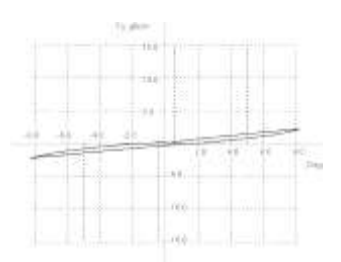
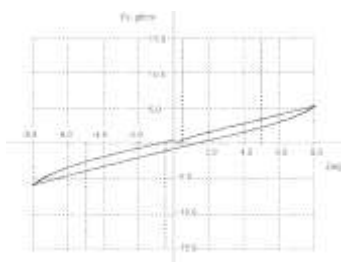
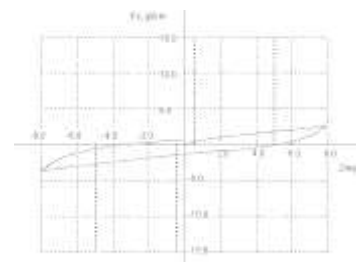


Рис. П2.80 – материал T4 Рис. П2.81 – материал T5 Рис. П2.82 – материал T6

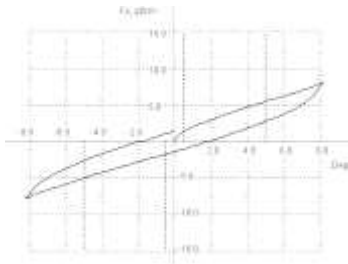


Рис. П2.83 – материал T7

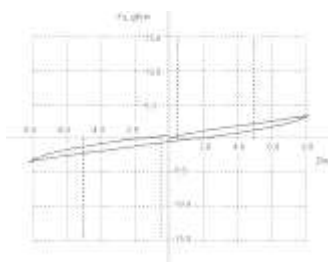


Рис. П2.84 – материал T8

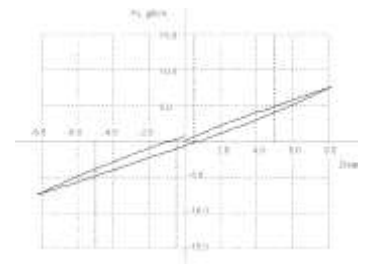


Рис. П2.85 – материал T9

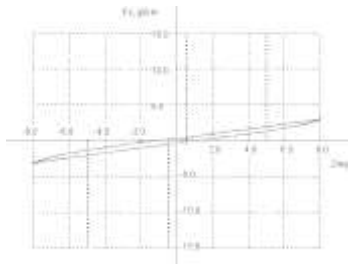


Рис.П2.86 –материал T10

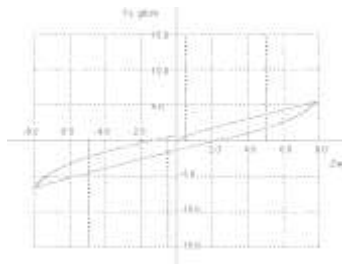


Рис.П2.87 –материал T11

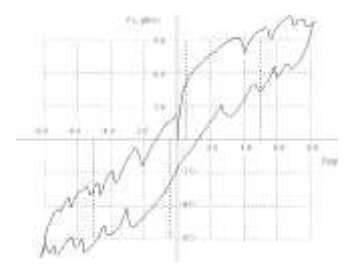


Рис.П2.88 –материал T12

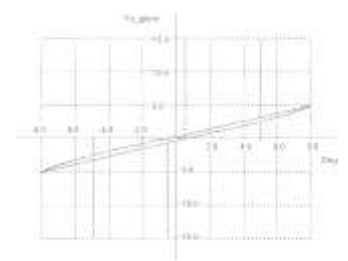


Рис.П2.89 –материал T13

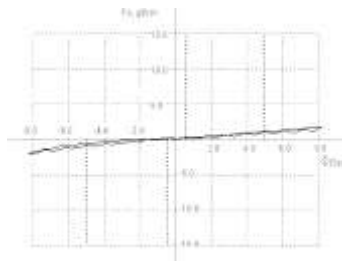


Рис.П2.90 –материал T14

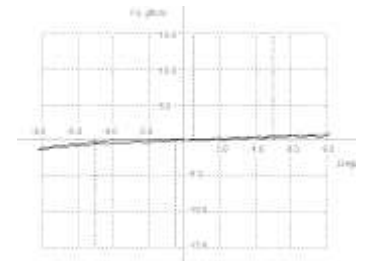


Рис.П2.91 –материал T15

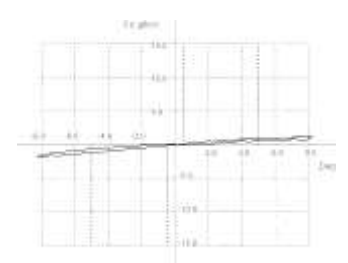


Рис.П2.92 –материал T16

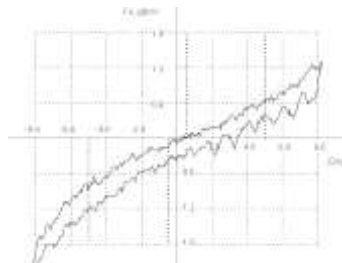


Рис.П2.93 –материал T17

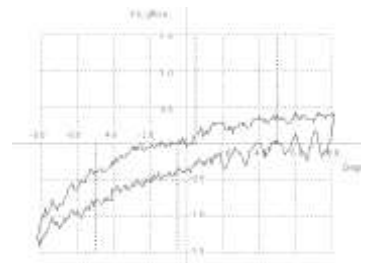


Рис.П2.94 –материал T18

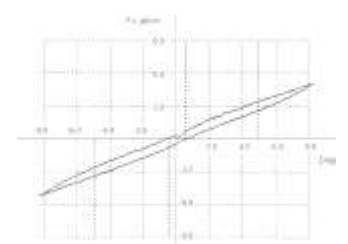


Рис.П2.95 –материал T19

Приложение 3

Результаты измерений давления на экспериментальном стенде

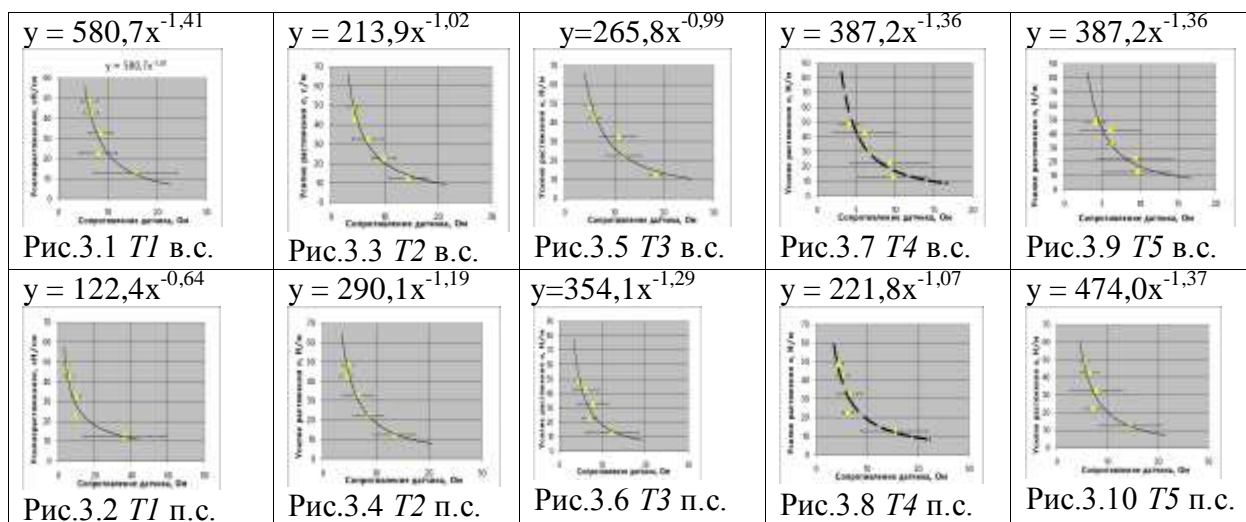
Таблица ПЗ.1 - Данные калибровочных измерений давления для первой серии измерений, моделирующих тип мягкой ткани без опоры на костный каркас

