

3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЛЕГКОДЕФОРМИРУЕМОЙ СТРУКТУРЫ

Наиболее важными свойствами легкодеформируемых текстильных материалов (ЛДТМ), влияющими на принятие проектных решений при определении конструктивных параметров изделий, а также при разработке информационно-технического обеспечения подготовительно-раскройных процессов швейного производства, являются деформационные характеристики. Учитывая этот факт, совершенствование подготовки производства должно быть связано, в первую очередь, с повышением качества и достоверности исходной информации о деформационных свойствах ЛДТМ. Решение данной задачи предполагает разработку новых методов исследований напряженно-деформированного состояния материалов на различных этапах жизненного цикла изделий.

Данная глава посвящена теоретическому обоснованию и разработке принципиально новых методов и исследованию на их базе деформационных свойств текстильных материалов легкодеформируемой структуры.

3.1. Разработка метода и исследование деформационных свойств высокоэластичных материалов при фиксированной ширине пробы

Установлено, что на процесс проектирования плотно облегающей одежды из трикотажных полотен, в том числе высокоэластичных, наибольшее влияние оказывают их деформационные свойства, и, прежде всего растяжимость и степень поперечного сокращения материала, которые, по сути, определяют величину проектируемой деформации при надевании изделия и должны учитываться при расчете конструктивных параметров. Существующие методы проектирования трикотажных изделий учитывают, в основном, значения характеристик растяжимости материала при определении величины процента заужения деталей. Величина поперечного сокращения напрямую не

фигурирует в расчетах конструктивных параметров, что не позволяет научно-обоснованно подходить к решению задачи по определению величины удлинения детали изделия после заужения.

Это связано, в первую очередь, с тем, что стандартные методы определения показателей растяжимости при нагрузках меньше разрывных [102, 103] не позволяют достаточно точно определять величину поперечного сокращения, происходящего в материале при одноосном растяжении. Измерение поперечных размеров нагруженного образца осложняется возникновением краевого эффекта, суть которого заключается в закручивании пробы по срезам, с одной стороны, и значительно большем искажении структуры полотна по краям образца, с другой стороны. В связи с этим при экспериментальном определении поперечного сокращения образца материала возникает необходимость компенсации возникающего краевого эффекта.

Кроме того, анализ качества посадки макетов, изготовленных с использованием в качестве исходных данных результатов определения растяжимости полотен стандартными методами, показал, что при надевании изделий происходит искажение формы основных конструктивных линий на опорных участках из-за значительной степени заужения деталей. Это связано с тем, что одноосное растяжение материала не соответствует реальным условиям его деформирования при надевании изделия. Анализ характера деформирования материала при надевании плотно облегающего изделия показал, что в одежде для достижения размерного соответствия фиксируется положение двух противоположных линий (срезов), а именно линии плечевых срезов и линии низа изделия, а реальное растяжение под действием прикладываемой внешней силы происходит только в поперечном направлении. Для приближения условий проведения эксперимента к реальным условиям деформирования материала в плотно облегающем изделии необходимо разработать новый метод исследования деформационных свойств ВЭМ, позволяющий проводить изучение растяжимости, эластичности и остаточной деформации при фиксированной ширине пробы. Кроме того, метод должен предусматривать

возможность компенсации краевого эффекта при определении степени поперечного сокращения.

3.1.1 Разработка метода исследования деформационных свойств высокоэластичных трикотажных полотен

Для получения точной исходной информации о деформационных свойствах ВЭМ, необходимой при проектировании изделий, для определения их растяжимости, эластичности, остаточной деформации и степени поперечного сокращения на кафедре сервиса и моды ВГУЭС на базе стандартного метода, изложенного в ГОСТ 8847-85, был разработан новый метод исследования деформационных свойств. Основными отличительными чертами предложенного метода являются:

- во-первых, возможность закрепления боковых срезов элементарной пробы при определении показателей растяжимости во избежание возможного поперечного сокращения, т.е. их определение при фиксированной ширине образца, что соответствует характеру деформирования материала при надевании изделия;

- во-вторых, увеличенная ширина пробы, что позволяет при определении величины поперечного сокращения осуществлять замеры в средней зоне образца материала (рабочая зона), где краевой эффект не действует

Определение растяжимости, остаточной деформации и степени поперечного сокращения проводят на специально подготовленных пробах.

Отбор образцов и подготовку проб к проведению испытаний производят следующим образом. Отобранные в соответствии со стандартной методикой образцы (точечные пробы) предварительно выдерживают в климатических условиях, соответствующих требованиям ГОСТ 10681 [104] в течение не менее 24 часов. Для определения растяжимости, остаточной деформации и поперечного сокращения из точечных проб готовят отдельно по пять элементарных проб прямоугольной формы длиной (200 ± 1) мм.

Элементарные пробы, предназначенные для определения растяжимости

и эластичности, выкраивают шириной 190 мм. Затем проба складывается пополам, и на ней на расстоянии 20 мм с обеих сторон намечают линии, ограничивающие основную ширину пробы – 150 мм. Углы пробы вырезают по намеченным линиям под размер крепления в приспособлении. Длина выреза на верхних углах составляет 17 мм, а на нижних углах – 10 мм в соответствии с рисунком 3.1,а. После вырезания элементарная проба расправляется. Образовавшиеся боковые выступы складывают вдвое и сшивают швами, выполненными строчками цепного стежка на плоскошовной машине. Затем элементарную пробу повторно складывают пополам и сшивают по верхним срезам на стачивающе-обметочной машине (рис. 3.1, б), получая, таким образом, кольцеобразные пробы. Элементарные пробы для определения остаточной деформации готовят по аналогичной методике.

Для определения поперечного сокращения готовят прямоугольные пробы с шириной (150 ± 1) мм, которые складывают вдвое и соединяют верхние срезы пробы на стачивающе-обметочной машине. На пробе намечают вертикальную и горизонтальную оси, а также границы рабочей зоны, как показано на рисунке 3.2, путем прокладывания строчек ручного стежка с длиной стежка 3-5 мм, концы ниток при этом оставляют свободными.

Перед испытаниями элементарные пробы выдерживают при климатических условиях, соответствующих требованиям ГОСТ 10681[104], в течение 24 часов.

Для проведения испытаний применяют машину разрывную типа ИР – 50 62-05 с диапазоном измерения усилий от 0,2 до 500 Н со специально разработанным спецприспособлением. Спецприспособление позволяет фиксировать боковые стороны пробы скобами, сохраняя тем самым ширину пробы при продольном приложении нагрузки и, как следствие, при ее растяжении постоянной. Общий вид разработанного спецприспособления, установленного на разрывной машине, представлен на рисунке 3.3.

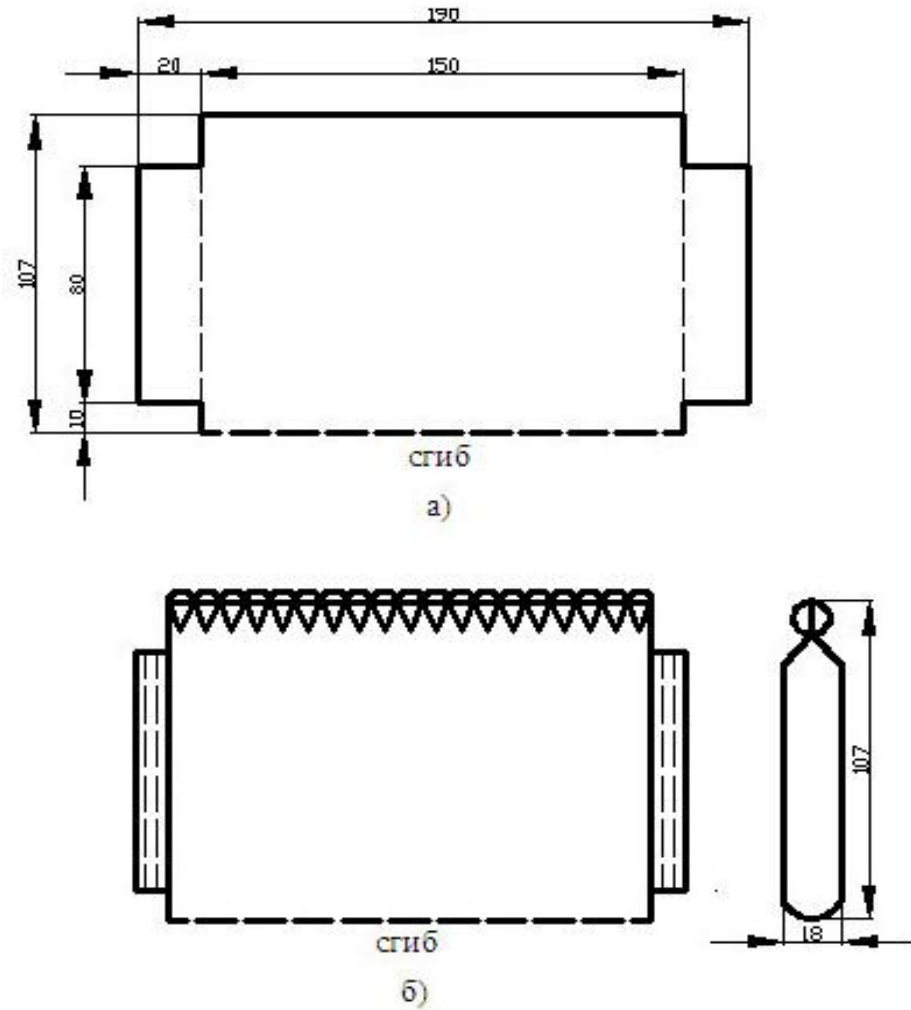


Рисунок 3.1 –Проба для определения величины растяжимости, эластичности, необратимой деформации: а – схема раскроя; б- готовая проба

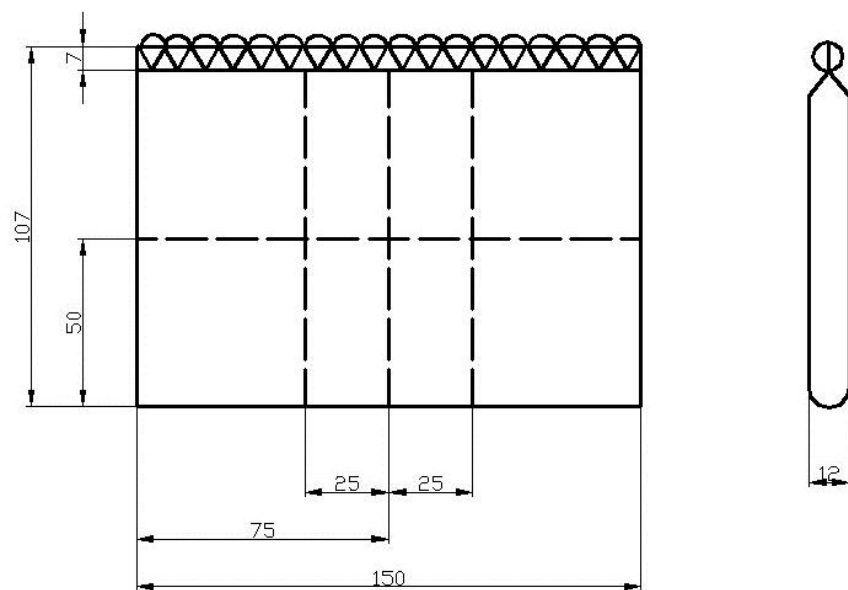


Рисунок 3.2 - Проба для определения величины поперечного сокращения

Разработанное спецприспособление, схема которого дана на рисунке 3.4, представляет собой две стальных рамки 1 и 1¹ со съемной верхней частью в виде стяжных болтов 2 и 2¹. На боковых частях обеих рамок имеются специальные технологические отверстия-петли в виде «ушек» 4 и 4¹, в которые продеваются съемные скобы-спицы 3, играющие роль фиксаторов ширины элементарной пробы.

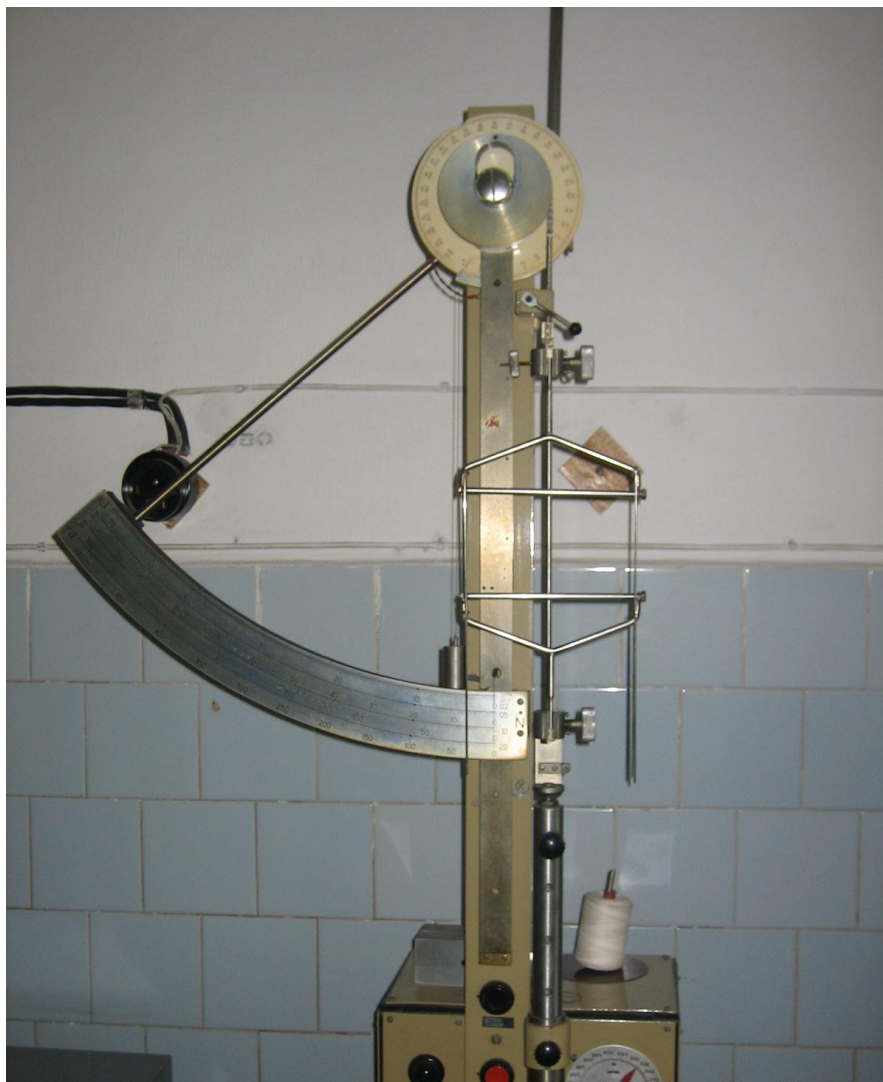


Рисунок 3.3 – Общий вид спецприспособления для определения характеристик деформационных свойств материалов

Для определения растяжимости спецприспособление в зажимах разрывной машины предварительно устанавливают так, чтобы периметр, огибающий стяжные болты рамок, был равен 200 мм. Подготовленную элементар-

ную пробу надевают на стяжные болты рамок спецприспособления таким образом, чтобы шов находился на верхней рамке. Боковые срезы фиксируются с помощью скоб, продетых между слоями материала в боковые застроченные срезы пробы и в отверстия – «ушки» спецприспособления.

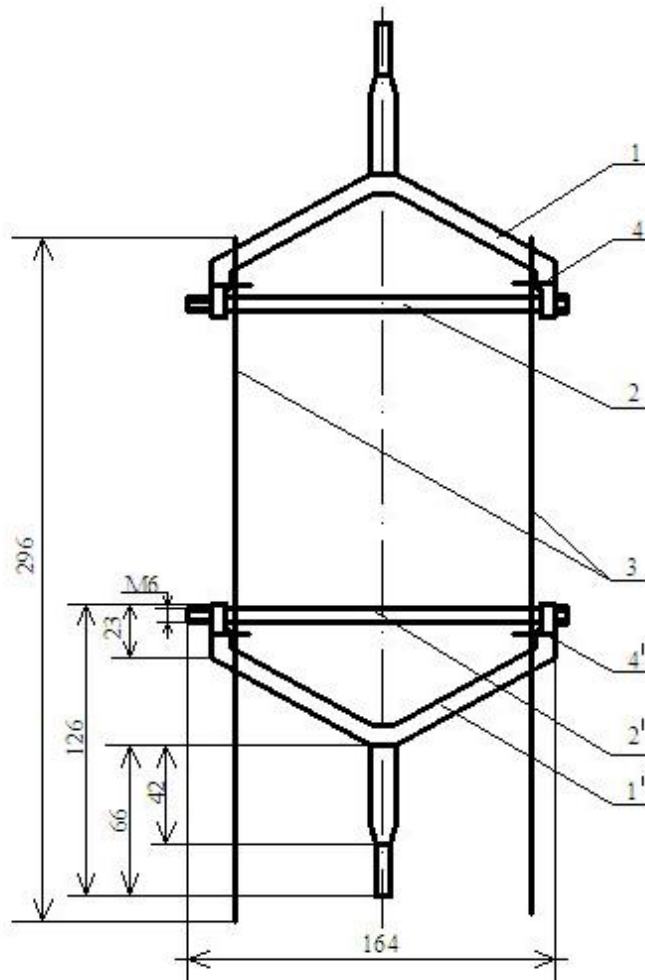


Рисунок 3.4 - Схема спецприспособления

В момент приложения нагрузки 18 Н (с учетом стандартной нагрузки 1,2 Н/м) по шкале удлинения определяют приращение длины пробы, по величине которого рассчитывают растяжимость полотна.

Для определения эластичности, также как и при стандартной методике, после деформирования элементарной пробы нижний рычаг прибора возвращают в исходное положение и измеряют длину элементарной пробы сразу после разгрузки, т. е. по истечении не более 10 секунд.

Определение необратимой деформации производится на отдельно подготовленных в соответствии с выше описанной методикой элементарных пробах. Величина прикладываемой нагрузки равна 18 Н из-за увеличенной ширины пробы. При этом, в целом, методика исследования соответствует стандартной (ГОСТ 8847-85).

При определении характеристик растяжимости полотен специального назначения, например предназначенных для изготовления одежды спортсменов, занимающихся профессиональным спортом, величина нагрузки, прикладываемой к элементарной пробе при определении растяжимости и остаточной деформации, может меняться в сторону увеличения и соответствовать максимальным эксплуатационным нагрузкам. Расчет величины прикладываемой нагрузки может проводится по суммарной линейной плотности нитей в образце в соответствии с методикой, предложенной в работах [28, 105].

Для определения величины поперечного сокращения пробу с вышеназванными размерами и нанесенными осевыми линиями надевают на зажимы спецприспособления без фиксации боковых срезов. Затем растягивают на величину, соответствующую приращению длины пробы в момент приложения нагрузки, равной по величине усилию, действующему на пробу при определении растяжимости (для полотен бытового назначения - 18 Н). При этом измеряют расстояние между линиями, ограничивающими рабочую зону пробы, по горизонтальной осевой линии и по полученным значениям рассчитывают процент поперечного сокращения.

При обработке результатов показатели растяжимости, эластичности и остаточной деформации определяют с учетом рекомендаций ГОСТ 8847-85.

Растяжимость полотна, %, рассчитывают по формуле:

$$\varepsilon_s = (L_1 - L_0) \cdot 100 / L_0, \quad (3.1)$$

где,

L_1 – длина рабочей части элементарной пробы в нагруженном состоянии, мм;

L_0 – длина рабочей части элементарной пробы до испытания, мм.

Эластичность \mathcal{E} , % определяют по формуле:

$$\mathcal{E} = (L_1 - L_2) / (L_1 - L_0) \cdot 100, \quad (3.2)$$

где,

L_2 – длина рабочей части элементарной пробы сразу после разгрузки, мм.

Расчет остаточной деформации, %, производят по формуле:

$$\varepsilon_n = (L_3 - L_0) \cdot 100 / L_0, \quad (3.3)$$

где,

L_3 – длина рабочей части элементарной пробы после воздействия статической нагрузки в течение времени t_1 , разгрузки и отдыха в течение времени t_2 , мм.

Для расчета процента поперечного сокращения, %, предложена следующая формула:

$$\varepsilon_{n.c.} = (B_0 - B_1) \cdot 100 / B_0, \quad (3.4)$$

где

B_0 – первоначальная ширина рабочей зоны, мм,

B_1 – ширина рабочей зоны по горизонтальной осевой линии после поперечного сокращения пробы, мм

Полученные характеристики деформационных свойств могут быть использованы для расчета базового предела заужения и величины относительного удлинения деталей при расчете конструктивных параметров в соответствии методикой, рассмотренной в главе 4.

