

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
"Санкт-Петербургский государственный университет промышленных
технологий и дизайна"

На правах рукописи

Чистякова Елена Сергеевна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И
ЧИСЛЕННОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ
ПРОЦЕССОВ ПОЛИМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность:

2.6.17. Материаловедение

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Переборова Нина Викторовна

Санкт-Петербург - 2025

Оглавление

	Стр.
Введение	5
1. Методы математического моделирования эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов.	12
1.1. Структурные особенности полимерных текстильных материалов.	12
1.2. Варианты деформации полимерных текстильных материалов.	15
1.3. Эксплуатационные процессы полимерных текстильных материалов.	24
1.4. Деформационно-временная и сило-временная аналогии при моделировании эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов.	28
1.5. Параметры эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов.	31
1.6. Микромеханизмы эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов.	34
1.7. Цифровизация эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов.	37
1.8. Выводы по главе 1.	40

2. Математическое моделирование эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов.	42
2.1. Описание объектов исследования - полимерных текстильных материалов.	42
2.2. Экспериментальное исследование релаксационного процесса полимерных текстильных материалов.	44
2.3. Математическое моделирование релаксационного процесса полимерных текстильных материалов.	48
2.4. Экспериментальное исследование деформационного процесса полимерных текстильных материалов.	63
2.5. Математическое моделирование деформационного процесса полимерных текстильных материалов.	66
2.6. Выводы по главе 2.	82
 3. Цифровое прогнозирование эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов.	 84
3.1. Определяющие интегральные соотношения эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов.	84
3.2. Цифровое прогнозирование релаксационных процессов полимерных текстильных материалов.	87
3.3. Цифровое прогнозирование деформационных процессов полимерных текстильных материалов.	93
3.4. Выводы к главе 3.	100

4. Проверка адекватности математических моделей эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов.	101
4.1. Определение степени точности математического моделирования релаксационных процессов полимерных текстильных материалов.	101
4.2. Определение степени точности математического моделирования деформационных процессов полимерных текстильных материалов.	105
4.3. Выводы по главе 4.	108
 Глава 5. Практическое применение математического моделирования эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов.	 110
5.1. Применение методов моделирования эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов.	110
5.2. Применение методов цифрового прогнозирования эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов.	112
5.3. Разработка методов проведения сравнительного анализа эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов.	114
5.4. Выводы по главе 5.	115
 Заключение	 117
Библиографический список использованной литературы	119
Приложение А. Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.	132
Приложение Б. Акты о внедрении разработанных методов	137

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Полимерные текстильные материалы с каждым годом становятся все более востребованными в различных областях промышленности. Поэтому немаловажным является исследование эксплуатационных свойств этих материалов, определяемыми, в первую очередь, деформационными и релаксационными процессами.

Условия эксплуатации полимерных текстильных материалов характеризуются, в основном, зоной действия неразрушающих значений деформаций и нагрузок, где не наблюдается существенных изменений микроструктуры изучаемых материалов. Эта исследуемая зона эксплуатации полимерных текстильных материалов ограничена значениями деформации и нагружения не более, чем 30% от разрывных значений. В указанной области и целесообразно заниматься построением математических моделей деформационных и релаксационных процессов изучаемых материалов, а также дальнейшим их численным прогнозированием.

К основополагающим эксплуатационным процессам полимерных текстильных материалов следует отнести деформационные и релаксационные процессы. Большинство других эксплуатационных процессов (например, деформационно-восстановительный процесс) можно свести к суперпозиции этих двух процессов.

Разработка математических моделей эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов и численных методов их прогнозирования связана с решением задачи проведения качественной оценки их эксплуатационных свойств, что особенно актуально при проектировании новых материалов и изделий с заданными свойствами.

Проведение наиболее достоверной качественной оценки эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов может быть достигнуто только при построении наиболее адекватных математических моделей деформационных и релаксационных процессов этих материалов.

Проверку адекватности такого математического моделирования можно осуществить, сравнивая прогнозируемые значения деформации и нагружения полимерных текстильных материалов с данными соответствующих экспериментов.