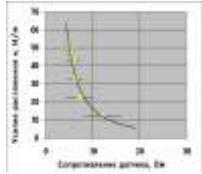
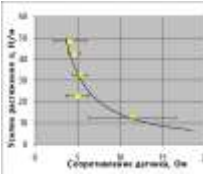
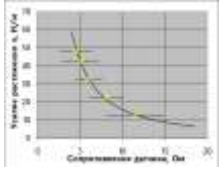
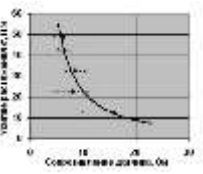
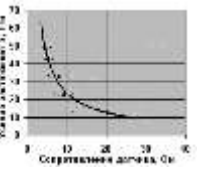
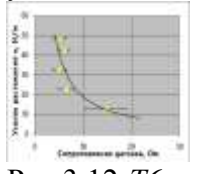
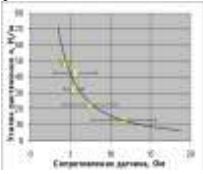
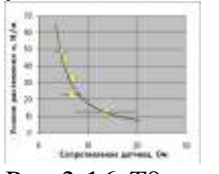
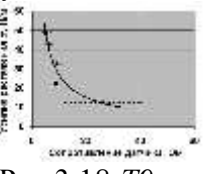
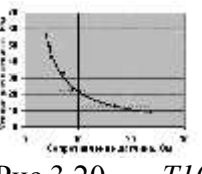
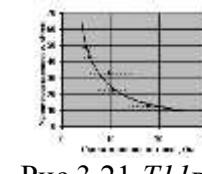
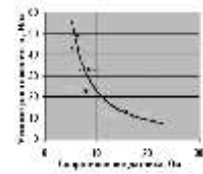
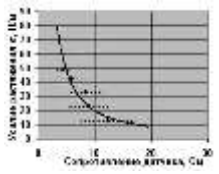
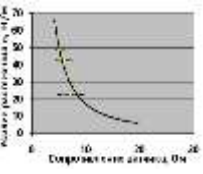
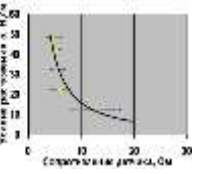
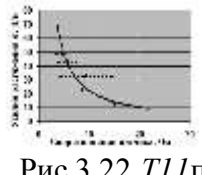
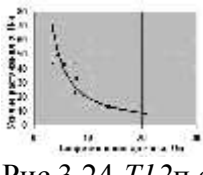
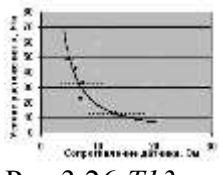
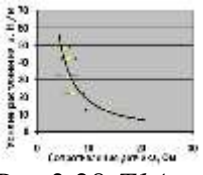
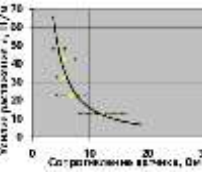
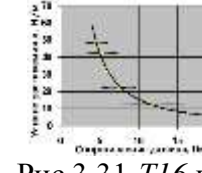
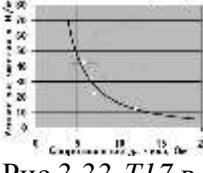
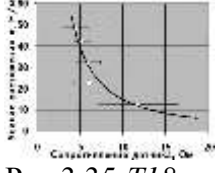
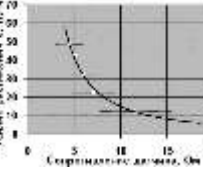
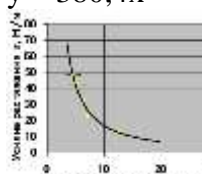
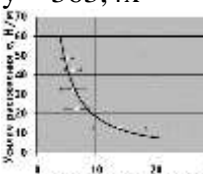
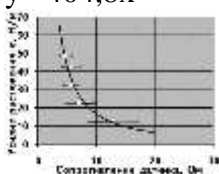
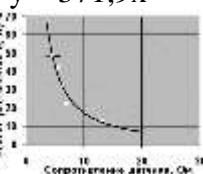
Масса груза	1 гр.	2гр.	5 гр.	10гр.	20гр.	50 гр.	100гр.	150гр.	170гр.
Давление	202	217	265	344	503	979	1773	2566	2884
Сопrotивление датчика, Ом	23,23	21,08	22,18	16,97	18,32	13,4	7,5	3,94	4,21
	36,13	35,85	37,54	15,01	30,67	8,59	5,92	3,95	2,01
	50,23	19,02	20,52	33,39	25,32	16,02	5,5	3,77	2,72
	40,15	51,95	29,16	22,08	38,22	13,59	6,72	4,67	2,32
	45,61	23,29	14,65	14,71	27,18	15,48	9,83	5,33	2,32
	46,09	24,98	18,58	11,48	26,32	17,98	11,24	3,75	3,12
	26,04	43,53	16,23	11,06	12,99	20,51	9,43	3,86	2,47
		24,36	23,41	12,75	13,38	8,52	9,19	2,78	3,21
		28,84	29,32	12,65	17,88	17,02	7,79	3,42	2,61
		24,12	30,49	12,59	23,17	11,12	8,92	2,45	3,71
		21,26	22,35	22,46	28,19	10,66	7,51	3,44	4,38
		43,74	38,53	22,37	16,45	9,97	6,8	3,69	
		23,76	19,03	18,35	33,87	8,56	5,9	2,54	
			39,43	22,05	14,86	10,02	7,32	4,78	
			48,09	12,38	20,63	9,48	3,65	4,22	
			45,67	15,43	14,1	9,22	5,84		
			26,52	17,66	13,9	8,38	5,56		
			19,42	10,72	9,4	5,31	7,8		
			22,18	15,84	15,69	4,28	3,86		
			23,62		14,83	8,22	5,48		
						5,26			
						6,24			
Среднее, Ом	38,21	29,67	27,34	16,83	20,76	11,31	6,96	3,77	3,00
станд.откл, Ом	10,34	10,56	9,75	5,65	7,92	4,28	1,91	0,80	0,79
ст.откл.ср., Ом	3,96	2,92	2,18	1,29	1,72	0,95	0,40	0,204	0,23
дов. инт для 95%, Ом	9,56	6,38	4,55	2,72	3,70	2,00	1,35	0,94	1,03

Таблица ПЗ.2 - Данные калибровочных измерений давления для второй серии измерений, моделирующих тип мягкой ткани с опорой на костный каркас

Масса груза, г.	10 гр.	20гр.	50 гр.	100 гр.	150 гр.	170 гр.
Давление, Па	754	1132	1316	2038	3057	3465
Сопротивление датчика, Ом	33,65	17,64	18,57	6,11	4,55	3,09
	26,55	16,43	11,2	5,28	4,33	2,7
	33,21	16,89	11,62	5,27	5,58	3,36
	25,79	28,56	12,61	6,49	5,05	3,76
	42,56	27,55	15,45	6,55	3,25	3,45
	48,51	30,17	13,1	5,47	4,09	2,93
	46,2	14,23	10,89	4,44	3,22	3,1
	35,09	48,36	8,38	4,97	3,8	3,79
	34,61	20,6	8,51	5,65	6,67	6,27
	45,08	42,6	11,67	7,6	3,28	4,09
	51,3	23,62	10,33	5,1	2,98	2,2
	27,32	28,34	11,59	6,21	3,92	3,92
	20,86	18,25	6,27	6,79	4,08	4,08
	19,56	21,2	22,73	6,39	5,05	5,05
	27,74	49,26	8,75	5,75	2,76	2,76
	30,49	24,57	7,83	4,52	3,95	3,95
21,2	16,57	12,66	5,06	4,75	3,4	
29,75	27,35	10,52	4,12	3,4	4,75	
Среднее, Ом	33,30	26,23	11,81	5,65	4,15	3,70
станд. откл, Ом	9,793	10,68	3,94	0,91	1,00	0,96
ст. откл. ср, Ом	2,30	2,52	0,93	0,21	0,23	0,22
дов инт для 95%, Ом	4,87	5,31	1,96	1,45	0,99	0,97

Графики зависимостей «Усилия растяжения» от «Сопротивление датчика», полученные в направлениях в.с. и п.с. для условий опоры мягкой ткани на костный каркас и аналитический вид зависимостей.