3.1.2 Апробация метода и исследование деформационных свойств высокоэластичных полотен

С использованием разработанного метода были исследованы около ста высокоэластичных трикотажных полотен, характеристика некоторых из которых дана в таблице 3.1, и определены характеристики их растяжимости, эластичности, остаточной деформации и поперечного сокращения.

Таблица 3.1 - Характеристика структуры исследуемых полотен

№ образца	Способ выработки и переплетение	Вид применяемых волокон	Пов. плотность, г/м ²	Толщина, мм
1	п/в, гладь	ПЭ+ПУ	205	0,53
2	п/в, гладь	ПЭ+ПУ	195	0,59
3	п/в, жаккард	ПЭ+ПУ	253	0,95
4	п/в, гладь	ПЭ+ПУ	215	0,67
5	п/в, гладь	ПЭ+ПУ	207	0,62
6	п/в, гладь	ПЭ+ПУ	136	0,52
7	п/в, гладь	ПЭ+ПУ	176	0,77
8	п/в, гладь	Шерсть+ПУ	327	1,13
9	п/в, ластик 1x1	Вс+Ац+ПУ	131	0,68
10	п/в, гладь	ПАН+ПУ	244	0,96
11	п/в, гладь	Хлопок+ПУ	204	0,67
12	п/в, гладь	ПЭ+ПАН+ПУ	327	1,13
13	п/в, гладь	ПЭ+ПУ	228	0,95
14	п/в, гладь	ПЭ+ПУ	210	0,77
15	о/в, комбинированное	ПЭ+ПУ	214	0,89
16	п/в, гладь	ПЭ+ПУ	292	0,99
17	п/в, гладь	ПЭ+ПУ	216	0,53
18	о/в, комбинированное	ПЭ+ПУ	113	0,54
19	о/в, комбинированное	ПЭ+ПУ	124	0,49
20	п/в, ластик 2x2	хлопок + +ПЭ+ПУ	276	1,05

Примечание: Принятые в таблице условные обозначения: п/в – поперечновязаное, о/в – основовязаное, ПЭ – полиэфирное волокно, ПАН – полиакрилонитрильное волокно, Вс – вискоза, Ац – ацетатное волокно, ПУ – полиуретановое волокно.

В первую очередь исследовалась растяжимость полотна, как наиболее важная характеристика высокоэластичных материалов, используемая при расчете конструктивных параметров плотно облегающей одежды. В литературе [20] существуют рекомендации по раскрою трикотажных полотен. При раскрое расположение долевой линии определяется направлением, в котором трикотаж имеет меньшую растяжимость, т.е. поперечновязаные полотна раскраиваются вдоль петельных столбиков, а основовязаные – вдоль петельных рядов. В ходе предварительных исследований установлено, что растяжимость поперечновязаных высокоэластичных полотен всегда выше вдоль петельных рядов, в связи с чем определение характеристик деформационных свойств таких материалов целесообразно проводить только в данном направлении. Растяжимость основовязаных полотен может быть больше как вдоль петельных столбиков, так и вдоль петельных рядов, что требует проведения исследований таких полотен в обоих направлениях. Это требуется, в том числе, для установления направления раскроя основовязаного высокоэластичного трикотажного полотна. Результаты определения растяжимости, эластичности, остаточной деформации и процента поперечного сокращения приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Результаты исследований характеристик деформационных свойств высокоэластичных трикотажных полотен

№ образца	Растяжимость, %	Ост. деформация, %	Относ. попереч. сокращение, %	Эластичность э, %
1	49,4	1,4	15,8	96,76
2	34,1	0,7	25,6	96,19
3	47,6	1,5	2,0	98,53
4	35,2	1,1	3,4	98,00
5	53,4	2,0	15,0	97,80
6	26,1	1,4	4,0	97,30
7	17,4	1,0	1,4	97,70
8	67,0	1,7	33,6	97,50
9	70,1	1,6	1,2	97,70

Продолжение табл. 3.2

10	69,0	1,9	4,4	96,09
11	30,8	1,0	2,0	98,70
12	19,2	0,2	2,6	96,31
13	57,6	1,8	7,6	98,10
14	37,6	1,4	3,2	98,93
15	30,0	1,3	4,4	94,33
16	22,0	0,2	4,8	96,00
17	59,2	1,9	3,2	98,28
18	12,4*	0,1*	7,6	99,20
19	31,2*	1,0*	2,0	98,85
20	29,3	0,4	2,4	98,84

Примечание: * - приведены значения растяжимости и остаточной деформации вдоль петельных столбиков как максимальные.

Как видно из таблицы 3.2 растяжимость ВЭМ колеблется в значительных пределах – от 10 % до 70 %, что объясняется большим разнообразием показателей структуры материалов. В общем случае растяжимость и остаточная деформация основовязаных полотен несколько ниже, чем поперечновязаных. При этом основовязаные полотна показывают максимальную растяжимость как вдоль петельных рядов (образец № 15), так и вдоль петельных столбиков (образцы №№ 18 и 19), а поперечновязаные – вдоль петельных рядов. Учитывая вышеизложенное, при раскрое деталей одежды из кулирных полотен долевую следует располагать вдоль петельных столбиков, а основовязаных – вдоль направления, показывающего меньшую растяжимость. Эластичность практически всех исследованных образцов трикотажных полотен превышает 96 %, что свидетельствует об их высокой эластичности. Величина остаточной деформации также для всех без исключения материалов не превышает 2 %, что позволяет не учитывать ее при проектировании швейных изделий.

Значения относительного поперечного сокращения также колеблются в довольно широком диапазоне – от 1,2 % до 33,6 %. При этом явной зависимости между величинами растяжимости и относительного поперечного со-

кращения не выявлено. Полотна, имеющие близкие значения растяжимости, могут проявлять различную степень поперечного сокращения. Так, образец № 8 при растяжимости 67 % имеет величину относительного поперечного сокращения на уровне максимальных значений – 33,6 %, а образец № 9 с растяжимостью 70,1 % характеризуется поперечным сокращением 1,2 %.

Полученные значения характеристик (растяжимости, эластичности, остаточной деформации) необходимо учитывать при определении направления расположения деталей при раскрое. Наибольшее растяжение в плотно облегающей одежде происходит поперёк детали, поэтому при выборе направления необходимо учитывать наименьшую величину остаточной деформации и наибольшую величину растяжимости полотна. При несоответствии данных параметров целесообразно выбрать направление, в котором полотно имеет меньшее значение остаточной деформации.

Одним из наиболее важных этапов КТПП, где могут применяться результаты исследований деформационных свойств высокоэластичных материалов, является этап получения рациональных конструкций изделий. В связи с этим основные рекомендации по использованию результатов исследований деформационных свойств ВЭМ связаны, прежде всего, с проектированием швейных и трикотажных изделий.

В четвертой главе диссертации представлена разработанная методика определения базовых значений предела заужения и коэффициента удлинения деталей плотно облегающей одежды из ВЭМ с учетом значений растяжимости и относительного поперечного сокращения соответственно. Использование данной методики позволило рассчитать базовые пределы заужения и относительного удлинения для всех исследованных полотен. Результаты расчета пределов заужения и относительного удлинения по предложенной методике представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты расчета базовых пределов заужения и относительного удлинения

№ образца	Растяжимость ϵ , %	Предел заужения K_{ϵ} , %	Предел относительн. удлинения L , %
1	49.4	33.07	13.64
2	34.1	25.43	34.41
3	47.6	32.20	2.00
4	35.2	26.04	3.50
5	53.4	34.80	17.60
6	26.1	20.70	4.20
7	17.4	14.82	1.40
8	67.0	40.01	9.70
9	70.1	40.02	1.20
10	69.0	40.08	4.60
11	30.8	23.55	2.0
12	19.2	16.10	2.7
13	57.6	36.50	8.2
14	37.6	27.30	3.3
15	30.0	23.00	4.6
16	22.0	18.03	3.3
17	59.2	37.20	8.2
18	12.4	11.03	2.0
19	31.2	25.33	2.1
20	29.3	21,69	1.9

Как видно из таблицы 3.3, базовые значения пределов заужения (K) трикотажных изделий находятся в диапазоне от 15,0 до 41,0 %; а пределы удлинения (L) – от 1,0 до 38,0 %.

Результаты расчетов пределов заужения, полученные по предложенной методике, позволяют с учетом принятого для трикотажных изделий межразмерного интервала предложить принципиально новую классификацию ВЭМ и разработать рекомендации по установлению предельных конструктивных

параметров для полотен различных групп растяжимости. Разработанная классификация материалов по их растяжимости приведена в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Классификация высокоэластичных трикотажных полотен по группам растяжимости

Группа растяжимости	Растяжимость полотна ϵ , %
1 группа	До 20
2 группа	Св. 20 до 30
3 группа	Св. 30 до 45
4 группа	Св. 45 до 60
5 группа	Свыше 60

Для каждой группы растяжимости характерен определенный диапазон пределов заужения, после усреднения которых были получены рекомендуемые интервалы базовых пределов заужения, представленные в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Усредненные величины рекомендуемых базовых пределов заужения

Группа растяжимости	Интервал базовых пределов заужения К, %
1 группа	12-14
2 группа	20-22
3 группа	27-29
4 группа	34-36
5 группа	40

При макетной проработке изделий, изготовленных из исследованных полотен, с применением экспертных методов оценки установлено, что приведенные величины заужения являются предельными и могут применяться без ограничения для гладких полотен плотных структур. В то время как для полотен с фактурной поверхностью и набивным рисунком, а также полотен

рыхлых структур данные величины должны быть скорректированы в сторону уменьшения. Это связано с тем, что при значительных деформациях в перечисленных полотнох может происходить существенное нарушение эстетического внешнего вида. Материалам такой структуры и колористического оформления следует уделять особое внимание еще на этапе лабораторных испытаний. При этом максимальная степень растяжения должна определяться по критерию сохранения внешнего вида с помощью органолептической экспертной оценки.

3.2 Теоретические исследования и разработка методов исследования напряженно-деформированного состояния текстильных материалов при выполнении механических и термомеханических операций

Исходя из общей задачи разработки методологической базы проектирования и совершенствования подготовительно-раскройных процессов в производстве одежды из легкодеформируемых текстильных материалов, необходимо знать степень соответствия модельных построений экспериментальным данным, полученным при исследовании практикуемых технологических решений и технических средств в сопоставлении их с предлагаемыми поисковыми вариантами.

Судя по информационным источникам, особую сложность решения этих задач представляет собой возможность эффективно, надёжно и с требуемой точностью осуществлять измерение напряжённо-деформированного состояния (НДС) текстильных материалов легкодеформируемой структуры при их механической обработке, транспортировании по технологическому тракту и действию термомеханических факторов. Особой сложностью отличается задача измерения кинетики релаксации напряжения текстильных материалов при их фиксированной деформации. Умение физическими методами оценивать параметры НДС ЛДТМ в процессе их обработки позволяет выйти на новый методологический уровень проектирования, как технологических операций, так и технических систем их обеспечения.

С целью решения поставленных задач необходимо рассмотреть вопросы математического и компьютерного моделирования процессов обработки текстильных материалов в разных условиях и режимах, а также провести экспериментальные исследования на базе разработанных и апробированных принципиально новых физических методов оценки НДС и структуры движущихся материалов при действии механических и термомеханических факторов.

3.2.1 Моделирование и экспериментальные исследования релаксации напряжения текстильных материалов

Каждый раз при выборе режимов технологической обработки материалов на этапе подготовки производства швейных изделий того или иного ассортимента параметры подготовительно-раскройных операций, в том числе декатировочных процессов, и влажно-тепловой обработки (ВТО) определяются в основном опытным путём. Такой традиционный подход нерационален по многим оценочным критериям, в частности, по критериям ресурсосбережения, производительности труда и обеспечению технологического качества. В процессе производства требуется постоянная коррекция режимов работы технологического оборудования и адаптация процессов к требуемым условиям. Например, для обеспечения формоустойчивости швейных изделий при их эксплуатации на стадии ВТО определяют и корректируют опытным путём продолжительность действия рабочих органов технологического оборудования в зависимости от вида обрабатываемых материалов и режимов процесса (температуры, давления, влаги и т.д.). Как показали результаты научного поиска [106-108], решение задач по определению продолжительности релаксации возникающего напряжения при заданной величине фиксированной деформации материала инструментальными методами в настоящее время не представляется возможным из-за отсутствия эффективных методов и доступных технических средств.

Проведенный анализ специальной литературы и результаты патентного

поиска позволили выявить известные способы исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) различных материалов.

Так, известен способ определения характеристик НДС движущегося текстильного материала [128], заключающийся в том, что обеспечивают синхронизацию задаваемой строботаксометром частоты импульсной лампы с линейной скоростью движения материала и по наблюдаемому стробоскопическому эффекту и предварительно установленной зависимости частоты стробоскопического эффекта от натяжения материала рассчитывают значения натяжения для каждого вида материала, а затем по зависимости деформации от натяжения определяют деформацию материала.

Недостаток известного способа заключается в том, что он практически не обеспечивает возможность исследования релаксации напряжения легкодеформируемых текстильных материалов при фиксированной деформации.

Известны также и другие методы [109, 110] и экспериментальные приборы [111-113] для исследования НДС волокнистых материалов в условиях действия механических и термомеханических факторов.

Способ оценки релаксации напряжения мягких композитов [111] заключается в возбуждении вынужденных колебаний образца композита при его фиксированной деформации и заданной величине напряжения путем воздействия на него колебаниями звукового диапазона, обеспечиваемыми генератором механических колебаний, измерении и записи в память процессора фазовой скорости передаваемых образцом композита колебаний как информативного параметра процесса релаксации напряжения и расчете на основании полученных данных кинетики этого процесса.

Недостатком этого способа является то, что генератор механических колебаний в ходе измерения фазовой скорости колебаний, передаваемых образцом, работает в режиме частоты, которая соответствует собственной частоте колебаний образца в исходной стадии, однако в ходе процесса релаксации напряжения образца наблюдается смещение спектра частот его собственных колебаний, что ведёт к значительному снижению чувствительности способа

и уменьшению точности измерения фазовой скорости, являющейся информативным параметром.

Авторами работы [109] экспериментально было установлено, что в процессе релаксации напряжения мягких композитов, к каковым могут быть отнесены текстильные материалы, значимо изменяются их динамические характеристики, в частности, параметры собственных колебаний, текущие значения которых могут быть информативным показателем релаксационных процессов.

На основе результатов научного поиска и выполненных предпроектных исследований был предложен ряд патентоспособных идей по экспериментальному определению кинетики процесса релаксации напряжения при фиксированной деформации.

Рассмотрим теоретическое обоснование связи релаксации напряжения материала при фиксированной деформации с параметрами его вынужденных поперечных колебаний.

Из работ [109-111] известно, что при колебаниях однородной пластины (рис. 3.5) прогиб $y(x, t)$ является функцией линейной координаты (x) и времени (t).

С некоторыми допущениями задачу о вынужденном прогибе полоски текстильного материала рассмотрим, как колебания упругой однородной пластины.

$$\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} + b^2 \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} = f(x, t), \quad (3.5)$$

где $f(x, t) = \frac{1}{\rho S} F(x, t)$; ρ – объёмная плотность; S – площадь поперечного сечения пластины; $F(x, t)$ – внешняя сила, изменяющаяся во времени и рассчитанная на единицу длины материала; $b = \sqrt{\frac{EJg}{\rho}}$; EJ – изгибная жёсткость материала в плоскости колебаний; ρ – линейная плотность материала; g – гра-

ВИТАЦИОННАЯ ПОСТОЯННАЯ.

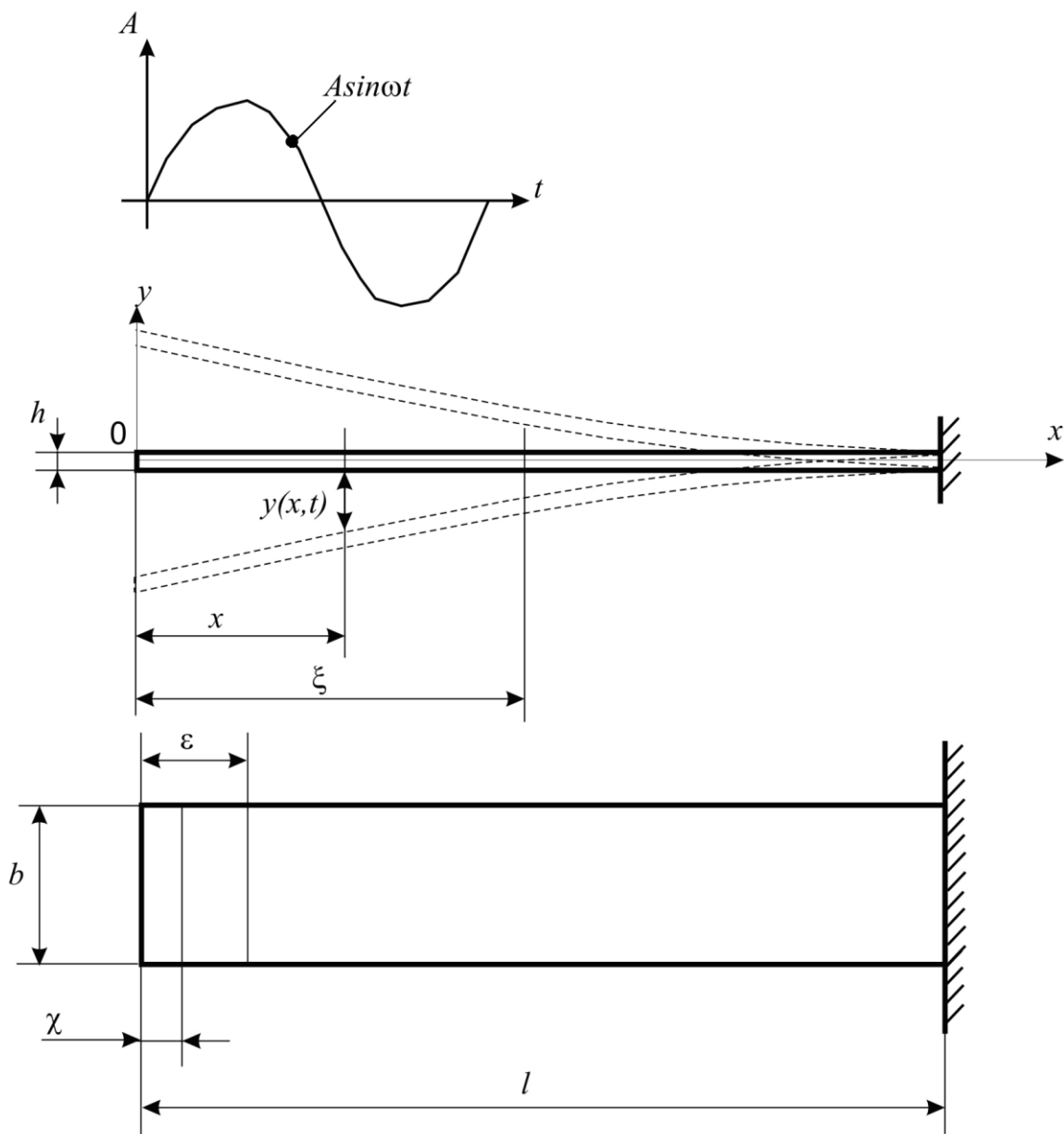


Рисунок 3.5 – Схема к расчёту колебаний однородной пластины легкодеформируемого текстильного материала

Задачу рассмотрим, как начально-краевую на отрезке $x \in [0; l]$ с нулевыми начальными условиями, т.е.:

$$y(x, t)|_{t=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial y(x, t)}{\partial x} \right|_{t=0} = 0. \quad (3.6)$$

Граничные условия в случае жёсткого закрепления правого конца отрезка, а левый при этом условно свободен, зададим следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} y(x,t)|_{x=l} = \frac{\partial y(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=l} = 0 \\ \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} \Big|_{x=0} = \frac{\partial^3 y(x,t)}{\partial x^3} \Big|_{x=0} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

Возмущающая сила сосредоточена в точке $x=0$, т.е.

$$f(x,t) = \begin{cases} A \cdot \sin \omega t & \text{при } x = 0; \\ 0 & \text{при } x \neq 0. \end{cases} \quad (3.8)$$

Согласно методу Фурье разделения переменных получим при $f(x,t)=0$ решение соответствующего однородного уравнения свободных колебаний в виде $y_n(x,t) = K\varphi_n(x)T_n(t)$ [115].

$$\text{Имеем} \quad T_n''(t)\varphi_n(x) + b^2 T_n(t)\varphi_n^{(4)}(x) = 0,$$

или

$$\frac{T_n''(t)}{b^2 T_n(t)} = -\frac{\varphi_n^{(4)}(x)}{\varphi_n(x)} = -\lambda_n^4. \quad (3.9)$$