Полимерные текстильные материалы, в силу своей сложной макроструктуры, обладают некоторыми особенностями, заключающимися в том, что некоторая математическая модель деформационного или релаксационного процесса, идеально описывающая эти процессы для одного материала, может совсем не подходить для моделирования указанных процессов другого материала. В силу сказанного, имеется необходимость разработки новых математических моделей деформационных и релаксационных процессов для различных полимерных текстильных материалов с обязательной проверкой их адекватности.

Работа выполнялась в рамках базовой части государственного задания министерства науки и высшего образования Российской Федерации 2023 - 2025 гг. № FSEZ-2023-0003 по теме: "Разработка научных основ и критериев качественной оценки функционально-эксплуатационных свойств одноосно ориентированных полимерных материалов, в том числе двойного назначения, применяемых в технике и медицине, на основе математического моделирования, системного анализа и цифрового прогнозирования этих свойств".

Степень разработанности темы исследования. Разработка математических моделей и численных методов прогнозирования деформационных и релаксационных процессов полимерных текстильных материалов имеет существенное значение при проведении дальнейшей качественной оценки эксплуатационных свойств этих материалов, что, в свою очередь, способствует повышению качества проектируемых материалов, а также повышению их конкурентоспособности.

Математическое моделирование и численное прогнозирование деформационных и релаксационных процессов полимерных текстильных материалов - одно из развиваемых направлений исследований в научной школе "Разработка критериев и методов качественной оценки функциональных и эксплуатационных свойств материалов текстильной и легкой промышленности", возглавляемой научным руководителем - проф. Переборовой Н.В. (грант Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации № НШ-5349.2022.4.).

Цель работы состоит в разработке методов математического моделирования и цифрового прогнозирования деформационных и релаксационных процессов полимерных текстильных материалов.

Основными задачами исследования являются:

- математическое моделирование основополагающих эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов - деформационного и релаксационного;
- разработка цифровых методов прогнозирования деформационных и релаксационных процессов полимерных текстильных материалов;
- разработка метода проверки адекватности разработанных математических моделей деформационных и релаксационных процессов полимерных текстильных материалов на основе данных краткосрочного эксперимента;

- разработка компьютерных алгоритмов и программ для ЭВМ по определению деформационных и релаксационных параметров-характеристик эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов;

- разработка компьютерных алгоритмов и программ для ЭВМ по определению по прогнозированию деформационных и релаксационных процессов полимерных текстильных материалов и по сравнительному анализу их эксплуатационных свойств.

Методология и методы исследования. Теоретической и методологической основой исследования явились классические и современные научные представления, разработки и положения, применяемые при моделировании эксплуатационных свойств в механике полимеров. Используются также интегральные уравнения, уравнения математической физики, численные методы, методы вычислительной математики и информатики.

Соответствие диссертационной работы Паспорту научной специальности.

Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 2.6.17. Материаловедение:

2. Установление закономерностей ... и физико-механических процессов, происходящих в ... композиционных структурах.

3. Разработка научных основ выбора ... неметаллических и композиционных материалов с заданными свойствами применительно к конкретным условиям ... эксплуатации ... изделий.

4. Разработка ... физико-механических процессов формирования новых ... неметаллических и композиционных материалов, обладающих уникальными функциональными, физико-механическими, ... эксплуатационными и технологическими свойствами.

5. Установление закономерностей и критериев оценки разрушения ... неметаллических и композиционных материалов ... от действия механических нагрузок и внешней среды.

6. Разработка и совершенствование методов исследования и контроля структуры, испытание и определение физико-механических и эксплуатационных свойств ... неметаллических и композиционных материалов.

8. Разработка и компьютерная реализация математических моделей ... фазовых и деформационных превращений при ... эксплуатации различных ... неметаллических и композиционных материалов. Создание цифровых двойников технологических процессов.

13. Развитие методов прогнозирования и оценка остаточного ресурса ... неметаллических и композиционных материалов.