$y = 692,2x^{-1,63}$  Рис.3.11 T6 в.с.	$y = 236,5x^{-1,22}$  Рис.3.13 T7 в.с.	$y = 439,9x^{-1,44}$  Рис.3.15 T8 в.с.	$y = 551,28x^{-1,38}$  Рис.3.17 T9 в.с.	$y = 196,01x^{-0,92}$  Рис.3.19 T10 в.с.
$y = 236,1x^{-1,1}$  Рис.3.12 T6 п.с.	$y = 408,9x^{-1,41}$  Рис.3.14 T7 п.с.	$y = 308,6x^{-1,23}$  Рис.3.16 T8 п.с.	$y = 185,23x^{-0,84}$  Рис.3.18 T9 п.с.	$y = 240,55x^{-1,05}$  Рис.3.20 T10 п.с.
$y = 256,86x^{-1,02}$  Рис.3.21 T11 в.с.	$y = 365,59x^{-1,26}$  Рис.3.23 T12 в.с.	$y = 365,59x^{-1,26}$  Рис.3.25 T13 в.с.	$y = 600,3x^{-1,54}$  Рис.3.27 T14 в.с.	$y = 307,0x^{-1,28}$  Рис.3.29 T15 в.с.
$y = 291,52x^{-1,12}$  Рис.3.22 T11 п.с.	$y = 312,63x^{-1,21}$  Рис.3.24 T12 п.с.	$y = 487,6x^{-1,43}$  Рис.3.26 T13 п.с.	$y = 375,7x^{-1,32}$  Рис.3.28 T14 п.с.	$y = 377,7x^{-1,38}$  Рис.3.30 T15 п.с.
$y = 431,7x^{-1,44}$  Рис.3.31 T16 в.с.	$y = 605,0x^{-1,57}$  Рис.3.33 T17 в.с.	$y = 382,1x^{-1,41}$  Рис.3.35 T18 в.с.	$y = 450,2x^{-1,47}$  Рис.3.37 T19 в.с.	
$y = 380,4x^{-1,35}$  Рис.3.32 T16 п.с.	$y = 363,4x^{-1,29}$  Рис.3.34 T17 п.с.	$y = 404,8x^{-1,38}$  Рис.3.36 T18 п.с.	$y = 371,9x^{-1,33}$  Рис.3.38 T19 п.с.	

Графики зависимостей «Усилия растяжения» от «Сопротивление датчика», полученные в направлениях в.с. и п.с. для условий отсутствия опоры мягкой ткани на костный каркас и аналитический вид зависимостей.

$y = 558,6x^{-1,11}$ Рис.3.39 T1 в.с.	$y = 3157, x^{-1,92}$ Рис.3.41 T2 в.с.	$y = 1381, x^{-1,46}$ Рис.3.43 T3 в.с.	$y = 4294, x^{-1,92}$ Рис.3.45 T4 в.с.	$y = 11350x^{-2,37}$ Рис.3.47 T5 в.с.
$y = 2929, x^{-1,69}$ Рис.3.40 T1 п.с.	$y = 53011x^{-3,13}$ Рис.3.42 T2 п.с.	$y = 2426, x^{-1,63}$ Рис.3.44 T3 п.с.	$y = 25041x^{-2,84}$ Рис.3.46 T4 п.с.	$y = 4999, x^{-2,09}$ Рис.3.48 T5 п.с.
$y = 43125x^{-2,93}$ Рис.3.49 T6 в.с.	$y = 1802, x^{-1,62}$ Рис.3.51 T7 в.с.	$y = 6008, x^{-1,87}$ Рис.3.53 T8 в.с.	$y = 564,5x^{-1,11}$ Рис.3.55 T9 в.с.	$y = 3044x^{-1,78}$ Рис.3.57 T10 в.с.
$y = 848,4x^{-1,30}$ Рис.3.50 T6 п.с.	$y = 1858, x^{-1,53}$ Рис.3.52 T7 п.с.	$y = 1158, x^{-1,44}$ Рис.3.54 T8 п.с.	$y = 1893, x^{-1,52}$ Рис.3.56 T9 п.с.	$y = 3399, x^{-1,78}$ Рис.3.58 T10 п.с.
$y = 11097x^{-2,31}$ Рис.3.59 T11 в.с.	$y = 4779, x^{-1,95}$ Рис.3.61 T12 в.с.	$y = 7730, x^{-2,23}$ Рис.3.63 T13 в.с.	$y = 11190x^{-2,43}$ Рис.3.65 T14 в.с.	$y = 2764, x^{-1,75}$ Рис.3.67 T15 в.с.
$y = 4294x^{-1,90}$ Рис.3.60 T11 п.с.	$y = 7010, x^{-2,14}$ Рис.3.62 T12 п.с.	$y = 7445, x^{-2,24}$ Рис.3.64 T13 п.с.	$y = 1957x^{-1,67}$ Рис.3.66 T14 п.с.	$y = 7263x^{-2,04}$ Рис.3.68 T15 п.с.

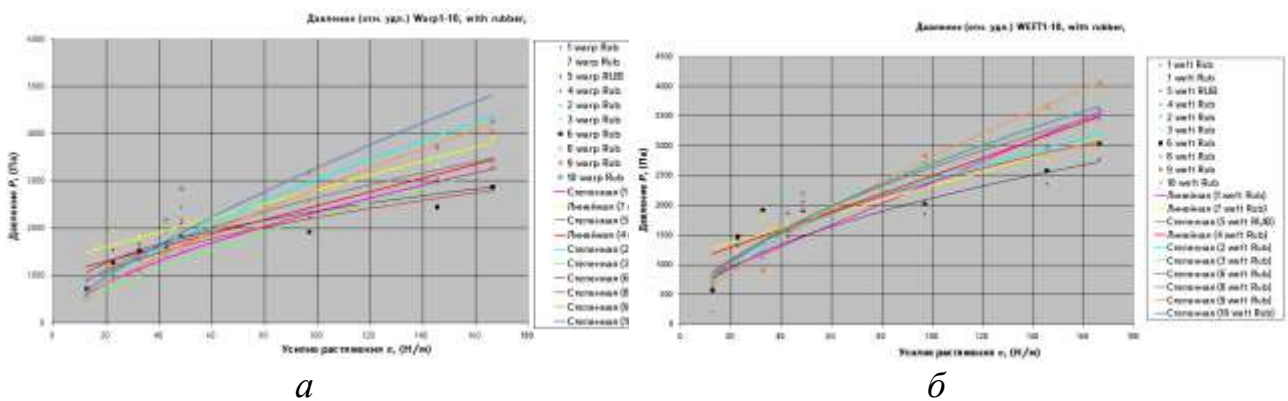
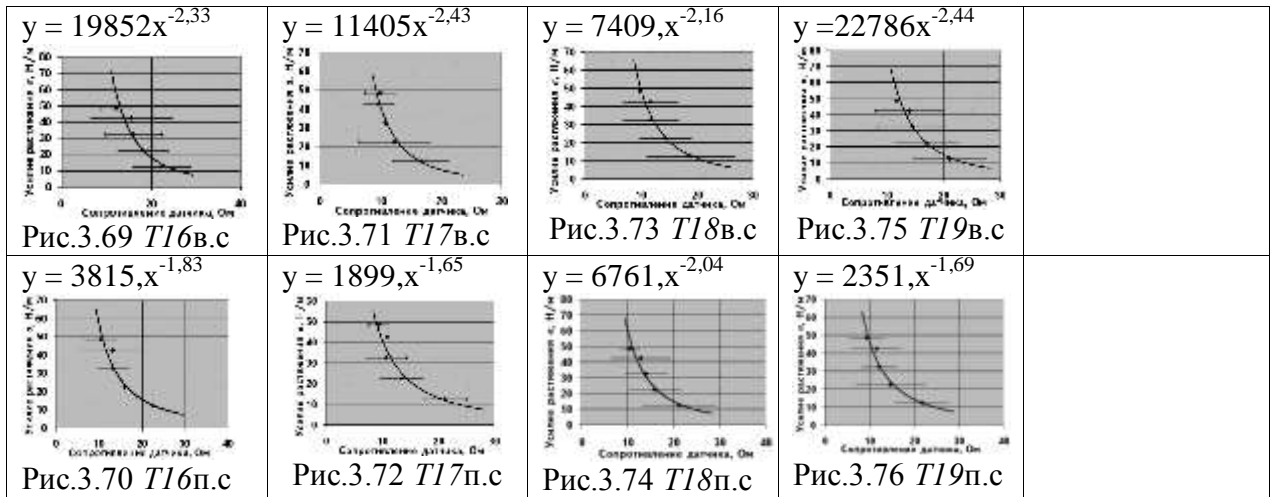


Рис.ПЗ.77- Графики зависимостей «Давление материала» от «Усилие растяжения», для материалов T1-T10, в направлениях в.с – (а) и п.с. – (б) для условий опоры мягкой ткани на костный каркас.