Откуда

$$T_n''(t) + b^2 \lambda_n^4 T_n(t) = 0 \Rightarrow T_n(t) = \sin(\lambda_n^2 bt);$$

$$\varphi_n^{(4)}(x) - \lambda_n^4 \varphi_n(x) = 0 \Rightarrow \varphi_n(x) = C_1 ch \lambda_n x + C_2 sh \lambda_n x + C_3 \cos \lambda_n x + C_4 \sin \lambda_n x$$

Находим собственные функции $\varphi_n(x)$, используя граничные условия

(3.7):

$$\varphi_n'(x) = C_1 \lambda_n sh \lambda_n x + C_2 \lambda_n ch \lambda_n x - C_3 \lambda_n \sin \lambda_n x + C_4 \lambda_n \cos \lambda_n x;$$

$$\varphi_n''(x) = C_1 \lambda_n^2 ch \lambda_n x + C_2 \lambda_n^2 sh \lambda_n x - C_3 \lambda_n^2 \cos \lambda_n x - C_4 \lambda_n^2 \sin \lambda_n x;$$

$$\varphi_n''' = C_1 \lambda_n^3 sh \lambda_n x + C_2 \lambda_n^3 ch \lambda_n x + C_3 \lambda_n^3 \sin \lambda_n x - C_4 \lambda_n^3 \cos \lambda_n x;$$

$$\text{При} \quad \varphi_n''(0) = 0 \Rightarrow \lambda_n^2 (C_1 - C_3) = 0 \Rightarrow C_1 = C_3$$

$$\varphi_n'''(0) = 0 \Rightarrow \lambda_n^3 (C_2 - C_4) = 0 \Rightarrow C_2 = C_4,$$

Поэтому

$$\varphi_n(x) = C_1 (ch \lambda_n x + \cos \lambda_n x) + C_2 (sh \lambda_n x + \sin \lambda_n x);$$

$$\varphi(l) = 0 \Rightarrow C_1(ch\lambda_n l + \cos \lambda_n l) + C_2(sh\lambda_n l + \sin \lambda_n l) = 0; \quad (3.10)$$

$$\varphi'(l) = 0 \Rightarrow \lambda_n [C_1(sh\lambda_n l - \sin \lambda_n l) + C_2(ch\lambda_n l + \cos \lambda_n l)] = 0.$$

Последние два соотношения образуют однородную систему линейных уравнений относительно неизвестных C_1 и C_2 , которая имеет нетривиальное решение при $\Delta = 0$.

$$\begin{aligned} \Delta = 0 &\Rightarrow (ch\lambda_n l + \cos \lambda_n l)^2 - (sh^2 \lambda_n l - \sin^2 \lambda_n l) = 0; \\ ch^2 \lambda_n l + 2ch\lambda_n l \cdot \cos \lambda_n l + \cos^2 \lambda_n l - sh^2 \lambda_n l + \sin^2 \lambda_n l &= 0; \\ 2 + 2ch\lambda_n l \cdot \cos \lambda_n l &= 0; \\ ch(\lambda_n l) \cdot \cos(\lambda_n l) &= -1. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Здесь λ_n – положительные корни трансцендентного уравнения. Графическое решение этого уравнения (рис.3.6), численные значения корней ($\lambda_n l$), а также спектр собственных колебаний (f_n), рассчитанные по выражению

$$f_{ni} = \frac{\omega_i}{2\pi} = \frac{\lambda_n^2}{2\pi} \sqrt{\frac{E'_i I g}{p}}; \quad i = \overline{1, m}$$

для образца костюмной ткани с вложением эластана типа арт. 2330 с начальными параметрами $p = 0,14$; $E'_0 = 1,42$ МПа; длиной $l = 0,225$ м, шириной $b = 0,05$ м и толщиной $h = 0,0013$ м приведены в таблице 3.6 и 3.7.

Таблица 3.6 - Значение корней уравнения

$j =$	1	2	3	4	5	6	...	n
$\lambda_j l =$	1,875	4,694	7,855	10,996	14,137	17,279	...	$\lambda_n l$

Таблица 3.7- Спектр частот собственных колебаний костюмной ткани

$\varepsilon_i \%$	E'_i, \cdot МПа	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	...	f_n
0	1,42	0,33	2,09	5,85	11,46	18,97	28,33		
1	1,52	0,34	2,16	6,09	11,85	19,62	29,31		...

Продолжение табл. 3.7

2	1,63	0,35	2,24	6,26	12,28	20,32	30,35		...
3	1,75	0,37	2,32	6,49	12,72	21,07	31,45		...
4	1,95	0,39	2,45	6,85	13,43	22,23	33,20		...
5	2,22	0,42	2,61	7,31	14,33	23,72	35,42		...

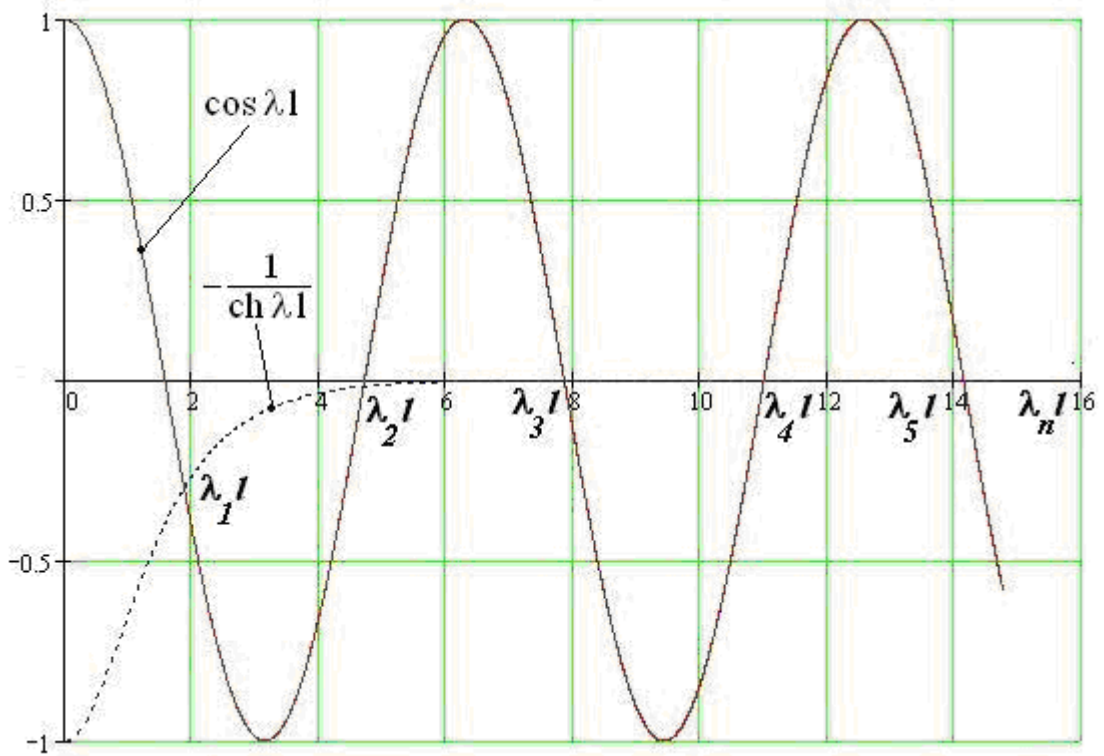


Рисунок 3.6 – Результаты графического решения уравнения (3.11)

При полученных значениях $\lambda_n l$ и решении уравнения (3.9) относительно C_1 и C_2 имеем

$$\frac{C_2}{C_1} = -\frac{ch \lambda_n l + \cos \lambda_n l}{sh \lambda_n l + \sin \lambda_n l} \Rightarrow C_1 = C(sh \lambda_n l + \sin \lambda_n l); C_2 = -C(ch \lambda_n l + \cos \lambda_n l).$$

Следовательно, собственные функции $\varphi_n(x)$ имеют вид:

$$\varphi_n(x) = C \left[\begin{array}{l} (sh \lambda_n l + \sin \lambda_n l)(ch \lambda_n x + \cos \lambda_n x) - \\ - (ch \lambda_n l + \cos \lambda_n l)(sh \lambda_n x + \sin \lambda_n x) \end{array} \right] \quad (3.12)$$

Для решения уравнения (2.1) введём функцию влияния Грина [114] и рассмотрим теоретические подходы к её построению. В этом случае решение уравнения (3.5) с заданными начальными (3.6) и краевыми условиями (3.7) представим в виде ряда

$$y(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} T_n(t) \varphi_n(x), \quad (3.13)$$

где $\varphi_n(x)$ - ранее найденные собственные функции:

С учётом (3.9) уравнение (3.5) получим в виде:

$$\sum_{n=1}^{\infty} T_n''(t) \varphi_n(x) + b^2 \sum_{n=1}^{\infty} T_n(t) \varphi_n^{(4)}(x) = f(x, t). \quad (3.14)$$

Так как собственные функции $\varphi_n(x)$ на участке пластины длиной (l)

ортогональны, т.е. $\int_0^l \varphi_n(x) \cdot \varphi_m(x) dx = 0$ при $n \neq m$, то, предполагая, что

функция $f(x)$ разлагается в ряд по собственным функциям $\varphi_n(x)$, получим:

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \varphi_n(x),$$

где B_n в силу ортогональности $\varphi_n(x)$ получим известным образом [115]:

$$B_n = \frac{\int_0^l f(\xi) \varphi_n(\xi) d\xi}{\|\varphi_n\|^2}, \quad (3.15)$$

где $\|\varphi_n\|^2$ - квадрат нормы собственной функции φ_n в пространстве функций, интегрируемых с квадратом.

Для удобства построения формулы Грина функцию $f(x, t)$ представим разложенной в виде следующего ряда:

$$f(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \varphi_n(x) f_n(t). \quad (3.16)$$

В силу соотношений (3.9) из (3.14) имеем:

$$\sum_{n=1}^{\infty} (T_n''(t) + b^2 \lambda_n^4 T_n(t)) \varphi_n(x) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \varphi_n(x) f_n(t).$$

Отсюда

$$T_n''(t) + b^2 \lambda_n^4 T(t) = B_n f_n(t) \quad (3.17)$$

Решаем дифференциальное уравнение (3.17) методом Лагранжа вариации произвольных постоянных, т.е. ищем общее решение в виде:

$$T_n(t) = u(t) \cos(b \lambda_n^2 t) + v(t) \sin(b \lambda_n^2 t) \quad (3.18)$$

Составляем систему уравнений для \dot{u} и \dot{v} :

$$\begin{cases} \dot{u} \cos(b \lambda_n^2 t) + \dot{v} \sin(b \lambda_n^2 t) = 0 \\ -\dot{u} b \lambda_n^2 \sin(b \lambda_n^2 t) + \dot{v} b \lambda_n^2 \cos(b \lambda_n^2 t) = B_n f_n(t) \end{cases} \quad (3.19)$$

Решая систему (3.19), получим:

$$\begin{cases} \dot{u}(t) = -\frac{1}{b \lambda_n^2} B_n f_n(t) \sin(b \lambda_n^2 t) \\ \dot{v}(t) = \frac{1}{b \lambda_n^2} B_n f_n(t) \cos(b \lambda_n^2 t) \end{cases} \quad (3.20)$$

Интегрируя (3.20) в промежутке времени $[0; t]$, определим:

$$\begin{cases} u(t) = -\frac{1}{b \lambda_n^2} \int_0^t B_n f_n(\tau) \sin(b \lambda_n^2 \tau) d\tau + \tilde{C}_1 \\ v(t) = \frac{1}{b \lambda_n^2} \int_0^t B_n f_n(\tau) \cos(b \lambda_n^2 \tau) d\tau + \tilde{C}_2 \end{cases} \quad (3.21)$$

Определим постоянные интегрирования \tilde{C}_1 и \tilde{C}_2 .

Подставляя (3.21) в (3.18), получим:

$$\begin{aligned} T_n(t) = & \left(\tilde{C}_1 - \frac{1}{b \lambda_n^2} \int_0^t B_n f_n(\tau) \sin(b \lambda_n^2 \tau) d\tau \right) \cos b \lambda_n^2 t + \\ & + \left(\tilde{C}_2 + \frac{1}{b \lambda_n^2} \int_0^t B_n f_n(\tau) \cos(b \lambda_n^2 \tau) d\tau \right) \sin(b \lambda_n^2 t). \end{aligned}$$

Полученный результат после преобразований запишем в виде:

$$T_n(t) = \tilde{C}_1 \cos b \lambda_n^2 t + \tilde{C}_2 \sin b \lambda_n^2 t - \left[\frac{1}{b \lambda_n^2} \int_0^t B_n f_n(\tau) \sin(b \lambda_n^2 \tau) d\tau \right] \cos(b \lambda_n^2 t) +$$

$$\left[\frac{1}{b\lambda_n^2} \int_0^t B_n f_n(\tau) \cos(b\lambda_n^2 \tau) d\tau \right] \sin(b\lambda_n^2 t). \quad (3.22)$$

Дифференцируя выражение (3.22) по t , получим:

$$\begin{aligned} \dot{T}_n(t) = & \left(\tilde{C}_1 - \frac{1}{b\lambda_n^2} \int_0^t B_n f_n(\tau) \sin(b\lambda_n^2 \tau) d\tau \right) (-b\lambda_n^2 \sin(b\lambda_n^2 t)) + \\ & + \left(\tilde{C}_2 + \frac{1}{b\lambda_n^2} \int_0^t B_n f_n(\tau) \cos(b\lambda_n^2 \tau) d\tau \right) b\lambda_n^2 \sin(b\lambda_n^2 t). \end{aligned} \quad (3.23)$$

С учётом начальных условий (3.7) имеем: $T_n(0) = 0; \dot{T}_n(0) = 0$, что подставляя в (3.22 и 3.23), получим $\tilde{C}_1 = 0$ и $\tilde{C}_2 = 0$.

С учётом (3.21) выражение (3.18) примет вид:

$$\begin{aligned} T_n(t) = & \frac{1}{b\lambda_n^2} \int_0^t B_n f_n(\tau) \left[\sin(b\lambda_n^2 t) \cos(b\lambda_n^2 \tau) - \cos(b\lambda_n^2 t) \sin(b\lambda_n^2 \tau) \right] d\tau = \\ & = \frac{1}{b\lambda_n^2} \int_0^t B_n f_n(\tau) \sin(b\lambda_n^2 (t - \tau)) d\tau. \end{aligned} \quad (3.24)$$

Следовательно, согласно (3.13 и 3.24) получим:

$$y(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{b\lambda_n^2} \int_0^t B_n f_n(\tau) \sin(b\lambda_n^2 (t - \tau)) \varphi_n(x) d\tau. \quad (3.25)$$

Выражение (3.15) в силу того, что имеет место (3.16) и, принимая во внимание, что функция $y(x, t)$ разлагается не только по x , но и по t , может быть представлено в следующем виде:

$$B_n f_n(\tau) = \frac{\int_0^l f(\xi, \tau) \varphi_n(\xi) d\xi}{\|\varphi_n\|^2}. \quad (3.26)$$

Подставляя (3.26) в (3.25), получим:

$$y(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{b\lambda_n^2} \int_0^t \frac{\int_0^l f(\xi, \tau) \varphi_n(\xi) d\xi}{\|\varphi_n\|^2} \sin(b\lambda_n^2 (t - \tau)) \varphi_n(x) d\tau.$$

Меняя суммирование с интегрированием местами, имеем:

$$y(x, t) = \int_0^l \int_0^t \left(\frac{1}{b} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\varphi_n(x)\varphi_n(\xi)}{\lambda_n^2 \|\varphi_n\|^2} \sin(b\lambda_n^2(t-\tau)) f(\xi, \tau) d\xi d\tau \right) \quad (3.27)$$

или, если обозначить

$$G(x, \xi, t) = \frac{1}{b} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\varphi_n(x)\varphi_n(\xi)}{\lambda_n^2 \|\varphi_n\|^2} \sin(\lambda_n^2 bt), \quad (3.28)$$

то формула (3.25) примет вид

$$y(x, t) = \int_0^l \int_0^t G(x, \xi, t-\tau) f(\xi, \tau) d\xi d\tau, \quad (3.29)$$

где $G(x, \xi, t-\tau)$ и есть функция Грина.

Рассматривая предлагаемую методику построения модели прогиба однородной пластины при заданных начальных условиях, необходимо также определить квадрат нормы собственной функции.

Для этого воспользуемся известной формулой А.Н. Крылова [116].

$$\|\varphi_n\|^2 = \int_0^l \varphi_n^2(x) dx = \frac{l}{4} \varphi_n^2(l) + \frac{l}{4\lambda_n^4} (\varphi_n''(l))^2 - \frac{l}{2\lambda_n^4} \varphi_n'(l) \cdot \varphi_n'''(l) \quad (3.30)$$

Выполним вычисления составляющих выражения (3.30):

$$\varphi_n(l) = 0;$$

$$\varphi_n'(l) = \lambda_n C \left[(sh^2 \lambda_n l - \sin^2 \lambda_n l) - (ch \lambda_n l + \cos \lambda_n l)^2 \right];$$

$$\varphi_n''(l) = 2\lambda_n^2 C (ch \lambda_n l \cdot \sin \lambda_n l - sh \lambda_n l \cos \lambda_n l);$$

$$\varphi_n'''(l) = \lambda_n^3 C \left[(sh^2 \lambda_n l - \sin^2 \lambda_n l)^2 - (ch^2 \lambda_n l - \cos^2 \lambda_n l) \right];$$

$$\varphi_n'(l) \cdot \varphi_n'''(l) = -4\lambda_n^4 C^2 sh \lambda_n l \sin \lambda_n l (1 + ch \lambda_n l \cdot \cos \lambda_n l).$$

Тогда квадрат нормы собственной функции равен:

$$\begin{aligned} \|\varphi_n\|^2 &= \frac{lC^2}{4\lambda_n^4} \cdot 4\lambda_n^2 (ch \lambda_n l \cdot \sin \lambda_n l - sh \lambda_n l \cdot \cos \lambda_n l)^2 + \\ &+ \frac{lC^2}{2\lambda_n^4} \cdot 4\lambda_n^4 \cdot sh \lambda_n l \cdot \sin \lambda_n l (1 + ch \lambda_n l \cos \lambda_n l) = \\ &= lC^2 (ch^2 \lambda_n l \cdot \sin^2 \lambda_n l + sh^2 \lambda_n l \cdot \cos^2 \lambda_n l + 2sh \lambda_n l \sin \lambda_n l). \end{aligned} \quad (3.31)$$

Итак, имеем:

$$\|\varphi_n\|^2 = lC^2 \left[ch^2(\lambda_n l) \cdot \sin^2(\lambda_n l) + sh^2(\lambda_n l) \cdot \cos^2(\lambda_n l) + 2sh(\lambda_n l) \cdot \sin(\lambda_n l) \right] \quad (3.32)$$

Рассмотрим возмущающую силу (2.8), как предельный случай той ситуации, когда $f(x, t)$ действует лишь на промежутке $(0; \varepsilon)$, а вне этого промежутка - действие силы равно нулю.

$$\text{Тогда} \quad \int_0^\varepsilon f(\xi, \tau) d\xi \rightarrow f(0, \tau) \quad \text{при} \quad \varepsilon \rightarrow 0.$$

Согласно интегральной теореме о среднем

$$\int_0^l f(\xi, \tau) \varphi_n(\xi) d\xi = \int_0^\varepsilon f(\xi, \tau) \varphi_n(\xi) d\xi = \varphi_n(\chi) \int_0^\varepsilon f(\xi, \tau) d\xi \quad (3.33)$$

$$(0 < \chi < \varepsilon).$$

При $\varepsilon \rightarrow 0$

$$\varphi_n(\chi) \int_0^\varepsilon f(\xi, \tau) d\xi \rightarrow \varphi_n(0) f(0, \tau) \quad (3.34)$$

Вычисляем $\varphi_n(0)$

$$\varphi_n(0) = 2C(sh\lambda_n l + \sin \lambda_n l). \quad (3.35)$$

Тогда из (3.27 и 3.33) получим

$$y(x, t) = \frac{A}{b} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\varphi_n(0)}{\lambda_n^2 \|\varphi_n\|^2} \int_0^t \sin(\omega\tau) \cdot \sin(\lambda_n^2 b(t - \tau)) d\tau. \quad (3.36)$$

Отдельно вычислим определённый интеграл по τ в формуле (3.36).

$$\begin{aligned} \int_0^t \sin \omega\tau \sin[\lambda_n^2 b(t - \tau)] d\tau &= \frac{1}{2} \int_0^t \cos[(\lambda_n^2 b + \omega)\tau - \lambda_n^2 b] d\tau - \\ &- \frac{1}{2} \int_0^t \cos[(\lambda_n^2 b - \omega)\tau - \lambda_n^2 b] d\tau = \frac{\sin[(\lambda_n^2 b + \omega)t - \lambda_n^2 bt]}{2(\lambda_n^2 b + \omega)} \Big|_0^t - \\ &- \frac{\sin[(\lambda_n^2 b - \omega)t - \lambda_n^2 bt]}{2(\lambda_n^2 b - \omega)} \Big|_0^t = \frac{\sin \omega t + \sin \lambda^2 bt}{2(\lambda_n^2 b + \omega)} + \frac{\sin \omega t - \sin \lambda_n^2 bt}{2(\lambda_n^2 b - \omega)} = \\ &= \frac{\lambda_n^2 b}{\lambda_n^4 b^2 - \omega^2} \cdot \sin \omega t - \frac{\omega}{\lambda_n^4 b^2 - \omega^2} \cdot \sin \lambda_n^2 bt. \end{aligned}$$

Подставляя полученный результат интегрирования в (3.36), окончательно получим:

$$y(x, t) = A \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\varphi_n(0) \cdot \sin \omega t \cdot \varphi_n(x)}{\|\varphi_n\|^2 (\lambda_n^4 b^2 - \omega^2)} - \frac{A \omega}{b} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\varphi_n(0) \sin \lambda_n^2 b t \cdot \varphi_n(x)}{\lambda_n^2 \|\varphi_n\|^2 (\lambda_n^4 b^2 - \omega^2)} \quad (3.37)$$

В этой итоговой формуле $\varphi_n(0)$ вычисляется по выражению (3.35), $\|\varphi_n\|^2$ - по формуле (3.32), $\varphi_n(x)$ - по соотношению (3.12). Анализируя результаты компьютерного моделирования математической модели прогиба однородного образца материала (3.37) при фиксированной частоте вынужденных колебаний видим (рис.3.7), что при изменении значений его модуля упругости (напряжения), определённым образом изменяются параметры колебаний, что соответствует представлениям о физике процесса.