Научная новизна работы состоит в разработке:

- математической модели релаксационных процессов полимерных текстильных материалов на основе нормированной функции гиперболический тангенс;

- математической модели деформационных процессов полимерных текстильных материалов на основе нормированной функции гиперболический тангенс;

- цифрового метода прогнозирования релаксационных процессов полимерных текстильных материалов для математической модели на основе гиперболического тангенса;

- цифрового метода прогнозирования деформационных процессов полимерных текстильных материалов для математической модели на основе гиперболического тангенса;

- компьютерных алгоритмов и программ для ЭВМ по определению деформационных и релаксационных параметров-характеристик эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов;

- компьютерных алгоритмов и программ для ЭВМ по прогнозированию деформационных и релаксационных процессов полимерных текстильных материалов и по сравнительному анализу их эксплуатационных свойств.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в том, что в ней:

- разработана новая математическая модель эксплуатационно-релаксационного процесса полимерных текстильных материалов;

- разработана новая математическая модель эксплуатационно-деформационного процесса полимерных текстильных материалов;

- разработан новый метод цифрового прогнозирования эксплуатационно-релаксационных процессов полимерных текстильных материалов для математической модели на основе гиперболического тангенса;

- разработан новый метод цифрового прогнозирования эксплуатационно-деформационных процессов полимерных текстильных материалов для математической модели на основе гиперболического тангенса;

- разработаны компьютерные алгоритмы и программы для ЭВМ по определению деформационных и релаксационных параметров-характеристик эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов;

- разработаны компьютерные алгоритмы и программы для ЭВМ по прогнозированию деформационных и релаксационных процессов полимерных текстильных материалов и по сравнительному анализу их эксплуатационных свойств.

Положения, выносимые на защиту:

- математические модели основополагающих эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов - деформационного процесса и релаксационного процесса;

– методы цифрового прогнозирования основополагающих эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов - деформационных и релаксационных процессов полимерных текстильных материалов;

- разработанный программный продукт по определению деформационных и релаксационных параметров-характеристик эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов ;

- разработанный программный продукт по цифровому прогнозированию эксплуатационно-деформационных и эксплуатационно-релаксационных процессов полимерных текстильных материалов и по сравнительному анализу их эксплуатационных свойств.

Степень достоверности результатов. Методы математического моделирования и численного прогнозирования деформационных и релаксационных процессов полимерных текстильных материалов были внедрены в ЗАО "САЛЮТ" и в ООО "ЭКОВАСТ", где подтвердили свою полную работоспособность.

По результатам применения указанных методов получены практические рекомендации по проектированию полимерных текстильных материалов с заданными эксплуатационными свойствами.

Апробация результатов работы. Результаты работы докладывались на научных конференциях: V Международной научной конференции "Инновационные направления развития науки о полимерных волокнистых и композиционных материалах" (С.Пб., 2024 г.) и Всероссийской научной конференции с международным участием молодых ученых "Инновации молодежной науки" (С.Пб., 2017, 2018, 2020, 2023, 2024, 2025 гг.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 38 печатных работ, среди которых 8 статей в рецензируемых журналах из "Перечня ВАК", 4 свидетельства о государственной регистрации программ в Российском агентстве по патентам и товарным знакам.

1. Методы математического моделирования эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов

Как правило, текстильные материалы полностью или частично представляют собой полимерные материалы, что дает основание применять для их исследования положения из механики полимеров.

В настоящей главе дается обзор публикаций по тематике диссертационной работы и формулируется обоснование темы данной диссертации.

Изложены современные представления о методах моделирования и анализа эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов, описаны известные способы прогнозирования деформационных и релаксационных процессов.

1.1. Структурные особенности полимерных текстильных материалов

Механическая анизотропия - одно из замечательных свойств ориентированных полимерных материалов.

Согласно общепринятым представлениям признаки ориентирования твердого тела начинают проявляться на молекулярном уровне.

Если полимерная цепь свернута в клубок и соблюдается статистическая ориентация отдельных элементов, то образец в целом изотропен.

Если же имеет место преимущественная ориентация элементов цепей, то образец макроскопически анизотропен.