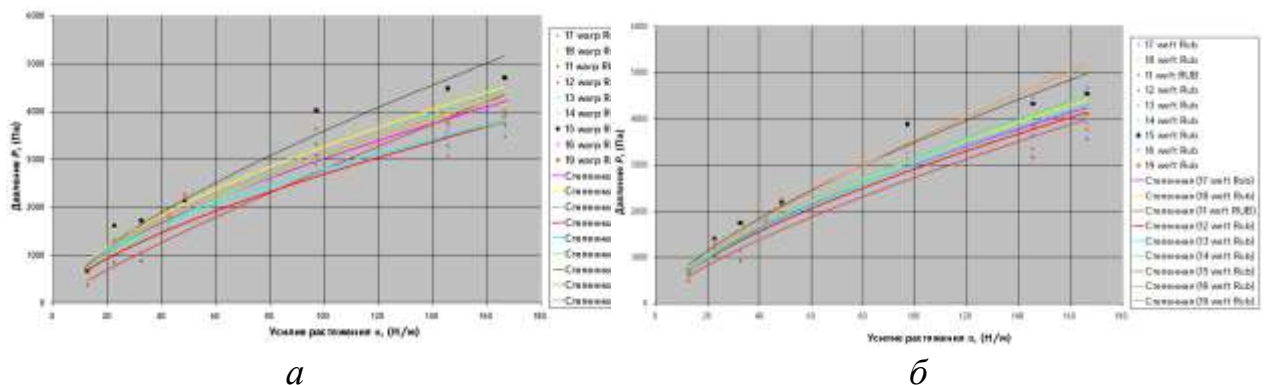


Рис.ПЗ.78 - Графики зависимостей «Давление материала» от «Усилие растяжения», полученные для материалов T11-T19, в направлениях в.с. – (а) и п.с. – (б) для условий опоры мягкой ткани на костный каркас.

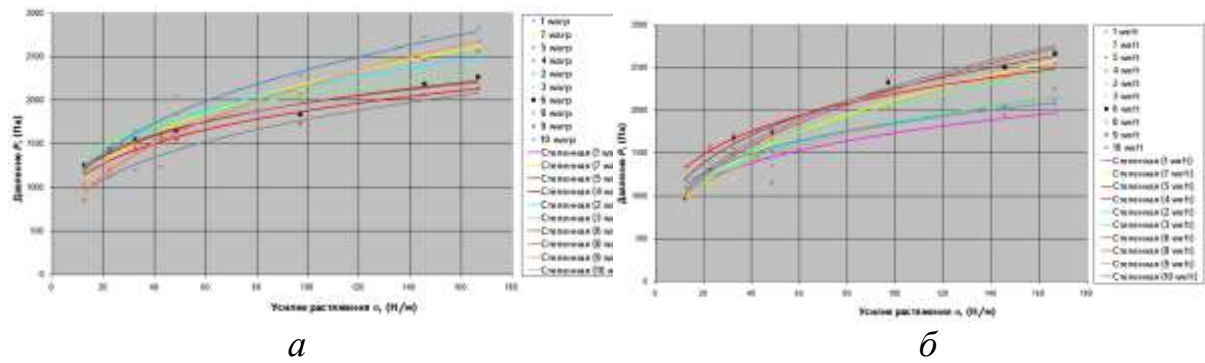


Рис.П3.79 - Графики зависимостей «Давление материала» от «Усилие растяжения», полученные для материалов $T1-T10$, в направлениях в.с. и п.с. для условий отсутствия опоры мягкой ткани на костный каркас.

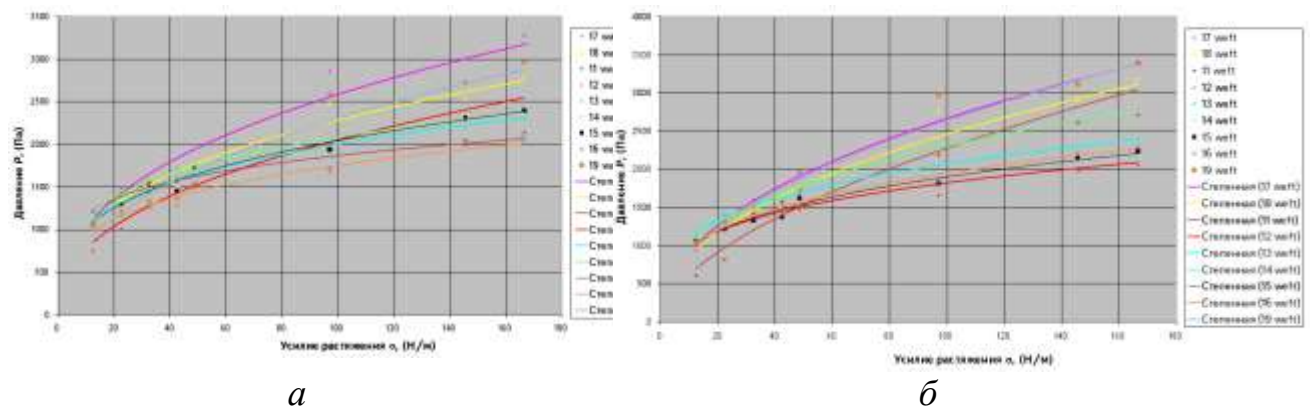


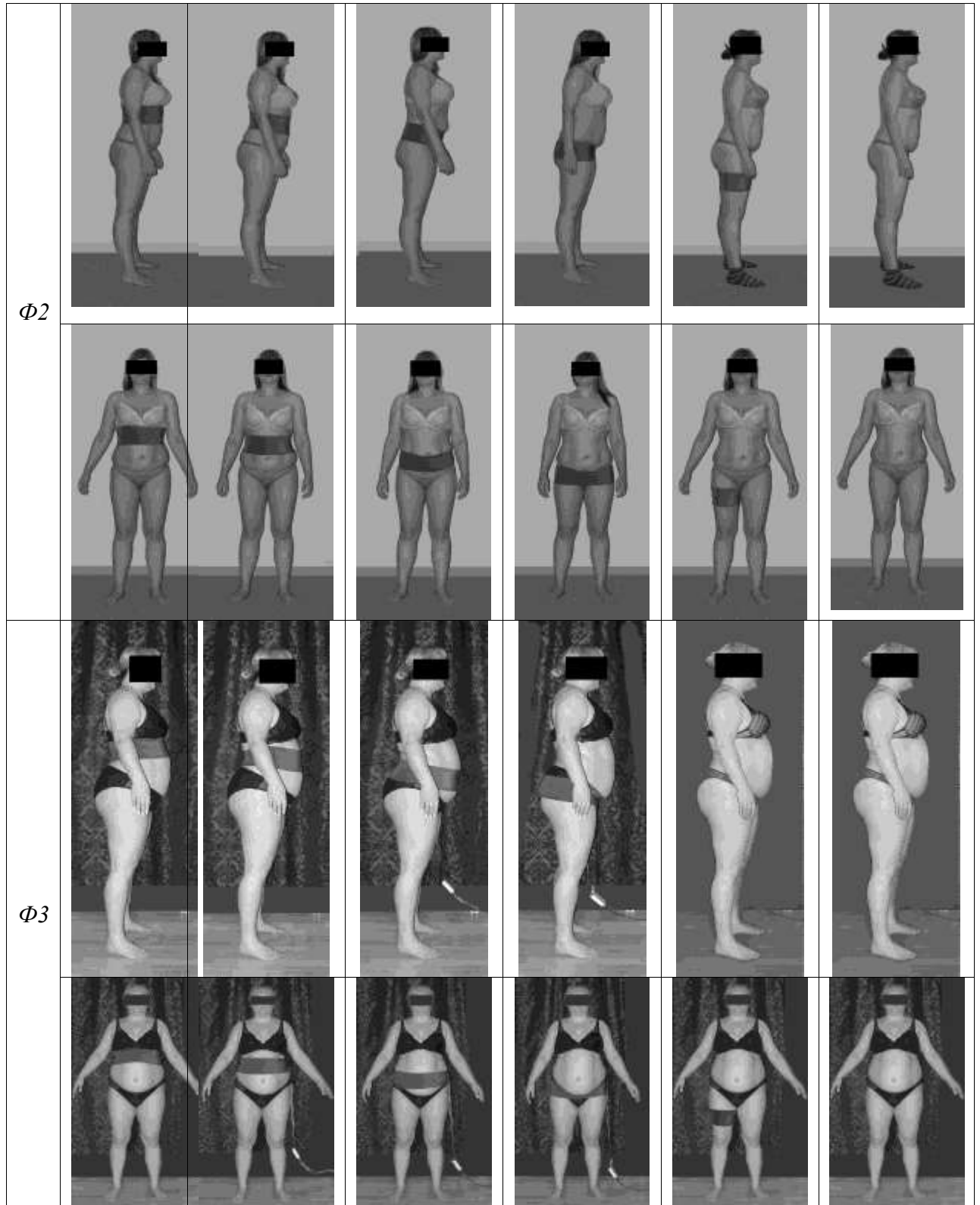
Рис.П3.80 - Графики зависимостей «Давление материала» от «Усилие растяжения», полученные для материалов $T11-T19$, в направлениях в.с. – (а) и п.с. – (б) для условий отсутствия опоры мягкой ткани на костный каркас.