Кроме того, результаты исследований показывают, что зависимость параметров колебаний от НДС материала (в спектре первой главной частоты) представляют собой монотонную нелинейную функцию (рис. 3.8).

Из общего анализа модели прогиба и его графического отображения следует, что при релаксации напряжения легкодеформируемых текстильных материалов и $\varepsilon = const$ изменяются их динамические свойства и соответственно параметры вынужденных колебаний. Изменяющиеся характеристики вынужденных колебаний при возможности их инструментального определения могут являться информативными параметрами процесса релаксации напряжения при фиксированной деформации, что может быть основой для разработки методов и средств исследования релаксации НДС текстильных материалов легкодеформируемой структуры, что и было предложено использовать в дальнейших теоретических и экспериментальных исследованиях.

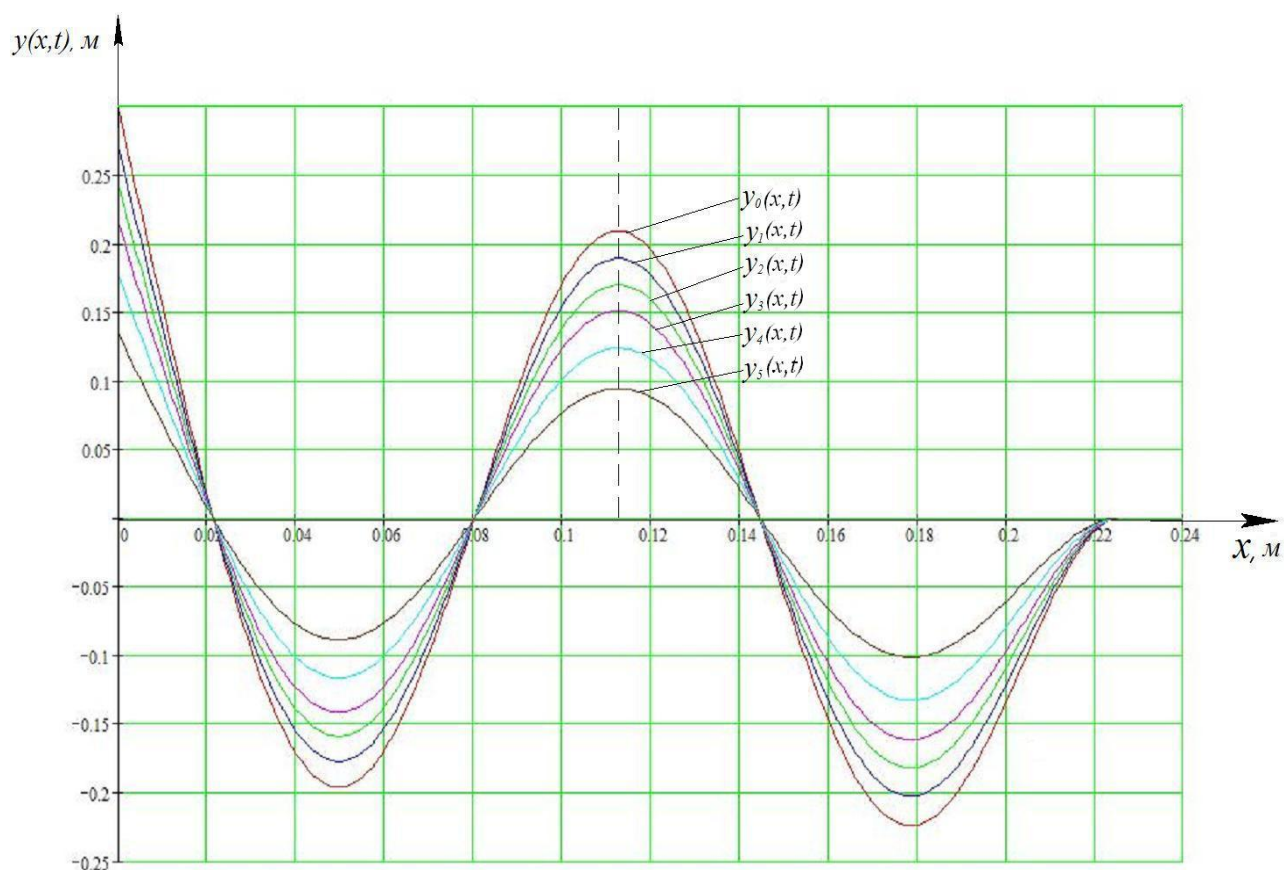


Рисунок 3.7 – Параметрические колебания легкодеформируемой пластины из текстильного материала (костюмная ткань с вложением эластана типа арт.

$$2330; f_0 = 18,967 \text{ Гц}; A = 0,01 \text{ м}); y_0(x) \Leftrightarrow E_0 = 1,42 \text{ МПа}, y_1(x) \Leftrightarrow E_1 = 1,52 \text{ МПа}; y_2(x) \Leftrightarrow E_2 = 1,63 \text{ МПа}; y_3(x) \Leftrightarrow E_3 = 1,75 \text{ МПа}; y_4(x) \Leftrightarrow E_4 = 1,95 \text{ МПа}; y_5(x) \Leftrightarrow E_5 = 2,22 \text{ МПа}.$$

Однако с учётом технической сложности и отсутствия практических возможностей измерения напряжения текстильных материалов физическими методами было предложено оценивать процесс релаксации их напряжений косвенным методом, в частности, посредством измерения параметров колебаний металлической пластины, скреплённой с исследуемым образцом.

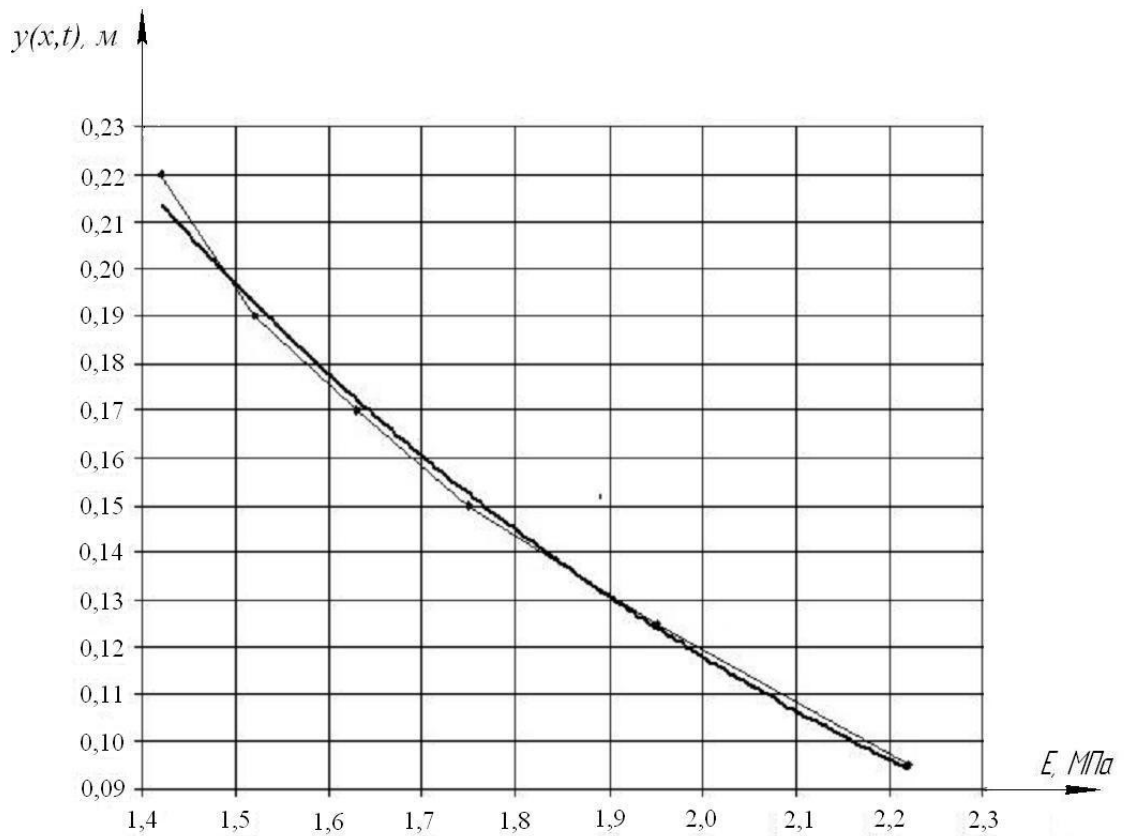


Рисунок 3.8 – Зависимость амплитуды вынужденных параметрических колебаний от напряженно-деформированного состояния материала (для $x = 0.116\text{ м}$)

На основе проведенных теоретических исследований и физического обоснования способа измерения НДС текстильных легкодеформируемых материалов посредством колебаний [117,118] разработаны измерительная схема и создан специальный экспериментальный стенд, физическая реализация которого представлена на рисунке 3.9. Для исключения влияния внешних источников колебаний на работу аппаратных средств и результаты измерения стенд смонтирован на специальном виброзащитном основании.

Измерительный стенд включает в себя неоднородную пластину, представляющую собой образец исследуемого материала, скрепленного с упругим элементом 1 посредством зажима. Второй подвижный зажим исследуемого образца установлен на резонаторном основании генератора механических колебаний (ГМК) 2, представляющего собой акустический динамик 25-ГД. В состав экспериментального стенда входит также система нагружения

образца с оцифрованными шкалами натяжения и деформации 4, генератор 5, усилитель (ФЕНИКС-002), вибродатчик 6, измерительный прибор 7 (ВИП-21) и контроллер с процессором 10. Вследствие технических ограничений на данном этапе исследований был выбран генератор колебаний диапазона звуковой частоты (ГЗ-33), хотя предпочтителен для постановки экспериментальных исследований диапазон инфразвуковых колебаний.

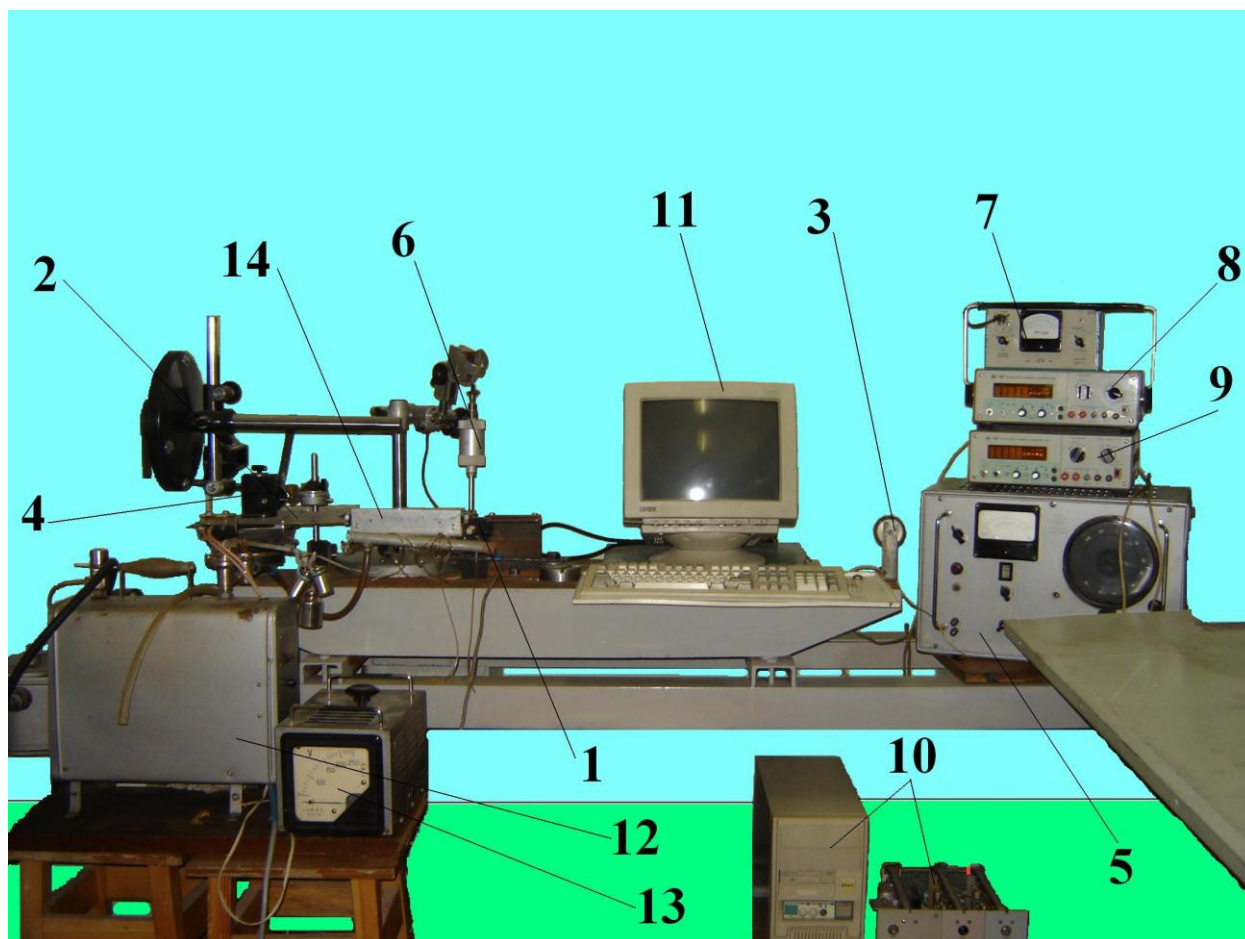


Рисунок 3.9 – Вид и состав экспериментального стенда:

1 –упругий элемент; 2 –генератор механических колебаний; 3 –устройство предварительного нагружения; 4 -система нагружения образца с оцифрованными шкалами нагружения и деформации; 5 -генератор звуковой частоты; 6 –вибродатчик; 7 –виброизмерительный прибор; 8 –вольтметр; 9 –вольтметр; 10 –системный блок с контроллером; 11 –устройство ввода и вывода информации; 12 -парогенератор; 13 –автоматический трансформатор; 14 – термокамера.

Методика исследований релаксации напряжения при постоянной де-

формации посредством волновых процессов сводилась к следующему:

- расчётно-экспериментальным путём определялись зависимости σ и ε от нагрузки, т.е. $[\sigma = f(P)]$ и $[\varepsilon = f(P)]$;
- варьируя значениями деформации для конкретного образца, экспериментально определялась и строилась зависимость начальной скорости вибрации от деформации образца, т.е. $[V(x) = f(\varepsilon)]$;
- по значениям $[\sigma = f(P)]$ и $[V(x) = f(\varepsilon)]$ строилась тарировочная характеристика $[\sigma = f(V)]$;
- экспериментально при действии на подвижный зажим деформированного образца вынужденных механических колебаний датчиком фиксировалось изменение скорости колебаний неподвижного зажима. По каналам связи посредством контроллера информация передавалась в микропроцессор, который с учётом полученной ранее зависимости $[V(x) = f(\sigma)_{\varepsilon=const}]$ рассчитывал параметры с визуализацией на экране монитора релаксации напряжения $\sigma(t)$ в реальном режиме времени.

При исследовании предлагаемого метода важно было оценить погрешность измерительного воздействия, т.е. определить влияние непосредственно механических колебаний на динамику релаксации напряжения образца. Для этих целей проводились исследования процесса релаксации напряжения при постоянном действии механических колебаний и через фиксированные промежутки времени.

Экспериментальные данные имели расхождения в интервале от 4-х процентов на начальном этапе процесса релаксации напряжения до 2-х процентов в завершающей его стадии, что соизмеримо с погрешностями используемых измерительных приборов и случайным отклонением начальных значений физико-механических свойств материалов. Учитывая, что в технологическом смысле нас интересует в основном продолжительность релаксации напряжений при разных режимах обработки всего спектра материалов, обрабатываемых, например, на прессах ВТО, то погрешность по этому показате-

лю следует считать допустимой, чтобы утверждать о достаточно высокой точности предложенного экспериментального метода измерения релаксации напряжения текстильных материалов.

Полученная экспериментальная зависимость носит экспоненциальный характер и, например, для конкретно исследованного материала (пальтовое-костюмное трикотажное полотно типа «Лоден») может быть аппроксимирована уравнением вида:

$$\sigma(t)_{\varepsilon=const} = 43.6 + 855.9 e^{-1.05t^{0.58}},$$

где $\sigma(t)_{\varepsilon=const}$ – напряжение в фиксированный момент времени t ; ($43.6 = \sigma_{\infty}$, $\text{кН}/\text{м}^2$) – равновесная составляющая напряжения; ($855.9 = \sigma_0$, $\text{кН}/\text{м}^2$) – релаксируемая часть напряжения; ($a=1.05$ и $\kappa=0.58$) – кинетические коэффициенты, зависящие от физико-механических свойств волокнисто-содержащих материалов и действия внешних факторов.

Анализ полученных численных значений и формы экспериментальной зависимости говорит о том, что вид этой зависимости соответствует формуле Кольрауша–Слонимского [120] и является достаточным подтверждением возможности использования механических колебаний для исследования параметров НДС легкодеформируемых текстильных материалов.

Результаты экспериментальных исследований релаксации напряжения при постоянной деформации текстильных материалов показали, что использование механических колебаний следует считать одним из перспективных методов исследования их НДС. Однако с учётом сложностей технического характера организации исследований эксперименты проводились в ограниченном диапазоне параметров вынужденных колебаний образцов для каждого вида материала.

Важность исследований, связанных с поиском и разработкой экспериментальных методов оценки релаксации напряжения при фиксированном значении деформации материала, определяется также требованиями к качеству выполнения термомеханических процессов и целого ряда других техно-

логических операций.

В практике производства швейных изделий продолжительность процесса влажно-тепловой обработки (ВТО), как один из критериев производительности и качества выполнения операции, определяется экспериментальным путём и зависит от волокнистого состава материала, давления прессподушки, параметров паровоздушной среды и других технологических и технических факторов. И если принять уровень давления, волокнистый состав, режим влагоотсоса, параметры паровоздушной среды и их фазовое взаимодействие, как входные факторы, то продолжительность операции ВТО по условию обеспечения требований к качеству процесса формования, будет являться функцией отклика. Задачу можно формулировать и в других постановках, например, когда по известному волокнистому составу материала, уровню технологического давления прессподушки, фазовому взаимодействию факторов и фиксированному промежутку времени, необходимо определить параметры паровоздушной среды, обеспечивающей требуемое качество операции ВТО и т.д.

Таким образом, меняя условия и факторы влияния местами, можно решать задачу проектирования процесса ВТО по разным заданным условиям и реально действующим ограничениям.

Если технологическое давление, параметры паровоздушной среды и характеристики обрабатываемого материала могут быть определены известными инструментальными методами [121], то измерение релаксации напряжения при фиксированной начальной деформации материала до сих пор вызывает трудности технического характера вследствие практического отсутствия до сих пор эффективных физических методов. Поэтому задачи по определению продолжительности операции формования практически решались и продолжают решаться итерационным методом через повторение натуральных экспериментов с визуальной оценкой качества процесса, что не даёт достаточных оснований для объективной оценки степени его завершенности.