В определенных случаях максимальная степень анизотропии обуславливается параллельным расположением цепей и в этом случае суммарная (макроскопическая) анизотропия образца равняется анизотропии одного элемента, умноженной на число таких элементов в единице объема [1].

Под ориентированным состоянием полимеров принято понимать состояние, в котором имеется четко выраженная одноосная ориентация полимерных цепей.

Системы, находящиеся в ориентированном состоянии, во многих отношениях можно рассматривать как квазиодномерные. К таким системам относятся волокна и нити [2].

Понятие квазиодномерности оказалось продуктивным при анализе фундаментальных свойств полимеров на молекулярном и надмолекулярном уровне [3 - 7].

Природа высокоэластичности объясняется физическими свойствами цепных молекул.

Возможность внутреннего вращения вокруг единичных связей приводит к гибкости и легкой сворачиваемости полимерных цепей.

Гибкость отчетливо проявляется, когда тепловое движение достаточно интенсивно.

В стеклообразном состоянии деформация связана с изменением средних расстояний между атомами и валентных углов полимерной цепи, в высокоэластическом - с ориентацией и перемещением звеньев гибкой цепи без изменения среднего расстояния между соседними атомами [8].

Для полимерных материалов в условиях эксплуатации изделий как технического, так и бытового назначения характерны: ориентированное состояние макромолекул и микромеханизм процесса деформирования, близкий к типичному для стеклообразного состояния.

Вместе с тем при физической интерпретации наблюдаемых механических свойств полимерных материалов существенную роль играют общепринятые структурные двухфазные модели, представляющие чередование кристаллических и аморфных областей [6, 9].

Необходимо учитывать также возможность скольжений по поверхности ламелярных структурных элементов.

Уже из принятых моделей надмолекулярного строения ориентированных полимеров качественно видно, что соотношения между напряжением и деформацией имеют температурно-временной характер [10, 11].

Наблюдаемые корреляции между механическими свойствами и структурой также говорят в пользу представлений о решающей роли межатомных, межмолекулярных взаимодействий [12, 13]. Для задач физического моделирования полимера важное значение имеют наблюдения методом большеугловой рентгенографии [9, 14, 15], изучение формы поперечного сечения [16 - 18], выявление методом ядерно-магнитного резонанса важной роли аморфной составляющей структуры в определении механических свойств [9], установление активирующего влияния механического нагружения на разрыв химических связей в макромолекулах [9].

В целом анализ опубликованных сведений показывает, что структурно-физическая интерпретация механических свойств текстильных материалов в зоне разрушающих механических нагрузок развита сильнее, чем в зоне неразрушающих воздействий, которые типичны для условий эксплуатации изделий.

В последней одновременно проявляются три деформационных явления: упругость, вязкоупругость и пластичность.

Первое обусловлено изменением межатомных расстояний, валентных углов, количеством этих упругих взаимодействий, их ориентацией.

Второе связано с температурно-временными перегруппировками в основном в аморфных областях.

Третье, вероятнее всего, происходит за счет необратимых межфибриллярных проскальзываний.

Переход с качественно ясной структурной картины на физически обоснованную реологическую модель, одновременно аналитически описывающую все три указанные явления, следует считать далеким от завершения.

К материаловедческим и техническим приближениям при решении этой сложной физической задачи, по-видимому, может привести феноменологическое реологическое моделирование деформационных свойств полимерного материала.

Что же касается поиска глубоких физических решений этой задачи несомненную пользу составят обзоры фундаментальных работ [19 - 37].

1.2. Варианты деформации полимерных текстильных материалов

Деформационные процессы полимерных текстильных материалов проходят под действием внешней нагрузки и сопровождаются изменением деформации.

Как правило, деформацию делят на три основные компоненты [37 - 40]: упругую, вязкоупругую и пластическую.

Однако данное разделение можно считать условным.

В литературе встречаются и другие варианты разделения деформации, например, на упругую и вязкоупруго-пластическую компоненты [38 - 40] и др.