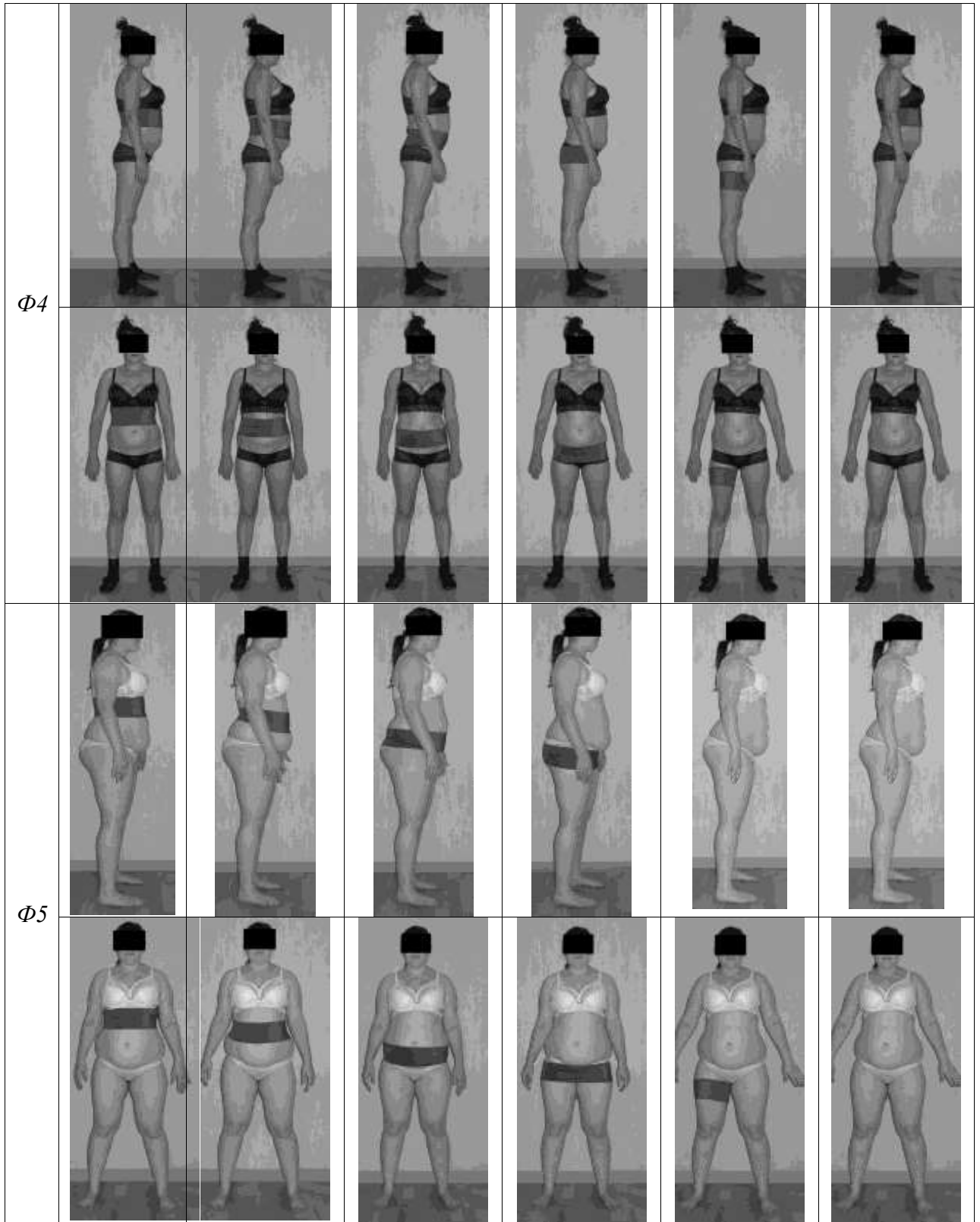
Таблица П.3.3 - Аналитический вид зависимостей «Давление материала» от «Усилие растяжения» (Рис.П3.77–П3.80), значения усилия для 20% отн. удлинения (на основе графиков рис.П2.1–П2.38) и рассчитанное значение $K_{компр}$

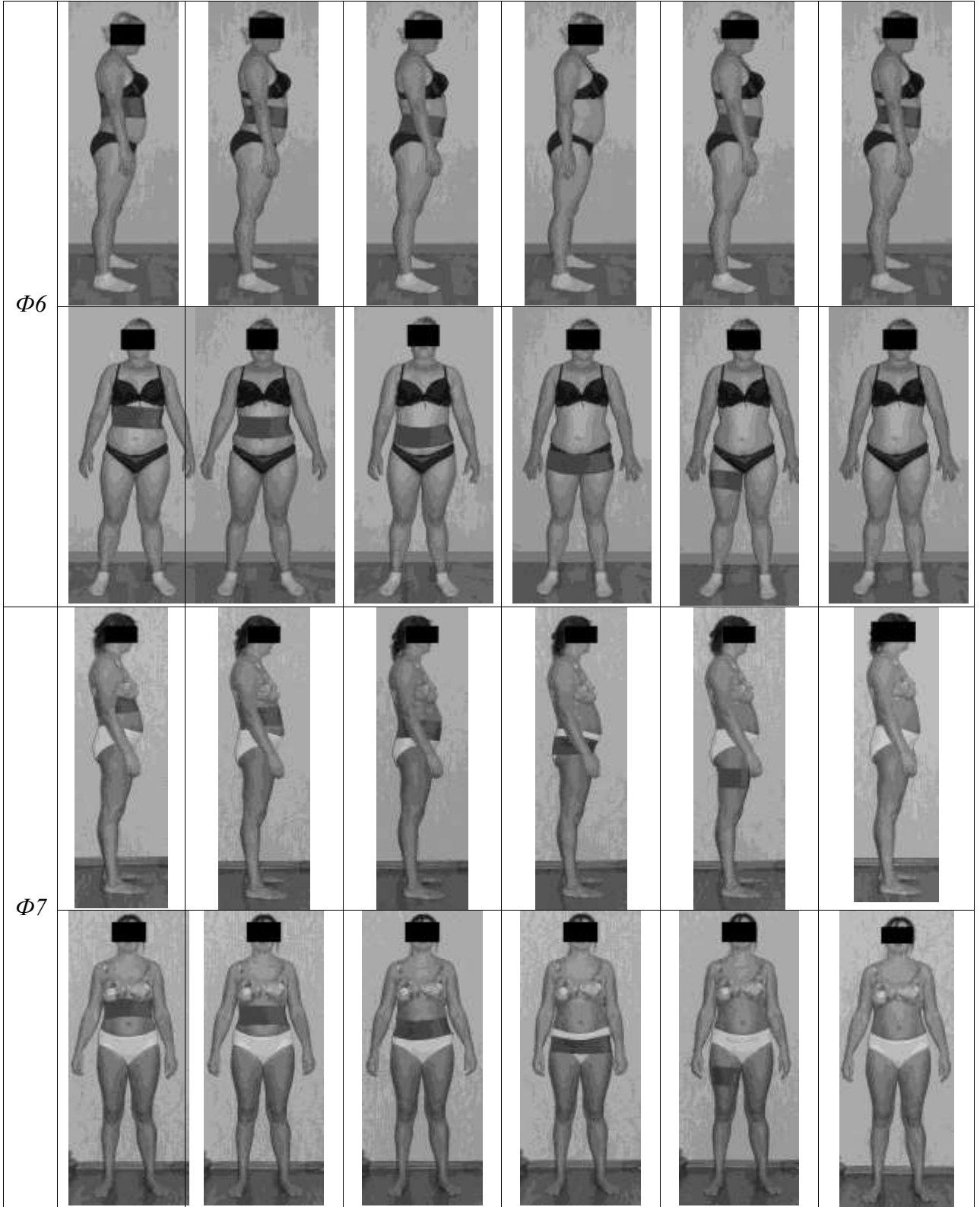
1	Аналитический вид зависимости $P_1(\sigma)$ по данным Рис.П3.77-П3.78	Аналитический вид зависимости $P_2(\sigma)$ по данным рис.П3.79-П3.80	$\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ при $\varepsilon=20\%$, по данным рис.П2.1-П2.38	σ при $\varepsilon=20\%$, по данным рис.П2.1-П2.38	$K_{компр} = \frac{d(P_1+P_2)}{2d\sigma^*} (\Delta\sigma/\Delta\varepsilon)$	Компр. группа
1	2	3	4	5	6	7
1в.с.	$y = 122,71x^{0,64}$	$y = 335,86x^{0,41}$	5	75	130	III
1п.с.	$y = 40,40x^{0,91}$	$y = 556,4x^{0,25}$	2,6	60	69	II
2в.с.	$y = 113,00x^{0,71}$	$y = 615,50x^{0,27}$	143	1000	1365	IV
2п.с.	$y = 209,76x^{0,53}$	$y = 504,93x^{0,28}$	28	150	470	IV
3в.с.	$y = 82,12x^{0,72}$	$y = 785,48x^{0,21}$	0,8	15	49	I
3п.с.	$y = 179,02x^{0,59}$	$y = 448,12x^{0,33}$	4	60	124	III