До сих пор не представлялось также возможным дать количественную оценку влияния параметров паровоздушной среды и других факторов на скорость процесса релаксации напряжения в формуемом изделии. Это подтверждается и значительными колебаниями (в разы) рекомендуемой продолжительности ведения процесса [122]. Вопрос инструментальной количественной оценки влияния параметров паровоздушной среды на скорость релаксации напряжения при фиксированной начальной деформации оставался в значительной степени открытым.

На базе созданного и описанного выше экспериментального стенда (см. рис.3.9) и разработанной методики проведены исследования скорости релаксации напряжения при фиксированной начальной деформации в зависимости от параметров паровоздушной среды [123].

Методика экспериментальных исследований по определению зависимости $\sigma(\tau)_{\Theta_i=const}$, где Θ_i - уровни варьирования температуры паровоздушной среды, τ - время релаксации напряжения материала, заключалась в том, что деформированный образец помещался в термокамеру 13, куда по программе эксперимента подавалась паровоздушная среда варьiruемой температуры. Одновременно с подачей пара и достижением заданного режима образец со стороны одного из зажимов подвергался вынужденным механическим колебаниям.

Результаты экспериментальных исследований кинетики релаксации напряжения при уровнях варьирования температуры паровоздушной среды до 180°C представлены на рисунке 3.10 соответственно для материалов пальтового и костюмного назначения.

На базе полученных и обработанных результатов экспериментальных исследований по тарировочным характеристикам, построены зависимости продолжительности релаксации напряжения при фиксированной деформации, как функция температуры паровоздушной среды, т.е. $\tau = f(\Theta^{\circ}\text{C})$.

При постановке эксперимента важно было определить степень относи-

тельного влияния параметров паровоздушной среды на скорость релаксации напряжения для материалов разных видов. Для установления этого влияния процесс релаксации напряжения при постоянной деформации рассматривался в фиксированные промежутки времени (τ_i).

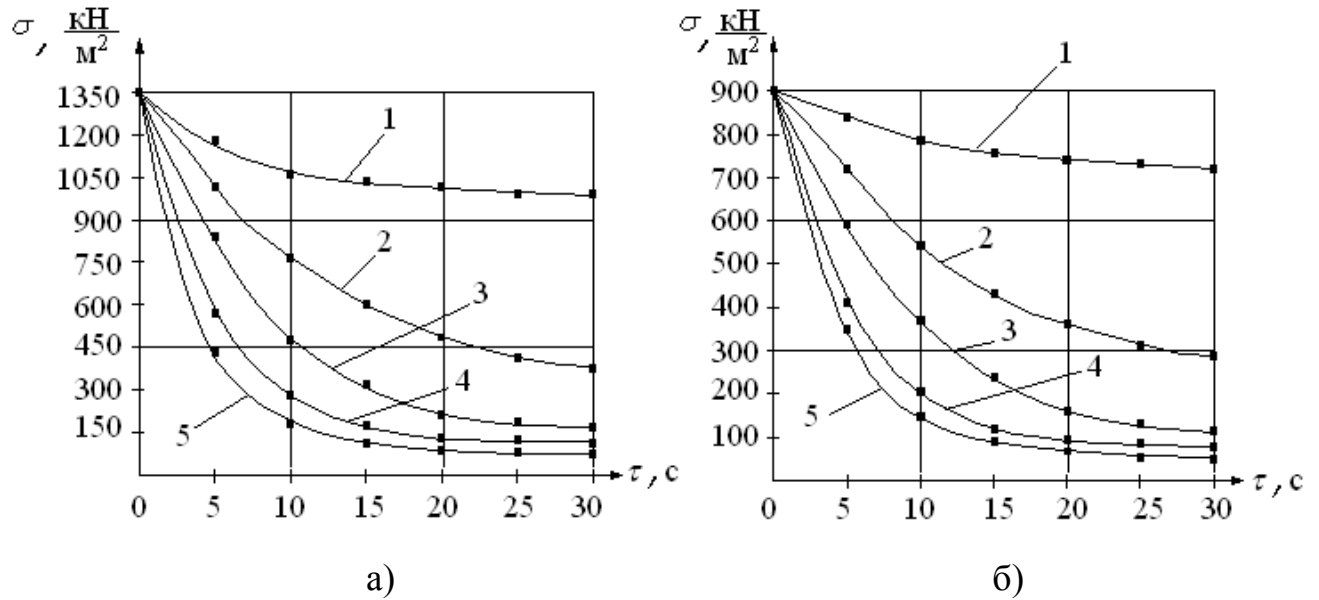


Рисунок 3.10 - Кинетика процесса релаксации напряжений при постоянной деформации: а) ткань костюмная с вложением эластана типа арт.2330; б) пальтово-костюмное трикотажное полотно типа «Лоден»; 1 - 20⁰ С; 2 - 60⁰ С; 3 - 100⁰ С; 4 - 140⁰ С; 5 - 180⁰ С.

Процентные соотношения релаксации напряжения ($\xi, \%$) для различных видов материалов определялись по экспериментально- расчётным значениям:

$$\Delta\sigma(\Theta_i)_{\tau_i=const} = \sigma_0 - \sigma_{\tau_i};$$

$$\xi_i = \frac{\Delta\sigma(\Theta_i)_{\tau_i=const}}{\sigma_0} 100\%.$$

На рисунке 3.11 представлены расчётные результаты рассматриваемых соотношений в зависимости от параметров термомеханического воздействия для материалов пальтового и костюмного назначения, как наиболее часто обрабатываемых на прессах ВТО для придания им пространственной конфигурации формованием.

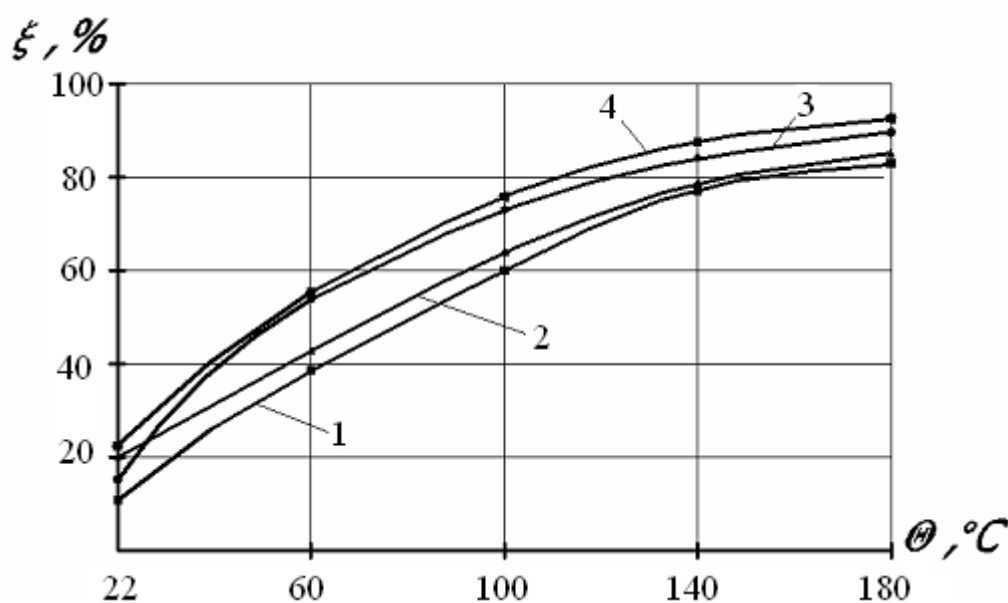


Рисунок 3.11 - Расчётные соотношения релаксации напряжения для различных видов материалов

Практическое совпадение полученных графиков по форме и количественным значениям для фиксированных промежутков времени следует считать подтверждением возможности использования разработанного метода для исследования релаксационно-деформационных характеристик текстильных материалов легкодеформируемой структуры, кинетики процессов и установления продолжительности формования изделий при разных режимах обработки.

На базе проведенных экспериментальных исследований установлено, что степень влияния параметров термомеханического воздействия на скорость релаксации напряжения при фиксированной деформации материалов носит нелинейный характер, но их относительные значения для различных видов материалов в фиксированный промежуток времени практически равны, что соответствует теоретическим представлениям о физике процесса. Теоретические исследования, предложенная методика исследований и полученные экспериментальные данные позволяют утверждать, что релаксация напряжения при фиксированной исходной деформации для разных материалов представляет собой экспоненциальную функцию с различными коэффи-

циентами, зависящими от характеристик волокнистого состава материалов и параметров внешнего воздействия.

С целью повышения чувствительности и точности измерения информативных параметров релаксации напряжения волокнистых легкодеформируемых композитов (текстильных материалов) при их фиксированной деформации, а также для расширения исследовательских возможностей разработан еще один способ оценки НДС ЛДТМ при их фиксированной деформации [124]. Данный способ предусматривает возбуждение вынужденных колебаний исследуемого образца текстильного легкодеформируемого материала в звуковом диапазоне, определение и автоматическую запись в процессор информативных параметров, связанных с процессом релаксации напряжения, и расчет на их основе кинетики этого процесса. В качестве информативного параметра используют резонансную частоту вынужденных колебаний, при этом вынужденные колебания образца композита возбуждают с частотой в диапазоне между двумя значениями его собственных частот, соответствующих исходному и конечному состоянию процесса релаксации, с возможностью визуализации колебаний с помощью строботачометра и регистрации их частоты по условию появления резонанса посредством системы оптоэлектронных преобразователей со встроенным микропроцессором.

Рассмотрим теоретические предпосылки изменения спектра частоты собственных колебаний легкодеформируемого текстильного материала при релаксации его напряженно-деформированного состояния и частоте вынужденных колебаний, обеспечивающей возникновение резонанса.

Каждый объект, в том числе текстильные материалы легкодеформируемой структуры, имеет свой спектр собственных (главных) частот колебаний. Спектр собственных частот колебаний образца материала может быть определен решением трансцендентного уравнения [125].

$$\cos \lambda_n l \operatorname{ch} \lambda_n l = -1, \quad (3.38)$$

где l – длина образца материала; λ_n – положительные корни трансцендентного уравнения, определяемые как:

$$\lambda^4 = \frac{\omega^2 p}{E'Ig}, \quad (3.39)$$

ω – круговая частота колебаний; p – погонный вес материала; $E'I$ – изгибная жёсткость материала в плоскости колебаний; E' – условный модуль упругости; $I = \frac{bh^3}{12}$ – момент инерции сечения материала; g – гравитационная постоянная.

В зависимости от найденных корней из выражения (3.38) можно определить главные секундные частоты (f) спектра i – ой формы колебания

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} = \frac{\lambda_i^2}{2\pi} \sqrt{\frac{E'Ig}{p}}. \quad (3.40)$$

Из выражения (3.40) следует, что при изменении изгибной жёсткости ($E'I$), которое определяется, прежде всего, изменением напряжения в образце и соответствующего условного модуля упругости E' вследствие релаксации напряжения в материале при фиксированной деформации и других условно постоянных параметрах, будет изменяться и спектр частот собственных колебаний образца.

С изменением (сдвигом) спектра частот собственных колебаний, наблюдающимся в связи с релаксацией напряжения образца, для достижения резонанса необходимо соответствующее изменение частоты вынужденных колебаний (вынуждающей силы). Таким образом, изменение частоты вынужденных колебаний, обеспечивающих возникновение резонанса, является информативным параметром процесса релаксации текстильного материала в условиях его фиксированной деформации.

Практически эти значения частоты вынужденных колебаний, которые изменяются в процессе релаксации напряжения, можно выявить по появлению максимальной амплитуды колебаний образца и зафиксировать тем или иным способом.

Способ оценки напряженно-деформированного состояния текстильных легкодеформируемых материалов путем измерения параметров релаксации

напряжения с учетом смещения частотного спектра собственных колебаний сводится к следующему:

- исходя из того, что напряжение материала (σ) и условный модуль упругости (E') функционально взаимосвязаны, экспериментально или теоретически определяют деформацию (ε) при соответствующем нагружении (напряжении) и строят функции $\sigma = \varphi(\varepsilon)$ и $E' = \varphi(\sigma)$;
- расчётным путём определяют базовый спектр частоты собственных колебаний исследуемого материала в разнонагруженных состояниях;
- в исходном состоянии и в ходе релаксации напряжения исследуемого образца материала возбуждают вынужденные механические колебания образца, изменяя их частоту в программно-цикловом режиме, и по появлению резонанса, распознаваемого посредством строботачометра и системы оптоэлектронных преобразователей со встроенным микропроцессором, получают информацию о резонансной частоте вынужденных колебаний, которую передают в основной процессор;
- проводят расчеты с помощью вычислительного блока основного процессора, который в режиме реального времени рассчитывает $f_i = \varphi_1(E' I)_i$, а затем с учётом $\sigma_i = \varphi(E'_i)$ строит функцию $\sigma = \varphi(f_i)$ и график-тренд релаксации напряжения образца при его фиксированной деформации.

Принцип осуществления предлагаемого способа поясняется чертежом, на котором представлена структурная схема системы для его технической реализации (рис. 3.12).

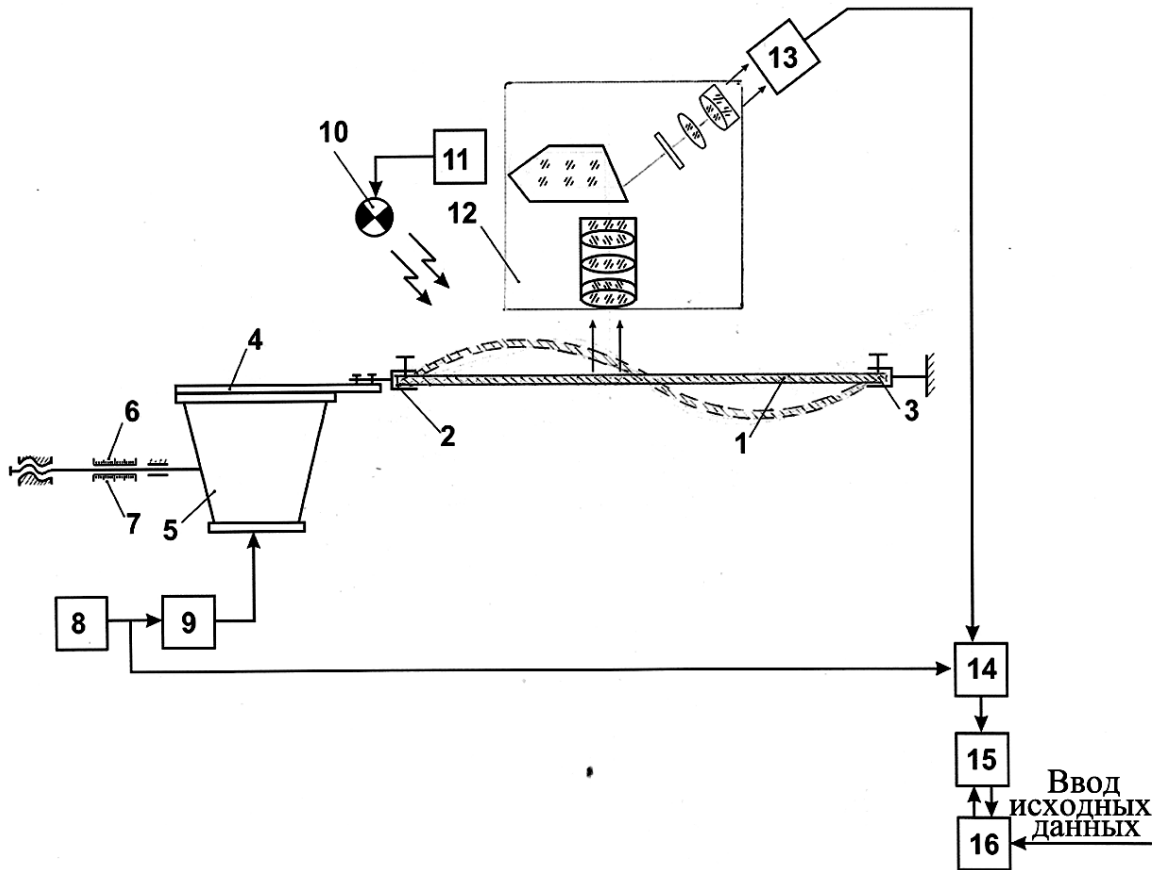


Рисунок 3.12 - Принципиальная схема для реализации способа оценки напряженно-деформированного состояния легкодеформируемых текстильных материалов

Технически способ реализуется следующим образом.

Образец текстильного легкодеформируемого материала 1 фиксируют в зажимах 2 и 3. Зажим 2, удерживающий на резонаторную пластину 4, совместно с генератором механических колебаний (ГМК) 5 перемещают, деформируя образец на заданную величину. Величина деформации (ε) остается фиксированной в ходе процесса релаксации напряжения и соответствует начальному напряжению образца. Величину деформации и нагрузку определяют по оцифрованным шкалам 6 и 7.

После задания определенного напряжения образца посредством его деформации на величину (ε) и фиксации упомянутой деформации начинают процесс исследования релаксации напряжения образца в номинальных условиях или при тепловом воздействии (термокамера на чертеже не показана).

Одновременно с началом процесса релаксации напряжения образца материала запускают генератор звуковых колебаний δ , который генерирует импульсы с частотами в выбранном диапазоне, определяемом промежутком между двумя значениями главных собственных частот образца.

Выбор диапазона частот вынужденных колебаний определяется диапазоном частот собственных колебаний образца и требованиями, предъявляемыми к чувствительности измерения.

Рассмотрим изменение частоты собственных колебаний образца текстильного материала в зависимости от релаксации напряжения на примере исследования образца выше названной костюмной ткани с начальными параметрами $p = 0,14$; $E'_0 = 14,2$; шириной $b = 0,05\text{ м}$ и толщиной $h = 0,0013\text{ м}$ (для ненагруженных условий). Спектр значений частоты f_i собственных колебаний, рассчитанных по выражению (3.40), наглядно представлен в виде следующей таблицы 3.8, где ε – относительная деформация образца, σ – напряжение материала.

Таблица 3.8 – Спектр значений частоты собственных колебаний костюмной ткани с вложением эластана типа арт. 2330

$\varepsilon, \%$	E', \cdot МПа	$\sigma \cdot 10^{-3}$ МПа	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	...	f_n
1	15,2	152	1.4	6	18.0	35	61	...	...
2	16,3	163	1.4	6	18.5	36	63	...	...
3	17,5	175	1.5	7	19.0	37	65	...	...
4	19,5	195	1.5	7	20.0	39	68	...	...
5	22,2	220	1.6	7	21.0	40	71	...	...

Из таблицы 3.8 следует, что в области частот менее 20 Гц (дозвуковые частоты) при изменении модуля упругости E' частота собственных колебаний образца легкодеформируемого текстильного материала изменяется незначительно. Следовательно, незначительным будет и диапазон изменения частоты вынужденных колебаний, соответствующий упомянутому изменению модуля упругости E' , что не позволяет обеспечить достаточно высокую чувствительность измерений. Таким образом, измерения с достаточно высо-

кой чувствительностью в предлагаемом способе обеспечиваются при звуковой частоте вынужденных колебаний.

Генератор работает в повторяющемся цикле (в программно-цикловом режиме), обеспечивая надежный выход на резонанс.

Колебания, создаваемые генератором 8 и усиленные с помощью блока 9, трансформируются в механические колебания резонаторной пластины 4 и зажима 2 с образцом материала 1.

Световые сигналы импульсной лампы 10 строботахометра 11, работающего также в программно-цикловом режиме с заданной частотой, непрерывно поступают на вход оптического усилителя 12. При совпадении кратности частотных характеристик генерируемых механических колебаний с кратностью вспышек импульсной лампы 10 строботахометра 11, работающего также в программно-цикловом режиме, возникает стробоскопический эффект, наблюдаемый с помощью оптического усилителя 12, дающего квазиустановившееся изображение образца исследуемого материала.

Изображение поступает на вход системы оптоэлектронных преобразователей 13 и анализируется встроенным в него микропроцессором (на чертеже не показан). При условии совпадения частот собственных и вынужденных колебаний образца текстильного материала, характеризующегося появлением максимальной амплитуды резонансных колебаний, микропроцессор формирует на входе блока совпадения «И» 14 разрешение на запись через блок сопряжения 15 в процессор 16 текущего значения частоты f_i вынужденных колебаний.

В вычислительном блоке процессора по введенным в его память соответствующим функциям и заранее заданному алгоритму в реальном режиме времени рассчитывается функция $\sigma = \varphi(f_i)$ и формируется график-тренд кинетики процесса релаксации напряжения образца.

Таким образом, технический результат предлагаемого способа заключается в повышении его чувствительности и точности измерения информативных параметров релаксации напряжения легкодеформируемых текстильных

материалов при их фиксированной деформации, а также в расширении исследовательских возможностей способа благодаря возможности работы в широком диапазоне частотных характеристик, присущих различным текстильным легкодеформируемым материалам в ходе релаксационных процессов.