Деформационные свойства текстильных материалов существенно зависят от закона и продолжительности нагружения, температуры, наличия в них низкомолекулярных веществ, оказывающих пластифицирующее действие, в том числе влаги.

С уменьшением продолжительности деформирования текстильного материала (с увеличением скорости деформирования) замедляется релаксационный процесс - происходит механическое стеклование, связанное с уменьшением молекулярной подвижности, что приводит к снижению деформативности полимера.

Влияние температуры на деформационные свойства полимеров связано с изменением молекулярной подвижности и определяется их физическим состоянием.

Поэтому при переходе из застеклованного в вязкоупругое состояние уменьшается модуль релаксации и увеличивается удлинение при разрыве.

При уменьшении температуры наблюдается обратная зависимость.

Зависимость работы деформирования до разрыва от температуры при высоких скоростях растяжения носит более сложный характер, поскольку этот показатель зависит от изменения физического состояния волокон (расстекловывание с повышением температуры и механическое стеклование с ростом скорости деформирования) [13].

Основными механическими характеристиками текстильных материалов являются модуль релаксации

$$E_{\varepsilon t} = \frac{\sigma_t}{\varepsilon} \quad (1.1)$$

и податливость

$$D_{\sigma t} = \frac{\varepsilon_t}{\sigma}, \quad (1.2)$$

где t - время, ε - деформация, σ - напряжение.

Важными характеристиками механических свойств текстильных материалов являются также: изменение их размеров при длительном действии нагрузки (ползучесть), релаксация напряжений при прекращении деформирования и релаксация деформации после снятия нагрузки при отдыхе.

Эти характеристики определяются строением и физическим состоянием материала, которое в свою очередь зависит от температуры и продолжительности действия внешних факторов.

Определенную сложность представляет описание процесса восстановления после снятия нагрузки, так как данный процесс протекает под влиянием меняющихся во времени внутренних напряжений, характер изменения которых во времени достаточно сложен и зависит от условий и продолжительности первоначального нагружения.

Исследования процессов релаксации деформаций при отдыхе полимеров после нагружения [41] показали, что релаксационный спектр, характеризующий восстановление материала в зависимости от условий нагружения, сдвигается вдоль шкалы времени в определенную сторону, но его форма не претерпевает существенных изменений.

На основании этого факта предложена обобщенная зависимость вязкоупругого восстановления полимера, позволяющая прогнозировать данный процесс в широком диапазоне времен.

Поведение текстильных материалов при нагружении и деформировании определяется исходной структурой и её изменением, включающим как обратимые, так и необратимые процессы, которые существенно зависят и от внешних условий: температуры,

продолжительности и величины действующих напряжений, воздействия внешних факторов.

Упругая деформация полимеров происходит вследствие изменения длин химических связей, валентных углов и взаимного положения валентно не связанных атомов, обусловленного ограниченным вращением звеньев цепи друг относительно друга, вокруг связей, не лежащих в плоскости, параллельной оси ориентации, на угол меньший, чем требуется для преодоления потенциального барьера [13].

При малых нагрузках отклонение атомов от положения равновесия пропорционально действующей силе и величине соответствующего силового коэффициента.

Изменение длин химических связей, валентных углов и небольшие угловые изменения в конфигурациях элементарных звеньев распространяются в виде волны упругой деформации со скоростью звука [12, 42]. В силу сказанного, особую роль приобретает нахождение акустического значения модуля $E_{ак}$.

Вязкоупругая деформация связана с изменением конформаций макромолекул и изменением степени их асимметрии.

Она может сопровождаться перемещением отдельных участков макромолекул друг относительно друга с перераспределением части межмолекулярных связей [43].

Большие величины вязкоупругих деформаций связаны с сегментальной подвижностью макромолекул в аморфных участках и характерны только для полимеров с макромолекулами линейной структуры.

Проявление вязкоупругих свойств полимеров зависит от многих структурных факторов, как на молекулярном, так и на надмолекулярном уровне.

К ним относятся: гибкость макромолекул, определяемая внутримолекулярными взаимодействиями; относительная доля аморфных участков структуры, расположение в них макромолекул (ориентация, разная длина, число проходных и держащих нагрузку цепей); величина межмолекулярных взаимодействий.