Окончание табл.П3.1						
1	2	3	4	5	6	7
4в.с.	$y = 231,60x^{0,53}$	$y = 608,90x^{0,24}$	3	55	94	II
4п.с.	$y = 180,84x^{0,59}$	$y = 714,90x^{0,24}$	2,4	65	75	II
5в.с.	$y = 400,69x^{0,39}$	$y = 667,53x^{0,24}$	4	80	103	III
5п.с.	$y = 215,39x^{0,50}$	$y = 558,81x^{0,30}$	3	60	89	II
6в.с.	$y = 282,57x^{0,45}$	$y = 712,80x^{0,22}$	0,7	20	20	I
6п.с.	$y = 249,01x^{0,49}$	$y = 397,16x^{0,38}$	0,5	8	39	I
7в.с.	$y = 308,76x^{0,50}$	$y = 467,06x^{0,34}$	10	80	302	IV
7п.с.	$y = 275,11x^{0,48}$	$y = 368,29x^{0,38}$	3,6	61	110	III
8в.с.	$y = 225,67x^{0,53}$	$y = 435,13x^{0,31}$	1,8	21	96	II
8п.с.	$y = 197,21x^{0,56}$	$y = 424,10x^{0,37}$	0,8	15	55	I
9в.с.	$y = 81,80x^{0,77}$	$y = 341,21x^{0,40}$	1	15	55	I
9п.с.	$y = 102,81x^{0,72}$	$y = 459,9x^{0,30}$	1,7	35	65	II
10в.с.	$y = 101,39x^{0,75}$	$y = 509,94x^{0,33}$	0,5	9	46	I
10п.с.	$y = 168,93x^{0,60}$	$y = 629,12x^{0,23}$	0,5	6	58	I
11в.с.	$y = 52,16x^{0,86}$	$y = 747,61x^{0,20}$	1,1	22,5	53	I
11п.с.	$y = 88,44x^{0,75}$	$y = 168,06x^{0,57}$	0,5	9	29	I
12в.с.	$y = 127,10x^{0,66}$	$y = 292,71x^{0,42}$	35,7	300	516	IV
12п.с.	$y = 122,97x^{0,69}$	$y = 536,49x^{0,27}$	1,9	140	38	I
13в.с.	$y = 184,59x^{0,59}$	$y = 550,47x^{0,28}$	0,8	14	58	I
13п.с.	$y = 124,45x^{0,69}$	$y = 580,18x^{0,28}$	0,8	16	55	I
14в.с.	$y = 128,93x^{0,69}$	$y = 640,38x^{0,26}$	2,8	44	110	III
14п.с.	$y = 130,70x^{0,69}$	$y = 439,79x^{0,36}$	3,3	65	110	III
15в.с.	$y = 140,92x^{0,70}$	$y = 501,60x^{0,30}$	1	22	56	I
15п.с.	$y = 141,99x^{0,70}$	$y = 490,71x^{0,29}$	0,9	27	47	I
16в.с.	$y = 170,07x^{0,63}$	$y = 497,84x^{0,27}$	1,5	33	62	I
16п.с.	$y = 114,43x^{0,75}$	$y = 488,17x^{0,30}$	1,8	47	68	II
17в.с.	$y = 153,37x^{0,65}$	$y = 410,99x^{0,40}$	50	500	680	IV
17п.с.	$y = 137,85x^{0,67}$	$y = 317,36x^{0,46}$	12,9	180	282	IV
18в.с.	$y = 181,29x^{0,63}$	$y = 433,77x^{0,36}$	2	29	102	III
18п.с.	$y = 145,52x^{0,67}$	$y = 295,44x^{0,46}$	1	15	64	I
19в.с.	$y = 170,94x^{0,64}$	$y = 311,71x^{0,43}$	10	100	275	IV
19п.с.	$y = 135,65x^{0,68}$	$y = 286,11x^{0,48}$	3,5	70	117	III

Приложение 4.

**Воздействие замкнутой полосы материала на области обхватов
исследованных фигур $\Phi 2$ - $\Phi 7$.**





Приложение 5

Листинг программы расчета НСО плагин-модуля «SeeJeeCAD 2» Система Windows XP/SP3, язык программирования C++, объем 219 строк

```
// File: obhvatscaleCmd.cpp
//
// MEL Command: obhvatscale
//
// Author: Maya Plug-in Wizard 2.0
//
// Includes everything needed to register a simple MEL command with Maya.
//
#include <maya/MSimple.h>
#include <maya/MGlobal.h>
#include <maya/MSelectionList.h>
#include <maya/MDagPath.h>
#include <maya/MString.h>
#include <maya/MFnNurbsCurve.h>
#include <maya/MFnMesh.h>
#include <maya/MFnNurbsSurface.h>
#include <maya/MPoint.h>
#include <maya/MItMeshVertex.h>
#include <maya/MItSelectionList.h>
#include <maya/MItMeshPolygon.h>
#include <maya/MItMeshEdge.h>
#include <maya/MVector.h>
#include <maya/MPointArray.h>
#include <maya/MDoubleArray.h>
#include <maya/MPointArray.h>
#include <maya/MObject.h>
#include <maya/MFnTransform.h>
#include <maya/MStatus.h>
#include <vector>
#include <cmath>
using namespace std;

DeclareSimpleCommand( obhvatscale, "Carton", "7.0");

MStatus obhvatscale::doIt( const MArgList& args )
{
```

```

class obhvat
{
private: MDagPath Plane, Joint, Mesh;
double Rel;//

public:
obhvat (MDagPath plane, MDagPath joint, MDagPath mesh, double rel)

{
Plane=plane;
Joint=joint;
Mesh=mesh;
Rel=rel;
}
double misura()
{
MitMeshPolygon itPoly (Mesh);
double d=0;

MFnNurbsSurface PlaneFn(Plane);
MVector norm=PlaneFn.normal(0.5, 0.5, MSpace::kWorld);
MPoint crosplnpoint;
PlaneFn.getPointAtParam(0.5, 0.5, crosplnpoint, MSpace::kWorld);

MFnMesh mesh_clFn(Mesh);

double a_param, b_param, c_param, L, l;
unsigned int p0,p1,p2,ind;
int dummy, mummy1, mummy2, flag;
MPoint a, b, c, Point_a, Point_b, Point_c, Crosspoint_1, Crosspoint_2;
while ( !itPoly.isDone() )
{

p0=itPoly.vertexIndex(0);
p1=itPoly.vertexIndex(1);
p2=itPoly.vertexIndex(2);

mesh_clFn.getPoint(p0, Point_a, MSpace::kWorld);
mesh_clFn.getPoint(p1, Point_b, MSpace::kWorld);
mesh_clFn.getPoint(p2, Point_c, MSpace::kWorld);
}
}

```

```

a_param=norm.x*(Point_a.x-crosplnpoint.x)+norm.y*(Point_a.y-
crosplnpoint.y)+norm.z*(Point_a.z-crosplnpoint.z);
b_param=norm.x*(Point_b.x-crosplnpoint.x)+norm.y*(Point_b.y-
crosplnpoint.y)+norm.z*(Point_b.z-crosplnpoint.z);
c_param=norm.x*(Point_c.x-crosplnpoint.x)+norm.y*(Point_c.y-
crosplnpoint.y)+norm.z*(Point_c.z-crosplnpoint.z);

dummy=-1;
if (((a_param*b_param) <0) && ((a_param*c_param) <0)) {dummy=p0; mummy1=p1;
mummy2=p2;}

if ((b_param*c_param) <0) && ((b_param*c_param) <0)) {dummy=p1; mummy1=p0;
mummy2=p2;}

if (((c_param*b_param) <0) && ((c_param*a_param) <0)) {dummy=p2; mummy1=p0;
mummy2=p1;}

if (dummy!=-1)
{
mesh_clFn.getPoint(dummy, Point_a, MSpace::kWorld);
mesh_clFn.getPoint(mummy1, Point_b, MSpace::kWorld);
mesh_clFn.getPoint(mummy2, Point_c, MSpace::kWorld);

L=PlaneFn.distanceToPoint(Point_a, MSpace::kWorld);
if (L<2.5)
{
l=abs(norm.x*(Point_a.x-Point_b.x)+norm.y*(Point_a.y-
Point_b.y)+norm.z*(Point_a.z-Point_b.z));

Crosspoint_1.x=Point_a.x+(Point_b.x-Point_a.x)*(L/l);
Crosspoint_1.y=Point_a.y+(Point_b.y-Point_a.y)*(L/l);
Crosspoint_1.z=Point_a.z+(Point_b.z-Point_a.z)*(L/l);

l=abs(norm.x*(Point_a.x-Point_c.x)+norm.y*(Point_a.y-
Point_c.y)+norm.z*(Point_a.z-Point_c.z));

Crosspoint_2.x=Point_a.x+(Point_c.x-Point_a.x)*(L/l);
Crosspoint_2.y=Point_a.y+(Point_c.y-Point_a.y)*(L/l);
Crosspoint_2.z=Point_a.z+(Point_c.z-Point_a.z)*(L/l);

d=d+Crosspoint_1.distanceTo(Crosspoint_2);