3.2.2 Разработка и апробация систем для исследования деформационно-релаксационных процессов текстильных материалов с использованием физических эффектов

Если практикуемые производственные технологии и действующее оборудование не позволяют устранить появляющиеся деформационные явления, сопровождающиеся изменениями в макроструктуре материалов, то необходимо иметь возможности их прогнозирования и учёта влияния на выходные параметры объекта, что принципиально может быть решено посредством современных измерительных систем и информационных технологий проектирования процессов и технических средств их обеспечения.

Достаточно высокую функциональную эффективность при исследовании НДС легкодеформируемых текстильных материалов показывают методы и системы, основанные на использовании различных физических эффектов, в том числе стробоскопического эффекта. Так, в работе [126] представлено подробное описание и результаты апробации оптической системы, принцип действия которой основывается на синхронизации скорости перемещения материала и частоты работы строботачометра [127, 128].

Однако, несмотря на бесспорные технологические возможности, методы исследования НДС легкодеформируемых текстильных материалов, основанные на стробоскопическом эффекте, обладают определёнными недостатками. Одним из таких недостатков следует считать сложность их практической реализации в производственных условиях. Это обусловлено тем, что метод основан на косвенном методе измерения, использование которого, как правило, требует введения в техническое решение дополни-

тельных элементов, проведения тарифовочных операций для каждого вида материала, что снижает технологическую эффективность и надёжность измерительной системы.

Дальнейшие научные исследования в области разработки физических методов исследования НДС движущихся текстильных материалов легкодеформируемой сетчатой структуры были направлены на поиск прямых способов измерения, упрощение средств их технической реализации и повышение точности.

С этих позиций определённый интерес представляют собой методы экспериментальных исследований НДС движущихся материалов, основанные на использовании пьезометрических преобразователей [129], которые позволяют значительно упростить их практическую реализацию, обеспечивая при этом повышение точности измерения НДС движущихся материалов легкодеформируемой сетчатой структуры.

В работе предложен метод [130], основная идея которого заключается в следующем. Информативный параметр деформации текстильного полотна, в качестве которого выступает расстояние между поперечными структурными элементами, определяется посредством сканирования пьезопреобразователем поверхности движущегося рельефа материала при постоянном контактном взаимодействии с ним. При этом по числу генерируемых импульсов, определяемых количеством элементов структуры (например, уточных нитей) в эталонной длине движущегося участка, посредством процессора рассчитывается среднее значение текущего линейного параметра, и полученные результаты периодически сравниваются с соответствующими исходными данными недеформированного участка материала.

Предлагаемый и практически апробированный способ измерения деформации (ε) материала на базе использования пьезометрического преобразователя подробно описан в работах [117, 130] и состоит в следующем:

- предварительно стандартными методами (ГОСТ 3812-72) определяют среднее значение расстояния между поперечными структурными элементами

(например, для ткани – между уточными нитями) h_0^{cp} по их количеству на выбранной эталонной длине l_3 ненагруженного материала (рис.3.13), которое вводится в процессор как исходные данные;

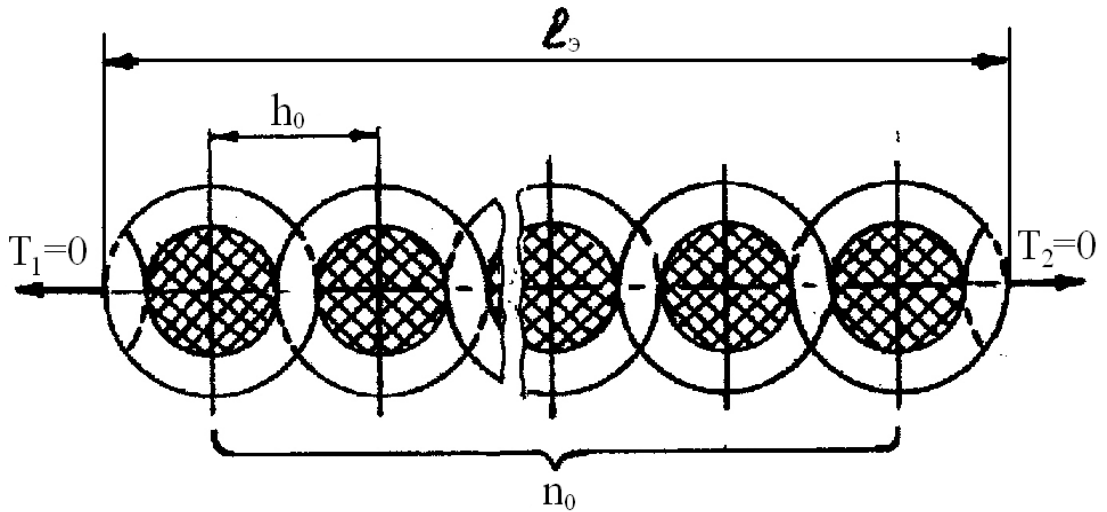


Рисунок 3.13 – Условное изображение среза материала в свободном недеформированном состоянии

- при движении материала по технологическому тракту пьезопреобразователем генерируются электронные импульсы, число которых определяется количеством поперечных структурных элементов (рис. 3.14), соответствующих эталонной длине l_3 ;

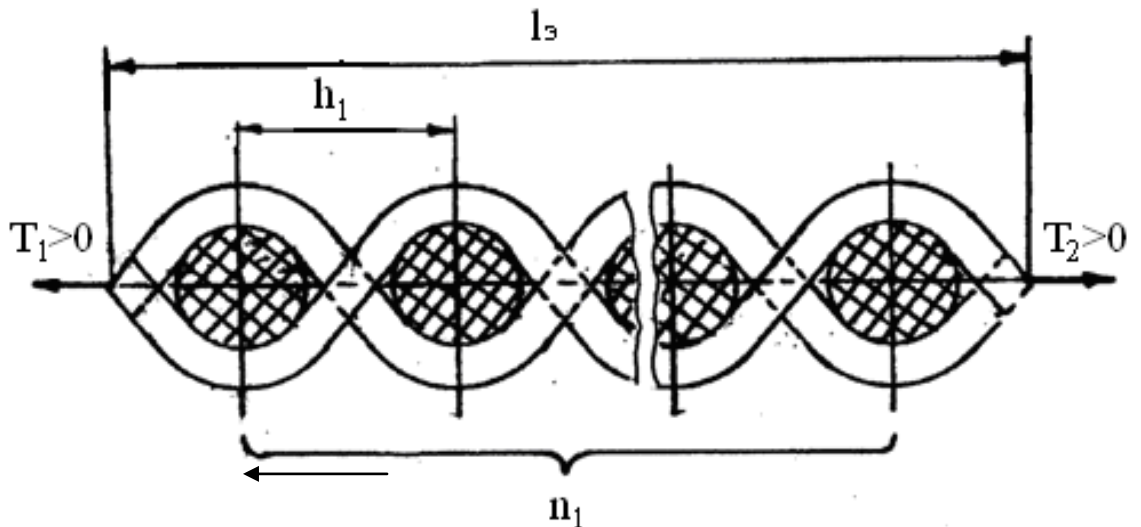


Рисунок 3.14 - Условное изображение среза материала в деформированном состоянии

- микропроцессор рассчитывает деформацию на участке движущегося материала, определяемого эталонной длиной, по формуле

$$\varepsilon = \frac{\frac{l_э}{n_1} - h_0^{cp}}{h_0^{cp}} 100\%, \quad (3.41)$$

где n_1 - количество импульсов, считанных пьезоэлементом при перемещении эталонного участка материала $l_э$; h_0^{cp} - средний линейный параметр (расстояние между структурными элементами) недеформированного материала.

На рисунке 3.15 представлена структурная схема устройства для реализации описанного способа, которое работает следующим образом.

При движении материала по измерительному тракту и его силовом взаимодействии с рабочими органами технологического оборудования происходит его деформация. При этом щуп 1, связанный с пьезоэлементом 2, находится в постоянном силовом контакте с движущейся поверхностью под действием заданного усилия P (от 0.1 до 0.25Н), и происходит непрерывное сканирование рельефа поверхности исследуемого объекта, в частности, считывание количества поперечных элементов структуры на заданной эталонной длине в движущемся деформированном материале (рис. 3.14).

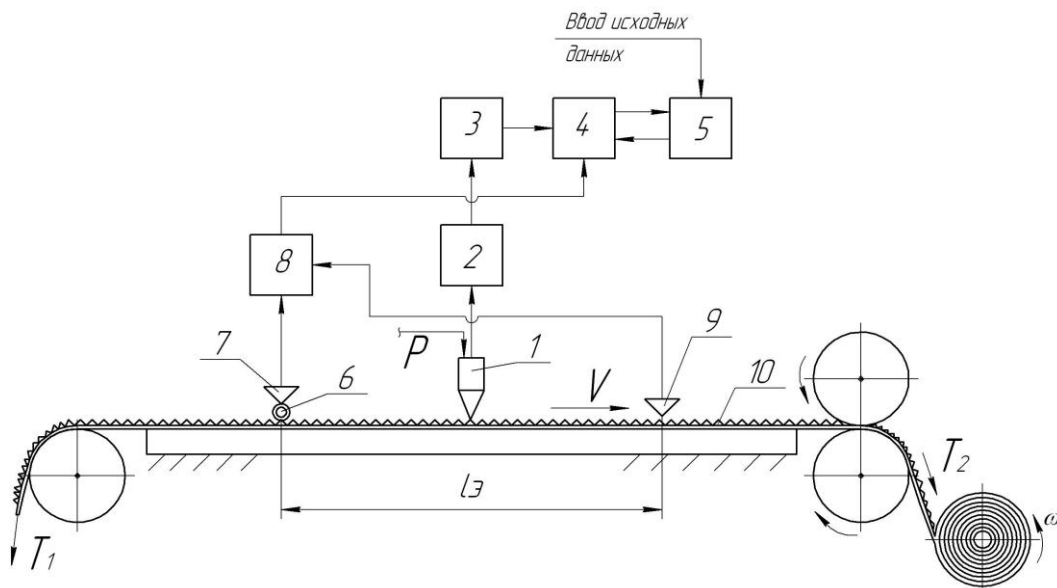


Рисунок 3.15 – Структурная схема измерения НДС материалов с использованием пьезометрического датчика

Каждому поперечному структурному элементу соответствует электронный импульс, генерируемый пьезопреобразователем, т.е. формируемое пьезопреобразователем количество сигналов соответствует количеству считанных структурных элементов текстильного материала.

Генерируемые пьезоэлементом 2 сигналы усиливаются в блоке 3 и поступают в измерительно-вычислительную систему. Однако сигналы от пьезоэлемента 2, усиленные в блоке 3, не могут пройти через блок сопряжения (контроллер) 4 в процессор 5, до тех пор, пока не будет считана метка 6 на движущемся материале датчиком 7 начала эталонной длины l_0 и дано соответствующее разрешение.

Как только датчик 7 выработает импульс, в блоке 8 сформируется потенциальный сигнал, который даст разрешение на прохождение информации от пьезопреобразователя 2 и усилителя 3 в блок сопряжения 4 и далее в процессор 6. В момент взаимодействия движущейся метки с датчиком 9 конца эталонной длины l_0 сформируется сигнал перевода блока 8 в исходное первоначальное состояние и вход сигналов от усилителя 3 в блок сопряжения 4 будет заблокирован.

Таким образом, в процессор поступит количество импульсов, равных количеству структурных элементов материала 10, соответствующих эталонной длине l_0 . При этом количество импульсов не зависит от возможного проскальзывания материала относительно рабочих органов технологического оборудования, его остановки при технологической необходимости, а только от степени его деформации.

Полученное значение деформации может быть использовано для расчёта его натяжения по функциональной зависимости $\varepsilon = f(T)$ и формирования команд управления исполнительными механизмами технологического оборудования (на рис.3.14 не показаны) для устранения недопустимого отклонения процесса обработки материалов от заданных режимов.

3.2.3 Теоретическое обоснование, разработка и экспериментальные исследования системы измерения релаксации усилий при фиксированной деформации

Разработанные ранее способы, идеи и технические решения для исследования релаксации усилия (напряжения) материалов при фиксированной деформации, рассмотренные в работах [109-111], а также и предложенные в рамках настоящей работы, формируют новые подходы в области создания физических методов и технических систем для изучения реологических характеристик самых различных видов материалов и могут являться предметом для дальнейших теоретических и экспериментальных исследований. Однако их внедрение в промышленность и практическое использование представляет собой, по тем или иным причинам, определённые технические трудности и ограничения технологического характера.

Для исследования НДС текстильных материалов легкодеформируемой структуры при фиксированной деформации, помимо методов и устройств, рассмотренных в п. 3.2.1, разработан и апробирован достаточно простой в конструктивном отношении метод исследования релаксации усилия (напряжения) в материалах, основанный на использовании системы пневматических элементов [119].

Для исследования релаксации усилия (напряжения) был разработан опытный прибор-стенд (рис.3.16), который содержит пневмопривод, имеющий в своём составе специальный пневмоцилиндр 1 (рис.3.17), во внутренней части которого между торцевыми стенками установлен кольцевой упор 2 для фиксации поршня 3 в исходном положении с возможностью герметизации штоковой полости *A* посредством специальной накладки 4. Для мгновенного сброса давления в полости *B* пневмоцилиндра предусмотрен двухлинейный клапан 6, поршень 3 имеет шлицевые срезы 5.

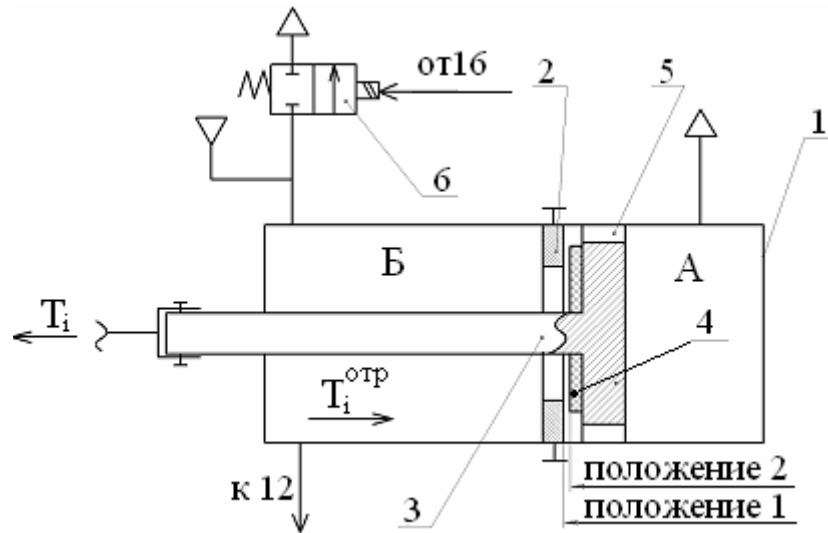


Рисунок 3.17 - Схема управления пневмоцилиндром

Исследование релаксации напряжения при фиксированной деформации может осуществляться как в номинальном температурном режиме и влажности, так и при действии теплоносителя в виде паровоздушной среды варьируемой влажности или газовой среды различного температурного уровня.

Перед исследованием испытуемый образец текстильного материала 19 устанавливается в зажимах 7, 8 и фиксируется в заданном положении пространства термокамеры 17. Нагружение образца материала в зависимости от требуемой деформации осуществляется посредством винтовой передачи 9 и подвижного зажима 7. При этом регистрация перемещения (деформации) подвижного среза образца материала осуществляется на оцифрованных шкалах 10 и 11 показаний «усилие - деформация».

Заданная деформация образца текстильного материала и приложенное при этом усилие, как часть исходных данных, фиксируется и передаётся в процессор 16. В условиях приложения усилия к образцу штоковая часть поршня пневмоцилиндра 1, жёстко связанная с условно неподвижным зажимом 8, поршневой частью 3 упирается в кольцевые выступы и герметично изолирует между собой полости А и Б. С учётом жёсткой связи штоковой части поршня пневмоцилиндра с зажимом 8 последний в исходном положении неподвижен, фиксирует срез материала, обеспечивая тем самым заданную деформацию.

После деформации образца на заданную величину и её фиксации в термокамере при закрытом клапане 6 в полость *B* пневмоцилиндра подаётся воздух под давлением, которое возрастает вплоть до начала движения поршня. Давление в полости *B* при этом измеряется цифровым манометром 12 и в виде электронного кода поступает на вход блока 14.

Сигнал о начале трогания зажима 8 совместно со штоковой частью поршня 3 пневмоцилиндра формируется посредством сенсорного датчика 13. Появление сигнала трогания на одном из входов блока совпадения 14 даёт разрешение на передачу информации о величине давления через блок сопряжения 15 в процессор 16.

Процессор наряду с другими функциями формирует команду управления двухлинейным клапаном 6, который коммутирует магистраль подготовки воздуха с атмосферой и с поршневой полостью *B*. Давление, соответствующее началу трогания поршня, является информативным параметром, так как усилие $T_i^{omp.}$ отрыва поршня от разделительного кольца 2 изменяется и определяется как:

$$T_i^{omp.} = T_i + \Delta T ; i = \overline{1, n}, \quad (3.42)$$

где T_i - усилие, действующее на материал с учётом её релаксации; ΔT - сила трения при взаимодействии элементов пневмоцилиндра при их относительном движении.

Изменяющееся в каждом измерительном цикле давление в виде кода цифровых сигналов поступает через логический блок совпадения 14 и блок сопряжения 15 в процессор 16, который обрабатывает информацию по заданному алгоритму и формирует команды управления измерительной системой, в том числе клапаном 6. При закрытии клапана 6 воздух из блока подготовки поступает в поршневую полость *B* цилиндра для повторения цикла измерения.

Начало трогания поршня с фиксированного места определяется с помощью сенсорного оптоэлектронного индикатора 13, выполненного на базе

компьютерной «мыши». Соответствующая этому началу релаксация деформации образца, величина которой несоизмеримо мала по сравнению с её задаваемым и фиксированным значением, при достижении необходимых условий может быть принята незначимой.

Так как релаксация созданного усилия (а, следовательно, внутреннего напряжения) в материале происходит непрерывно, то при повторении цикла измерения убывает давление и, соответственно, усилие отрыва ($T_i^{omp.}$) поршня пневмоцилиндра от кольцевой стенки. При этом процессор в режиме реального времени строит кинетику релаксации усилия $T_i^{omp.}(t)$ при фиксированной деформации. С учётом объективных ограничений по техническим возможностям исполнения, но без изменений принципиального характера, для оценки работоспособности предложенного метода был создан действующий стенд-прибор (рис. 3.18), на базе которого выполнена программа экспериментальных исследований, фрагмент результатов которых представлен в таблице 3.9

Таблица 3. 9 – Результаты экспериментальных исследований релаксации усилия при фиксированной деформации

Вид материала и его состав	Линейные размеры образца, $l \times b \times h$, м	Параметры эксперимента		Контрольные точки		Давление в штоковой полости, Па	Усилие в материале $T, Н$
		Температура ПВС, $t^{\circ}C$	Деформация	№п/п замера	время τ , с		
Пальтово-костюмное трикотажное полотно типа «Лоден»	0,45×0,05×0,003	180	5%	1	-	178926	9,0
				2	60	123260	6,2
				3	120	73559	3,7
				4	180	39761	2,0
				5	240	25845	1,3
				6	300	21869	1,1
				7	360	17893	0,9
				8	420	13917	0,7
				9	480	7952	0,4
				10	540	1988	0,1

Методика экспериментальных исследований состояла в следующем.

Образцы легкодеформируемого текстильного материала линейных размеров $0.45 \times 0.05 \times 0.003$ м (длина и ширина образца ограничивались конструктивными параметрами тепловой камеры) деформировали со стороны подвижного зажима на заданную величину, что контролировалось по соответствующим оцифрованным шкалам.

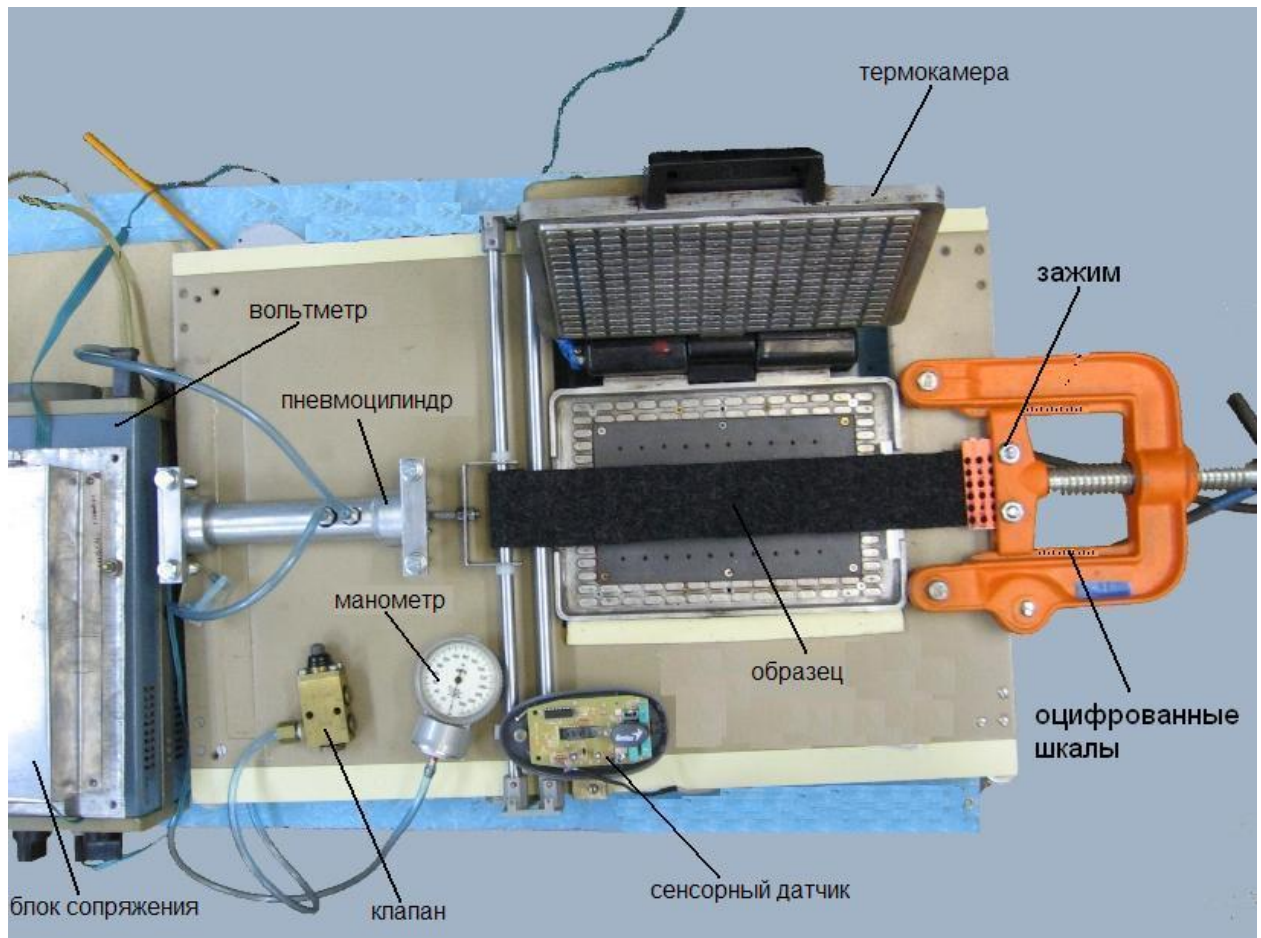


Рисунок 3.18 – Общий вид и элементный состав экспериментального стенда (вид сверху)

Для определения начального значения давления в цилиндре и, соответственно, усилия в образце базовый замер выполнялся в номинальных условиях без воздействия паровоздушной среды.

Далее внутреннее негерметизированное пространство термокамеры заполнялось паровоздушной средой (ПВС) заданной температуры из парогенератора ОАГ-2. Достигаемые и контролируемые посредством медь-константановой термопары варьируемые температуры образца и технологической среды осуществлялись за промежуток времени, в несколько раз

меньший продолжительности процесса релаксации усилий.

В фиксированные промежутки времени соответствующие началу движения поршня пневмоцилиндра с помощью цифрового манометра определялось изменение давления в измерительной камере. Импульс начала движения поршня цилиндра фиксировался посредством сенсорного датчика – сигнализатора 13.

Информация об изменении давления через блок сопряжения в режиме реального времени по коммутационным каналам передавалась в процессор и одновременно считывалась по шкале цифрового манометра. После передачи информации в процессор автоматически и практически мгновенно посредством клапана управления, скомутированного со штоковой полостью, сбрасывалось давление, и поршень цилиндра под действием изменяющихся усилий в образце занимал исходное фиксированное положение.

Текущее давление (соответственно релаксация усилия) определялось с интервалом в 30с до наступления стабилизации показаний манометра, что свидетельствовало о практическом завершении кинетики процесса. Статистически обработанные посредством компьютерных технологий экспериментальные данные (рис.3.19), показывают, что процесс релаксации усилия (напряжения) при условии $\varepsilon = const$ носит экспоненциальный характер и нелинейно зависит от действия термомеханических факторов.

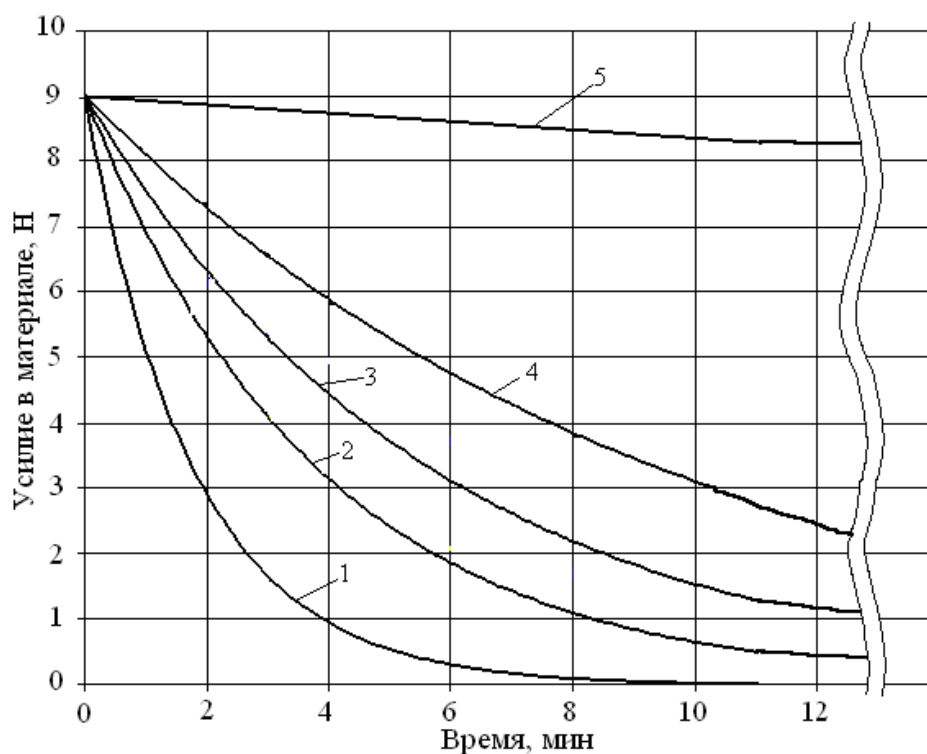


Рисунок 3.19 - Графики релаксации усилия в образце: 1 - 180⁰; 2 - 120⁰ и 3 - 80⁰С при действии ПВС; 4 – 180⁰С (подогретый воздух), 5 - 20⁰С без ПВС.

Анализ результатов эксперимента в выбранной области исследований позволяет сделать вывод об эффективности использования разработанной методики и экспериментального стенда для оценки релаксации напряженного состояния текстильных материалов легкодеформируемой структуры различных способов производства при фиксированной деформации и решения практических задач проектирования процессов влажно-тепловой обработки в производстве одежды.

3.2.4 Разработка экспериментальных методов определения коэффициента поперечного сокращения материалов при одноосном растяжении

При проектировании швейных изделий из легкодеформируемых материалов (ВЭМ) зачастую необходима информация о соотношении продольной и поперечной деформаций при одноосном нагружении. В общепринятом подходе оценок деформационных характеристик ЛДТМ необходимо знать коэффициент поперечного сокращения или так называемый условный коэффициент Пуассона (μ), определяемый как

$$\mu = \frac{\varepsilon_{III}}{\varepsilon_d}, \quad (3.43)$$

где

$$\varepsilon_{III} = \frac{\Delta H}{H_0}; \quad \varepsilon_d = \frac{\Delta L}{L_0},$$

где $\Delta H, \Delta L, H_0$ и L_0 соответственно абсолютная деформация по ширине и длине, ширина и длина образца.

Тогда

$$\mu = \frac{\Delta H}{\Delta L} \cdot \frac{L_0}{H_0}. \quad (3.44)$$

Определение условного коэффициента Пуассона или поперечного сокращения (μ) имеет свои сложности, и особенно для трикотажных легко растяжимых полотен, когда упругая составляющая продольной деформации может достигать 100 и более процентов, и, при этом, возникает значительный краевой эффект (спиралевидные кромки).

Для получения численного значения условного коэффициента Пуассона и расчёта НДС, а для решения ряда технологических задач – определения коэффициента сужения разработаны специальные технические устройства, новизна которых защищена патентами РФ [133, 134].

Экспериментальный прибор [133], физическая реализация которого представлена на рис. 3.20, позволяет исследовать различные по структуре материалы, в том числе и трикотажные полотна, за счет устранения влияния краевого эффекта на точность определения характеристик их деформационных свойств.

Прибор состоит из несущей платформы 1, на которой смонтированы все его функциональные звенья и элементы. В состав прибора входят зажимы 2 и 3 для фиксации срезов образца, элементы 4 (опорная платформа) и 5 для устранения возможного свободного провисания образца в исходном состоянии, винтовая передача 6 для перемещения одного из срезов образца, упругий элемент (динамометр) 7.

Для отсчёта значений продольной деформации и величины нагружения

предусмотрены оцифрованные шкалы 8 и 9, а для определения поперечной деформации - индикатор 10.

При проведении эксперимента подготовленные для испытания образцы шириной 25мм и длиной 100мм (их рабочая часть) одним срезом закрепляются в неподвижном зажиме 2, а другим – в подвижном зажиме 3 с обеспечением условий их непровисания и возможности расправки на опорной плите 4. При этом шток измерительного индикатора 10 выставляется по осевой линии образца с фиксацией нулевой базы отсчёта относительно этой линии.

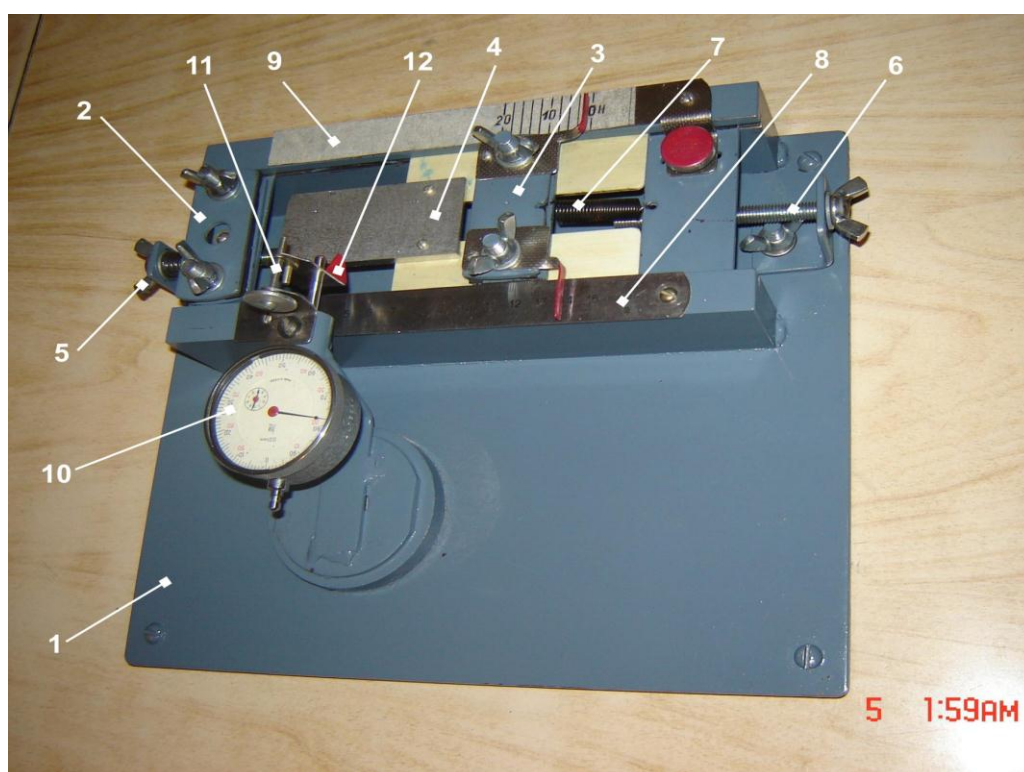


Рисунок 3.20 - Экспериментальный прибор для определения условного коэффициента Пуассона: 1 – несущая платформа; 2, 3 – зажимы; 4 – опорная площадка; 5 – регулировочный винт; 6 – винтовая передача; 7 – пружинный динамометр; 8,9 – оцифрованные шкалы; 10 – индикатор поперечного перемещения; 11 – винтовая пара индикатора; 12 – подвижная стрелка.

После деформации образца под действием соответствующего ей нагружения стрелка индикатора выставляется с совпадением с осевой линией. Винтовой передачей 11, перемещая стрелку 12, постоянно контактирующую со штоком индикатора, расправляет при этом закрученную кромку, что

происходит в основном при продольной деформации трикотажного материала, отсчитывают показания поперечной деформации (сужения) при совпадении расправленной боковой линии образца с указателем стрелки.

Последовательно меняя нагрузку и фиксируя значения продольной (Δl) и поперечной деформации (сужения) (ΔH) по отношению $\Delta H / \Delta l$ определяем коэффициент $\mu = \Delta H / \Delta l$. Результаты экспериментальных данных для текстильных материалов различной структуры в диапазоне деформаций от нагружения в 10Н представлены в таблицах 3.10 и 3.11.

Таблица 3.10 – Результаты экспериментальных исследований параметра μ для трикотажного полотна (арт. MG 530)

№ опыта п/п	$T_i, \text{Н}$	$\overline{\Delta l}_i, \text{мм}$	$\overline{\Delta H}_i, \text{мм}$	$\overline{\mu}_i = \Delta H / \Delta l$
1	2	12.81	6.44	0.50
2	4	21.70	10.55	0.49
3	6	25.91	12.80	0.49
4	8	30.21	16.01	0.53
5	10	33.20	17.01	0.51

Таблица 3.11 – Результаты экспериментальных исследований параметра μ для облегченной пальтовой ткани

№ опыта п/п	$T_i, \text{Н}$	$\overline{\Delta l}_i, \text{мм}$	$\overline{\Delta H}_i, \text{мм}$	$\overline{\mu}_i = \Delta H / \Delta l$
1	2	6.41	1.28	0.20
2	4	8.08	1.65	0.20
3	6	9.40	1.91	0.20
4	8	10.51	2.01	0.20
5	10	11.61	2.20	0.19

Кроме того, разработана цифровая технология и устройство для ее реализации (рис. 3.21), позволяющие проводить исследования характеристик поперечного сокращения материала при одноосном растяжении, подробное описание которых и результаты апробации приведены в работе [134]. Устройство позволяет совместить процесс получения данных и их обработки, а также, используя безбумажную технологию, помещать результаты в общую базу данных и использовать их при необходимости. Конструктивно система состоит из трех блоков (блок одноосного нагружения материалов, блоки автоматизированного определения и цифровой записи величин нагружения, поперечной и продольной деформации при одноосном нагружении) и процессора с манипулятором (мышью), с корпусом которого через специальный кронштейн жёстко связана подвижная стрелка, являющаяся, по сути, чувствительным элементом при измерении поперечного сокращения исследуемого образца и, одновременно, служащая, при необходимости, расправителем спиралевидной кромки у материалов, подверженных данному эффекту. Переработка и преобразование полученной в ходе измерений информации с целью определения коэффициента сужения материала и условного коэффициента Пуассона осуществляется с помощью специально разработанной программы.

Проектные решения, положенные в основу прибора для определения и оценки деформационных свойств высокоэластичных материалов, позволяют достичь следующих технических результатов:

- устранение ограничений, связанных с возникновением краевого эффекта у трикотажных полотен, обусловленного образованием по открытым срезам спиралевидной кромки;
- определение напряжённо-деформированного состояния материалов в автоматизированном режиме;
- использование цифровых технологий при обработке входных и выходных данных при решении технологических задач;

– возможность при использовании разных модулей силового нагружения образцов материала формировать электронную базу данных и трансформировать ее для решения задач конкретного проектирования и качественного изготовления изделий с учётом деформационных характеристик.

Данную систему при ее внедрении в производство на предприятиях, перерабатывающих высокоэластичные материалы, можно подключить в локальную компьютерную сеть производства, что позволит использовать создаваемую с ее помощью базу данных в виде совместимого информационного поля, необходимого для подготовки основных технологических процессов.

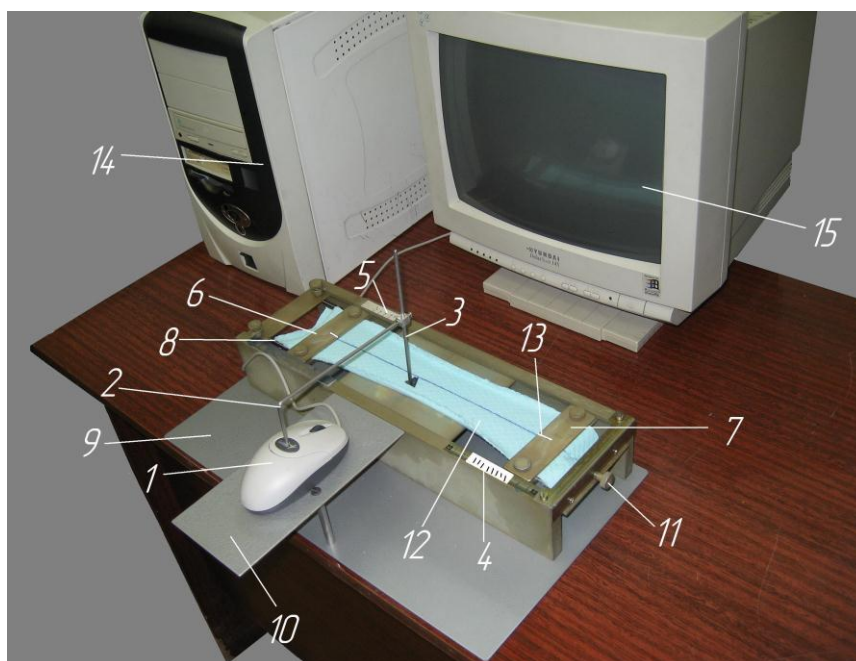


Рисунок 3.21 – Автоматизированный экспериментальный прибор для определения условного коэффициента Пуассона: 1 – компьютерная «мышь»; 2 – кронштейн; 3 – подвижная стрелка для сканирования поперечной деформации; 4 – оцифрованная шкала величины продольной деформации; 5 – оцифрованная шкала величины нагружения; 5 – неподвижный зажим образца 12; 7-подвижный зажим; 8 –динамометр; 9-платформа прибора; 10 –опорная площадка для «мыши»; 11 -винтовая передача; 13 – реперные точки на зажимах; 14 – процессор; 15 – монитор.

Апробация предложенного метода с помощью опытного образца прибора дает основание говорить о том, что разработанная компьютерная техно-

логия оценки деформационных свойств ВЭМ позволяет в автоматизированном режиме с достаточно высокой точностью определять коэффициент сужения и условный коэффициент Пуассона ВЭМ и формировать электронную базу данных свойств материалов.

Кроме того, разработанный прибор является универсальным, так как без дополнительных структурных и конструктивных изменений может быть использован для исследования деформационных характеристик и других текстильных материалов.

3.3 Моделирование и исследование напряженно-деформированного состояния текстильных материалов методом конечных элементов

Моделирование деформационно-релаксационного поведения материалов является ключевым не только при выборе режимов технологической обработки изделий, но и при решении целого ряда вопросов, связанных с прогнозированием параметров технологических процессов системы подготовки материалов к пошиву швейных изделий (ПМКПШИ) и проектированием технологического оборудования для производства и переработки текстильных материалов. Сегодня при проектировании технических средств обеспечения подготовительных операций в производстве швейных изделий обычно используются традиционные методы без учёта деформационно-релаксационных свойств перерабатываемых текстильных полотен. В действительности, текстильные материалы легкодеформируемой структуры, вследствие контактного взаимодействия с рабочими органами технологического оборудования, подвергаются разнонаправленным деформациям, что приводит к десинхронизации скоростных режимов обработки, отклонению процессов от технологических требований, появлению дополнительных погрешностей в системе функционирования механизмов, в частности, в системах измерения линейных параметров. Так, например, величина деформации легкодеформируемых текстильных материалов при намотке в рулон на операциях промера и разбраковки может достигать 6% и более [131, 132], что

делает работу по созданию высокоточных систем измерения длины без учета этого фактора малоэффективной.

При невозможности устранения различных структурных изменений, возникающих в материалах вследствие их деформирования при выполнении технологических операций, необходимо иметь возможность прогнозирования деформационных явлений и учёта их влияния на выходные параметры процесса.