```

```
}  
}  
itPoly.next();  
}  
return d;  
}  
void scale(double Sc_y, double Sc_z)  
{  
MFnTransform jointFn(Joint);  
double scale [3];  
jointFn.getScale(scale);  
scale[0]=1;  
scale[1]=scale[1]+(Sc_y-1);  
scale[2]=scale[2]+(Sc_z-1);  
  
jointFn.setScale(scale);  
}  
}; // конец класса  
  
MString mesh_body_name;  
MString mesh_cloth_name;  
  
MString joint_0_name;  
MString joint_1_name;  
MString joint_2_name;  
MString joint_3_name;  
MString joint_4_name;  
  
MString crossplane_0_name;  
MString crossplane_1_name;  
MString crossplane_2_name;  
MString crossplane_3_name;  
MString crossplane_4_name;  
  
MSelectionList list;  
  
MDagPath mesh_body_node;  
MDagPath mesh_cloth_node;  
MDagPath joint_node;  
MDagPath crossplane_node;
```

```

MObject mesh_body_obj;
MObject mesh_cloth_obj;
MObject joint_obj;
MObject crossplane_obj;

double rel_0, rel_1, rel_2, rel_3, rel_4, rel_5, rel_6, rel_7, rel_8, rel_9;

const MString get_mesh_body_command = "get_mesh_name()";
const MString get_mesh_cloth_command = "get_mesh_cloth_name()";
const MString get_joint_0_command = "get_jnt_0()";
const MString get_joint_1_command = "get_jnt_1()";
const MString get_joint_2_command = "get_jnt_2()";
const MString get_joint_3_command = "get_jnt_3()";
const MString get_joint_4_command = "get_jnt_4()";

const MString get_crossplane_0_command = "get_pln_0()";
const MString get_crossplane_1_command = "get_pln_1()";
const MString get_crossplane_2_command = "get_pln_2()";
const MString get_crossplane_3_command = "get_pln_3()";
const MString get_crossplane_4_command = "get_pln_4()";

const MString get_rel_0_command = "get_stretch_0()";
const MString get_rel_1_command = "get_stretch_1()";
const MString get_rel_2_command = "get_stretch_2()";
const MString get_rel_3_command = "get_stretch_3()";
const MString get_rel_4_command = "get_stretch_4()";

MGlobal ::executeCommand (get_mesh_body_command, mesh_body_name);
MGlobal ::executeCommand (get_mesh_cloth_command, mesh_cloth_name);
MGlobal ::executeCommand (get_joint_0_command, joint_0_name);
MGlobal ::executeCommand (get_joint_1_command, joint_1_name);
MGlobal ::executeCommand (get_joint_2_command, joint_2_name);
MGlobal ::executeCommand (get_joint_3_command, joint_3_name);
MGlobal ::executeCommand (get_joint_4_command, joint_4_name);

MGlobal ::executeCommand (get_crossplane_0_command, crossplane_0_name);
MGlobal ::executeCommand (get_crossplane_1_command, crossplane_1_name);
MGlobal ::executeCommand (get_crossplane_2_command, crossplane_2_name);
MGlobal ::executeCommand (get_crossplane_3_command, crossplane_3_name);
MGlobal ::executeCommand (get_crossplane_4_command, crossplane_4_name);

```

```

MGlobal ::executeCommand (get_rel_0_command, rel_0);
MGlobal ::executeCommand (get_rel_1_command, rel_1);
MGlobal ::executeCommand (get_rel_2_command, rel_2);
MGlobal ::executeCommand (get_rel_3_command, rel_3);
MGlobal ::executeCommand (get_rel_4_command, rel_4);
obhvat* massiv[5];
double ishodnik[5];
double rel_mas [5] = {rel_0, rel_1, rel_2, rel_3, rel_4};
MStatus st1, st2, st3;
unsigned int col=0;

list.add(mesh_cloth_name);
list.add(joint_0_name);
list.add(crossplane_0_name);

list.getDagPath(0,mesh_cloth_node);
list.getDagPath(1,joint_node);
list.getDagPath(2,crossplane_node);

obhvat obhv_0 (crossplane_node,joint_node,mesh_cloth_node, rel_0);
massiv[0]=&obhv_0;
ishodnik[0]=massiv[0]->misura();

list.clear();

list.add(mesh_cloth_name);
list.add(joint_1_name);
list.add(crossplane_1_name);

list.getDagPath(0,mesh_cloth_node);
list.getDagPath(1,joint_node);
list.getDagPath(2,crossplane_node);

obhvat obhv_1(crossplane_node,joint_node,mesh_cloth_node, rel_1);
massiv[1]=&obhv_1;
ishodnik[1]=massiv[1]->misura();

list.clear();

list.add(mesh_cloth_name);
list.add(joint_2_name);

```

```

list.add(crossplane_2_name);

list.getDagPath(0,mesh_cloth_node);
list.getDagPath(1,joint_node);
list.getDagPath(2,crossplane_node);

obhvat obhv_2(crossplane_node,joint_node,mesh_cloth_node, rel_2);
massiv[2]=&obhv_2;
ishodnik[2]=massiv[2]->misura();

list.clear();

list.add(mesh_cloth_name);
list.add(joint_3_name);
list.add(crossplane_3_name);

list.getDagPath(0,mesh_cloth_node);
list.getDagPath(1,joint_node);
list.getDagPath(2,crossplane_node);

obhvat obhv_3(crossplane_node,joint_node,mesh_cloth_node, rel_3);
massiv[3]=&obhv_3;
ishodnik[3]=massiv[3]->misura();

list.clear();

list.add(mesh_cloth_name);
list.add(joint_4_name);
list.add(crossplane_4_name);

list.getDagPath(0,mesh_cloth_node);
list.getDagPath(1,joint_node);
list.getDagPath(2,crossplane_node);

obhvat obhv_4(crossplane_node,joint_node,mesh_cloth_node, rel_4);
massiv[4]=&obhv_4;
ishodnik[4]=massiv[4]->misura();

list.clear();

for (int i=0; i<5; i++)

```

```

    {
while ((massiv[i]->misura())>(ishodnik[i]*rel_mas[i]))
{
massiv[i]->scale(0.95, 0.95);
};
};
for (int i=0; i<5; i++)
{
while ((massiv[i]->misura())<(ishodnik[i]*rel_mas[i]))
{
massiv[i]->scale(1.02, 1.02);
};
};
for (int i=0; i<5; i++)
{
while ((massiv[i]->misura())>(ishodnik[i]*rel_mas[i]))
{
massiv[i]->scale(0.95, 0.95);
};
};
MStatus stat = MS::kSuccess;
MDoubleArray result;
for (int i=0; i<5; i++){result.append((ishodnik[i]-(massiv[i]-
>misura()))/ishodnik[i]);}
setResult(result);
return stat;
}

```

**Листинг программы расчета положения вершин
развертки плагин-модуля «SeeJeeCAD 1»
Система Windows XP/SP3, язык программирования C++,объем 156 строк**

```

// File: orientedsurflatCmd.cpp
//
// MEL Command: orientedsurflat
//
// Author: Maya Plug-in Wizard 2.0
//
#include <maya/MSimple.h>
#include <maya/MGlobal.h>
#include <maya/MSelectionList.h>
#include <maya/MDagPath.h>
#include <maya/MString.h>
#include <maya/MFnNurbsCurve.h>
#include <maya/MFnMesh.h>
#include <maya/MFnNurbsSurface.h>
#include <maya/MPoint.h>