Установлено, что при исследовании статического деформирования текстильных материалов с успехом можно применить метод конечных элементов (МКЭ). Такой подход позволяет в ряде случаев отказаться от дорогостоящих и длительных экспериментов и посредством моделирования процессов получить недостающие данные для проектирования технических средств и параметров технологических операций системы подготовки материалов.

Сущность МКЭ сводится к решению системы матричных уравнений вида:

$$P = K \cdot \Delta; \quad (3.45)$$

где P - система сил; K и Δ – соответственно матрица жёсткости и перемещений исследуемого объекта.

При этом, развёрнутая запись матричного уравнения (3.46) имеет вид:

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \dots P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} \dots P_{2n} \\ \dots & \dots \\ P_{m1} & P_{m2} \dots P_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \dots k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} \dots k_{2n} \\ \dots & \dots \\ k_{m1} & k_{m2} \dots k_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} \dots \delta_{1n} \\ \delta_{21} & \delta_{22} \dots \delta_{2n} \\ \dots & \dots \\ \delta_{m1} & \delta_{m2} \dots \delta_{mn} \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

Методика решения уравнения (3.46) предусматривает использование стандартных программных продуктов и изложена в работе [117].

Требуемые для решения системы уравнений (3.46) численные значения условного модуля упругости объекта (E'), условного коэффициента Пуассона или поперечного сокращения (μ) и предела пропорциональности (σ_n), вследствие отсутствия для текстильных материалов нормативной информации та-

кого рода, могут быть определены экспериментальным путём, например, с использованием разработанных устройств, описанных в п. 3.2.4.

Для апробации методики и исследования возможностей использования МКЭ при прогнозировании НДС материалов были использованы известные экспериментальные данные [131]. Кривые деформации материалов (рис.3.22) в области двух зон I и II действующих сил могут быть аппроксимированы соответственно функциями вида:

$$\varepsilon_{1,2} = a_{1,2}T_1, \quad (3.47)$$

где $\varepsilon_{1,2}$ - относительная деформация материала, %; T_1 - сила натяжения, Н; $a_{1,2}$ - коэффициенты, определяющие наклон графиков деформаций для I-ой и II-ой зоны.

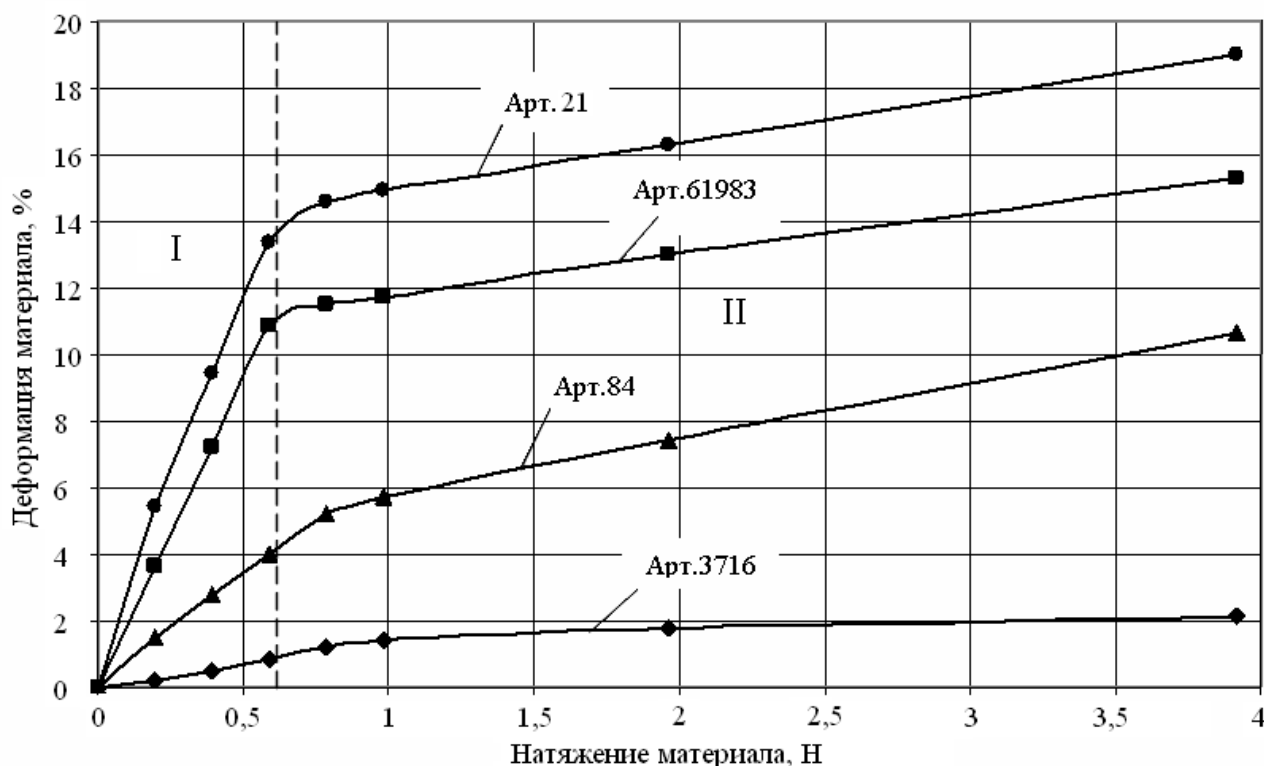


Рисунок 3.22 - Экспериментальная зависимость $\varepsilon = f(T)$

Для I-ой области деформаций разных артикулов материалов значения a_1 и площади их поперечных сечений (S) представлены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Значения коэффициента a_1 и площади поперечных сечений (S) для разных артикулов материалов

Параметры	Артикулы материалов			
	3716	61983	84	21
a_1	1,246	18,563	7,199	24,776
$S \cdot 10^{-6}$, м ²	42	72	42	60

Допустим, что условный модуль упругости материала (E) в зонах рассматриваемых деформаций определяется известным выражением

$$E' = \frac{T_1 \cdot l}{\Delta l \cdot S}, \quad (3.48)$$

где l и Δl – соответственно первоначальная длина, м; Δl – удлинение, м.

С учётом того, что

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} 100 \%, \quad (3.49)$$

выражение (3.48) приведём к виду:

$$E' = \frac{T_1 \cdot 100}{\varepsilon_i \cdot S}; \quad (3.50)$$

Но так как $a_{1,2} = \frac{\varepsilon_{1,2}}{T_1}$, то $E' = \frac{100}{a_{1,2} \cdot S}$. (3.51)

Согласно данным таблицы и выражению (3.51) условные модули упругости (быстрого процесса [135]) для рассматриваемых артикулов будут соответственно равны:

$$\begin{aligned} E'_{3716} &= 1,911 \text{ МПа}; & E'_{61983} &= 0,075 \text{ МПа}; \\ E'_{84} &= 0,331 \text{ МПа}; & E'_{21} &= 0,067 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

На рис.3.22 выделены две зоны деформации, изменяющиеся в исследуемом диапазоне нагружения (T_1) по линейным законам. Границы между зо-

нами определяются пределами условной упругости материалов.

$$\begin{aligned}\sigma_{n_{3716}} &= 0,0233 \text{ МПа}; & \sigma_{n_{61983}} &= 0,0082 \text{ МПа}; \\ \sigma_{n_{84}} &= 0,0187 \text{ МПа}; & \sigma_{n_{21}} &= 0,0098 \text{ МПа}.\end{aligned}$$

Что касается значений условного коэффициента Пуассона (μ) для текстильных материалов, то диапазон его изменения в отличие от твёрдых тел может весьма различаться в зависимости от структуры материала, волокнистого состава, способов получения и т.д. Поэтому при расчёте НДС легкодеформируемых текстильных материалов с использованием МКЭ необходимо параметр μ определять для каждого конкретного вида материала.

В качестве примера были проведены исследования НДС трикотажного полотна арт. 84, движущегося по горизонтальной поверхности разбраковочного экрана 1 контрольно-мерильной машины и взаимодействующего с измерительным роликом 2, с помощью МКЭ (рис.3.23).

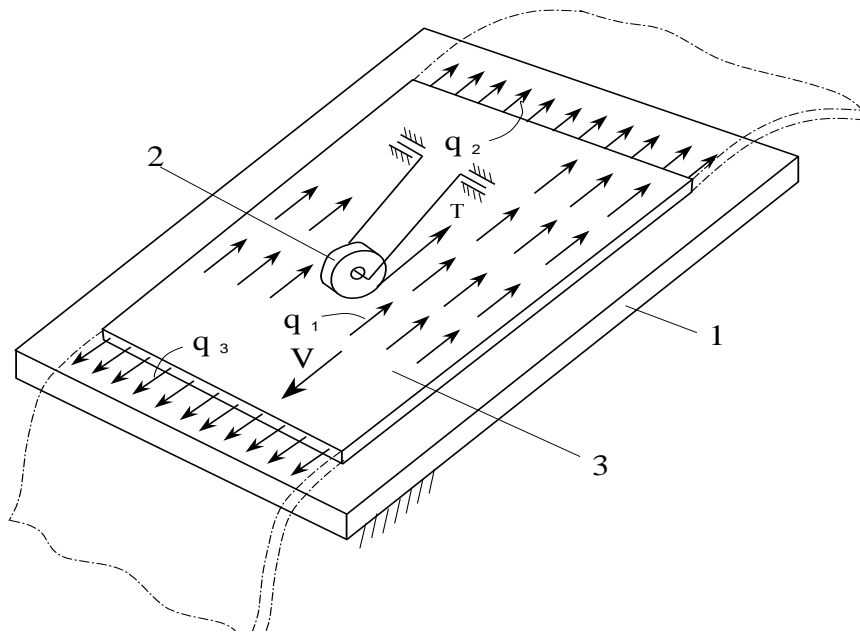


Рисунок 3.23 - Схема действия сил на движущийся материал

Принятые значения являются составляющими вектора сил (P) матричного уравнения (3.44). Расчёт НДС материала проводился по схеме трёхмерного твёрдотельного проектирования с использованием модуля FEA Calculation 3D. Согласно процедуре моделирования объекта после проверки степеней свободы и состояния равновесия по рассматриваемым нагрузкам запускается опция генерации сетки конечных элементов (рис.3.24).

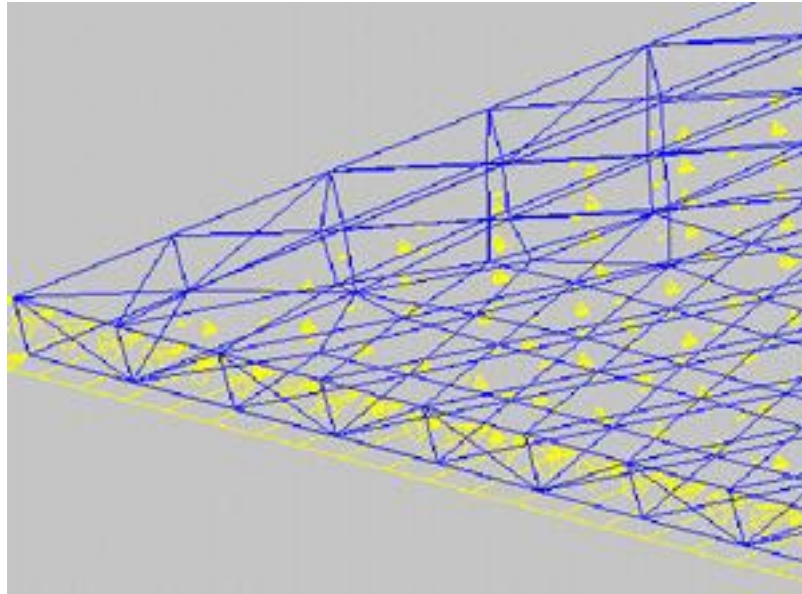


Рисунок 3.24 – Схема разбиения объекта на конечные элементы

Далее определяется количество элементов и узлов сетки, строится и решается система уравнений относительно искомых параметров.

Результаты моделирования представлены на рисунке 3.25 в виде диаграммы перемещений (деформаций) материала, которая отражает степень неравномерности их распределения. При этом наиболее рельефно выделена локальная зона НДС материала, создаваемая его контактом с мерительным роликом 2 (см. рис.3.23).

Результаты моделирования НДС материалов могут быть представлены как в виде минимаксных значений, так и в виде полного листинга значений напряжений и перемещений во всех узлах генерируемой сетки (в данном случае 15385 узлов).

Количество узлов определяется выбором размера конечного элемента.

Полученные расчётные перемещения (деформации) являются одной из составляющих частных погрешностей измерения длины материала, что может быть учтено на стадии проектирования измерительного оборудования и оценки точности воспроизведения заданных функций.

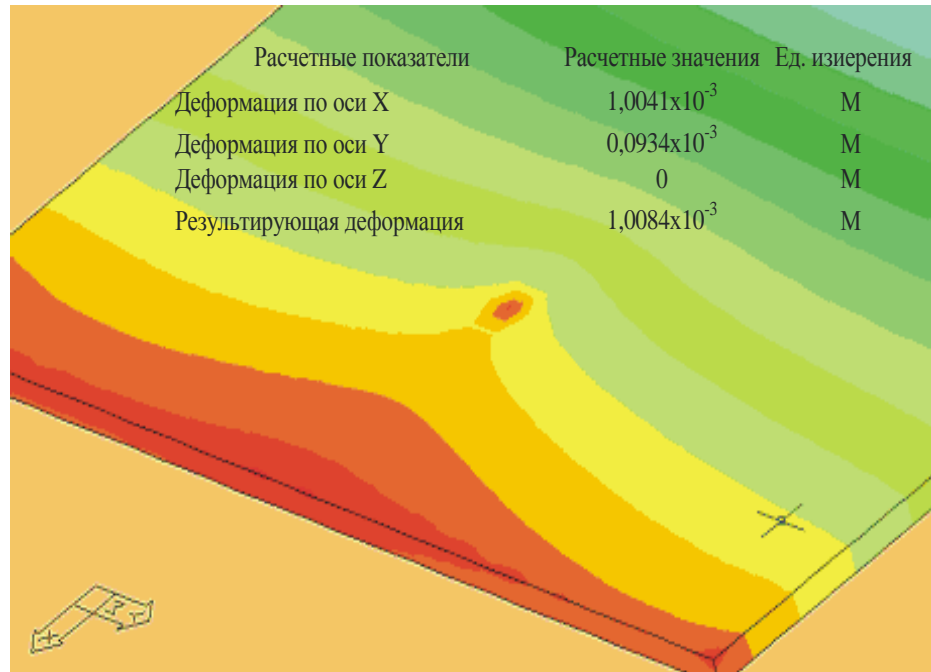


Рисунок 3.25 – Характер и значения деформаций материала

В рассмотренном примере по результатам расчёта НДС материала в границах выбранного условного модуля упругости МКЭ получено перемещение узлов по оси X, равное 1,004 мм, что соответствует 0,2 % деформации и вносимой доли погрешности при измерении длины материала.

Методика исследования НДС материалов, проектирования процессов и оборудования для производства и переработки волокнистых материалов с использованием МКЭ позволяет значительно сократить процедуры поиска рациональных технологических и технических решений, обеспечить требуемую точность воспроизведения заданных функций, прогнозировать режимы работы технических средств и вносить необходимые коррективы в конструктивно-технологические параметры создаваемых производственных объектов.

Выводы

1. Показано, что значения конструктивных параметров плотно облегающей одежды определяют величину проектируемой деформации при ее надевании и зависят от растяжимости и поперечного сокращения высокоэластичного материала. При этом стандартные методы определения характеристик деформационных свойств не позволяют получать необходимую и достоверную исходную информацию для проектирования. Все это требует разработки нового метода исследований деформационных свойств для целей проектирования плотно облегающих изделий.

2. Разработан метод исследования деформационных свойств и техническое приспособление для его реализации, обеспечивающие возможность определения растяжимости и остаточной деформации при фиксированной ширине пробы, что соответствует реальным условиям деформирования материала при надевании плотно облегающего изделия. Кроме того, разработанный метод позволяет компенсировать краевой эффект, возникающий при одноосном растяжении пробы, что дает возможность определить степень поперечного сокращения полотна.

3. На базе разработанного метода проведены исследования растяжимости, эластичности, остаточной деформации и степени поперечного сокращения высокоэластичных трикотажных полотен и даны практические рекомендации по их использованию как на стадии разработки рациональных конструкций изделий, так и при их раскрое. Используя разработанную методику расчета конструктивных параметров и учитывая межразмерный интервал, установленный для трикотажных изделий, предложена классификация ВЭМ в зависимости от их растяжимости и определены предельные значения процента заужения деталей изделий бытового назначения для материалов различных классификационных групп.

4. В ходе теоретических и экспериментальных исследований доказана возможность изучения процесса релаксации напряжения в легкодеформируемом материале при фиксированной начальной деформации методом вы-

нужденных колебаний. При этом показано, что изменяющиеся характеристики вынужденных колебаний при возможности их инструментального определения могут являться информативными параметрами процесса релаксации напряжения при фиксированной деформации, что может быть основой для разработки методов и средств исследования релаксации НДС легкодеформируемых материалов.

5. Учитывая техническую сложность и отсутствие практических возможностей измерения напряжения текстильных материалов физическими методами, предложено оценивать процесс релаксации их напряжений косвенным методом, в частности, посредством измерения параметров колебаний металлической пластины, скреплённой с исследуемым образцом. С целью реализации предложенного косвенного метода разработаны измерительная схема, создан специальный экспериментальный стенд, предложена методика исследований релаксации напряжения при постоянной деформации посредством волновых процессов.

6. На базе созданного экспериментального стенда и разработанной методики проведены исследования скорости релаксации напряжения при фиксированной начальной деформации в зависимости от параметров паровоздушной среды, результаты которых подтверждают возможность использования разработанного метода для исследования релаксационно-деформационных характеристик легкодеформируемых волокнистых материалов, кинетики процессов и установления продолжительности формования изделий при разных режимах обработки.

7. На базе проведенных экспериментальных исследований установлено, что степень влияния параметров термомеханического воздействия на скорость релаксации напряжения при фиксированной деформации материалов носит нелинейный характер, но их относительные значения для различных видов материалов в фиксированный промежуток времени практически равны, что соответствует теоретическим представлениям о физике процесса. Теоретические исследования, предложенная методика исследований и полу-

ченные экспериментальные данные позволяют утверждать, что релаксация напряжения при фиксированной исходной деформации для разных материалов представляет собой экспоненциальную функцию с различными коэффициентами, зависящими от характеристик волокнистого состава материалов и параметров внешнего воздействия.

8. С целью повышения чувствительности и точности измерения информативных параметров релаксации напряжения волокнистых легкодеформируемых материалов при их фиксированной деформации, а также для расширения исследовательских возможностей разработан способ оценки НДС ЛДВМ при их фиксированной деформации. Метод предусматривает использование в качестве информативного параметра резонансной частоты вынужденных колебаний, которые возбуждают с частотой, попадающей в диапазон между двумя значениями собственных частот текстильного материала, соответствующих исходному и конечному состоянию процесса релаксации, с возможностью визуализации колебаний с помощью строботачометра и регистрации их частоты по условию появления резонанса посредством системы оптоэлектронных преобразователей со встроенным микропроцессором.

9. Разработан и практически апробирован метод экспериментальных исследований НДС движущихся материалов, основанный на использовании пьезометрических преобразователей, который позволяет значительно упростить его практическую реализацию, обеспечивая при этом повышение точности измерения НДС движущихся легкодеформируемых материалов сетчатой структуры. Полученные данным методом значения деформации могут быть использованы для расчёта натяжения движущегося материала при выполнении различных технологических операций и формирования команд управления исполнительными механизмами технологического оборудования для устранения недопустимого отклонения процесса обработки материалов от заданных режимов.

10. Для исследования НДС волокнистых легкодеформируемых материалов разработаны и апробированы достаточно простой в конструктивном

отношении метод исследования релаксации усилия (напряжения) в материалах, основанный на базе использования системы пневматических элементов, и экспериментальный стенд для его реализации. Анализ результатов эксперимента, проведенного с использованием данного метода, позволяет сделать вывод об эффективности применения разработанной методики и экспериментального стенда для оценки релаксации напряженного состояния легкодеформируемых материалов при фиксированной деформации и решения практических задач проектирования процессов влажно-тепловой обработки в производстве одежды.

11. Для экспериментального определения коэффициента поперечного сокращения материала (условного коэффициента Пуассона) разработаны и практически реализованы достаточно точный метод исследования и технические устройства с расширенными технологическими возможностями, новизна которых подтверждена патентами РФ.

12. Доказана возможность моделирования напряженно-деформированного состояния материалов в процессах подготовки материалов к раскрою и пошиву швейных изделий с использованием метода конечных элементов. Методика исследования НДС материалов с использованием МКЭ позволяет значительно сократить процедуры поиска рациональных технологических и технических решений, обеспечить требуемую точность воспроизведения заданных функций, прогнозировать режимы работы технических средств и вносить необходимые коррективы в конструктивно-технологические параметры создаваемых производственных объектов.