```



```

#include <maya/MItMeshVertex.h>
#include <maya/MItSelectionList.h>
#include <maya/MItMeshPolygon.h>
#include <maya/MItMeshEdge.h>
#include <maya/MVector.h>
#include <maya/MPointArray.h>
#include <maya/MDoubleArray.h>
#include <maya/MPointArray.h>
#include <maya/MObject.h>
#include <vector>
#include <cmath>
#include <algorithm>
using namespace std;

DeclareSimpleCommand( orientedsurflat, "Orientedsurflat", "7.0");

MStatus orientedsurflat::doIt( const MArgList& args )
{
MSelectionList list;
MDagPath mesh_node;
MDagPath mesh_cloth_node;

MString mesh_name;
MString mesh_cloth_name;

int choise;
double toler, sdvig_max;
int kul, kv1, ku2, kv2, kG;

const MString get_mesh_command = "get_mesh_name()";
const MString get_mesh_cloth_command = "get_mesh_cloth_name()";
const MString get_toler_command = "get_toler()";
const MString get_kul_command = "get_kul()";
const MString get_ku2_command = "get_ku2()";
const MString get_kv1_command = "get_kv1()";
const MString get_kv2_command = "get_kv2()";
const MString get_kG_command = "get_kG()";
const MString get_sdvig_command = "get_sdvig()";

MGlobal ::executeCommand (get_mesh_command, mesh_name);
MGlobal ::executeCommand (get_mesh_cloth_command, mesh_cloth_name);
MGlobal ::executeCommand (get_toler_command, toler);
MGlobal ::executeCommand (get_kul_command, kul);
MGlobal ::executeCommand (get_ku2_command, ku2);
MGlobal ::executeCommand (get_kv1_command, kv1);
MGlobal ::executeCommand (get_kv2_command, kv2);
MGlobal ::executeCommand (get_kG_command, kG);
MGlobal ::executeCommand (get_sdvig_command, sdvig_max);

list.add(mesh_name);
list.add(mesh_cloth_name);

list.getDagPath(0,mesh_node);
list.getDagPath(1,mesh_cloth_node);

MFnMesh meshFn(mesh_node);
MFnMesh mesh_clFn(mesh_cloth_node);
MItMeshVertex mesh_vertIt (mesh_node);

unsigned int p0,p1,p2,ind;

```

```

int dummy;
MColor color;

MGlobal::getActiveSelectionList( list );
MItSelectionList it( list );

MDagPath dagPath;
MObject component;
MPoint a, b, c, Point_a, Point_b, Point_c;
double ua, va, ub, vb, uc, vc, Rua, Rub, Ruc, Rva, Rvb, Rvc, d, Euu, Evv, Euv, Fuu, Fvv,
Fuv;

unsigned int nV=meshFn.numVertices();
double *Perekos=new double [nV];
for (unsigned int j=0; j<nV; j++) Perekos[j]=0;
double *Scale_x=new double [nV];
for (unsigned int j=0; j<nV; j++) Scale_x[j]=0;
double *Scale_z=new double [nV];
for (unsigned int j=0; j<nV; j++) Scale_z[j]=0;
MVector *forces=new MVector [nV];
for (unsigned int j=0; j<nV; j++) forces[j]=MVector::zero;
int *nomer=new int [nV];
for (unsigned int j=0; j<nV; j++) nomer[j]=j;
random_shuffle (nomer, nomer+nV);

it.getDagPath( dagPath, component );
MItMeshPolygon itPoly ( dagPath, component );

MVector Fa, Fb, Fc;
MVector ex(1,0,0), ez(0,0,1);
while ( !itPoly.isDone() )
{
p0=itPoly.vertexIndex(0);
p1=itPoly.vertexIndex(1);
p2=itPoly.vertexIndex(2);
meshFn.getPoint(p0, a, MSpace::kWorld);
meshFn.getPoint(p1, b, MSpace::kWorld);
meshFn.getPoint(p2, c, MSpace::kWorld);
mesh_clFn.getPoint(p0, Point_a, MSpace::kWorld);
mesh_clFn.getPoint(p1, Point_b, MSpace::kWorld);
mesh_clFn.getPoint(p2, Point_c, MSpace::kWorld);

ua=a[2];
va=a[0];
ub=b[2];
vb=b[0];
uc=c[2];
vc=c[0];
d=ua*(vb-vc)+ub*(vc-va)+uc*(va-vb);
Rua=(vb-vc)/d;
Rub=(vc-va)/d;
Ruc=(va-vb)/d;
Rva=(uc-ub)/d;
Rvb=(ua-uc)/d;
Rvc=(ub-ua)/d;

MVector Pa(Point_a);
MVector Pb(Point_b);
MVector Pc(Point_c);
MVector U(Rua*Pa+Rub*Pb+Ruc*Pc);
MVector V(Rva*Pa+Rvb*Pb+Rvc*Pc);

```

```

Euu=U.length()-1;
Evv=V.length()-1;
Euv=((U+V).length()-(U-V).length())/1.41421356;

if(Evv>=0) Fvv=Evv*kv1;
else Fvv=Evv*kv2;
if(Euu>=0) Fuu=Euu*ku1;
else Fuu=Euu*ku2;
Fuv=Euv*kG;//*50;// /250;//Fuv=Euv*50;

forces[p0] += d*((Rua*Fuu+Rva*Fuv)*ez/2 + (Rua*Fuv+Rva*Fvv)*ex/2); // z и x
поменял местами
forces[p1] += d*((Rub*Fuu+Rvb*Fuv)*ez/2 + (Rub*Fuv+Rvb*Fvv)*ex/2);
forces[p2] += d*((Ruc*Fuu+Rvc*Fuv)*ez/2 + (Ruc*Fuv+Rvc*Fvv)*ex/2);

itPoly.next();
}

mesh_vertIt.reset();

double delta_f(0);

for (unsigned int j=0; j<nV; j++)
{
ind=nomer[j];
mesh_vertIt.setIndex(ind, dummy);

MVector translate(forces[ind].x/(kv2*10),0,forces[ind].z/(kv2*10)
    if (translate.length()>sdvig_max)//0.25) {
translate.normalize();
translate=translate*sdvig_max; //*0.25
}

mesh_vertIt.translateBy(translate, MSpace::kWorld);

delta_f+=forces[ind].length()*forces[ind].length();
}

double nn=meshFn.numVertices();
delta_f=(1/nn)*delta_f;

double result;

result=delta_f;

setResult( result );

delete[] Perekos;
delete[] Scale_x;
delete[] Scale_z;
delete[] forces;
delete[] nomer;
//delete[] cos_x;
MStatus stat = MS::kSuccess;

return stat;
}

```

Приложение 6

Акт внедрения

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе –
директор ИНПО
ФГБОУ ВО "ИВГПУ"



[Signature]
В.В. Шутенко
13 октября 2017 г.

АКТ

внедрения в учебный процесс

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»
результатов диссертационной работы Тисленко Ильи Владимировича

Результаты диссертационной работы аспиранта кафедры конструирования швейных изделий Тисленко И.В. на тему «Разработка метода проектирования трикотажной компрессионной одежды» внедрены в учебный процесс кафедры конструирования швейных изделий.

Вид внедрения – использование информационного обеспечения, технологии проектирования и алгоритмов построения компрессионной одежды в учебном и научно-исследовательском процессах магистров по направлению подготовки 29.04.05 «Конструирование изделий легкой промышленности» и аспирантов по программе подготовки научно-педагогических кадров по направлению 26.09.01 Технологии легкой промышленности.

Время внедрения: октябрь 2016 - сентябрь 2017 гг.

Вид внедрения:

1. В дисциплину магистров «Научно-технический семинар» включены основные теоретические и прикладные аспекты диссертационной работы.

2. В дисциплины аспирантов "Теория и практика автоматизированного проектирования одежды", "Методы прогнозирования объемно-пространственной формы одежды", "Антропометрическое обоснование проектирования одежды с разными требованиями к посадке" включены базы данных о морфологии фигур, показателях свойств материалов, методах измерения компрессионного давления одежды на тело, алгоритм проектирования компрессионной одежды, фрагменты программы по генерированию разверток по виртуальной модели "аватар - замкнутая оболочка".

Результаты исследования используются в настоящее время.

Эффективность внедрения – получение студентами знаний, умений и навыков проектирования компрессионной одежды с использованием компьютерных технологий.

Директор планирования и
организации учебного процесса
Директор Текстильного института
ИВГПУ
Декан факультета технологий
текстиля и индустрии моды
Заведующий кафедрой КШИ

Е.В. Зиновьева

Н.А. Кулида

А.А. Тувин

В.Е. Кузьмичев