Конформационные изменения в молекулярной структуре происходят со скоростями, на много порядков меньшими, чем распространение упругого импульса, причем их скорость постепенно убывает во времени. Скорости конформационных переходов существенно зависят от температуры.

В застеклованном состоянии они сравнительно невелики, но для значений температуры выше стеклования скорости резко возрастают. В пределах одного физического состояния скорости деформационного процесса достаточно хорошо описываются уравнением Аррениуса, в котором энергия активации зависит от величины приложенного напряжения [43]:

$$kT \cdot \ln \frac{\tau_{\sigma}}{\tau_0} \simeq U_{\sigma}, \quad (1.3)$$

где k - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура по Кельвину, $\tau_0 \simeq 10^{-13} \text{ с}$, τ_{σ} - время запаздывания, U_{σ} - убывающая энергия активации с начальным значением $U_{\sigma 0} \simeq 100 \text{ кДж / моль}$.

Пластическое деформирование связано с необратимым перемещением больших участков и макромолекул друг относительно друга.

При этом происходит диссоциация межмолекулярных связей между функциональными группами элементарных звеньев соседних макромолекул и образование новых связей.

Скорость необратимого перемещения макромолекул друг относительно друга в полимерах на несколько порядков меньше, чем изменения их конформаций при вязкоупругом деформировании.

Ее температурная зависимость также определяется уравнением Аррениуса.

Пластическая деформация аморфно-кристаллических полимеров с малым межмолекулярным взаимодействием связана с "продергиванием" полимерных цепей и их групп в кристаллах.

Скорость этого перемещения зависит от температуры и также определяется уравнением Аррениуса [13].

При растяжении текстильных материалов под действием внешней силы происходит деформация фибриллярной структуры: изменение ориентации кристаллитов и аморфных участков, деформация их в осевом направлении.

Ориентация кристаллитов в полимерах обычно достаточно высока, и поэтому ее увеличение при их растяжении сравнительно невелико.

В то же время ориентация макромолекул в аморфных участках при растяжении существенно возрастает [12].

Деформирование кристаллических и аморфных участков структуры протекает по-разному в связи с различием их структуры и распределением внешнего напряжения, зависящего от их расположения и относительной доли занимаемого объема.

В кристаллических областях нагрузка, приходящаяся на макромолекулы, распределяется достаточно равномерно, и их деформирование определяется "коллективным" растяжением молекулярных цепей, включающем деформации химических связей, валентных углов и ограниченное вращение звеньев (без конформационных переходов).

Эти деформации в широком диапазоне нагрузок происходят упруго и при снятии внешней нагрузки полностью обратимы.

В некоторых случаях происходят изменения в кристаллической структуре, связанные с появлением полиморфных модификаций [44].

Иначе происходит деформация аморфных областей структуры.

Из-за разной длины цепей нагрузка распределяется по ним неравномерно, и деформация определяется только частью проходных макромолекул.

Наиболее короткие цепи деформируются по механизму, сходному с рассмотренным выше.

Но более длинные участки проходных цепей деформируются по упругому механизму только при очень малых величинах нагрузок.

Затем деформация протекает по конформационному механизму, сопровождающемуся уменьшением доли изогнутых участков и увеличением доли выпрямленных конформаций, что требует значительно меньших усилий, чем осевая деформация цепей.

Изменение относительного содержания изогнутых и вытянутых конформаций приводит к изменению среднемолекулярной ориентации.

По мере увеличения нагрузки, действующей на макромолекулы, увеличивается их жесткость, кроме того, по мере деформации аморфных участков возрастает число включаемых в процесс макромолекул (определяемое их разной длиной) [45, 46].

Чем менее упорядочена структура полимера, тем в большей степени она изменяется при нагружении.

При этом происходят глубокие структурные перестройки, в значительной степени необратимые.

Не полностью ориентированные полимеры в процессе их нагружения могут дополнительно ориентироваться.

Таким образом, деформационные свойства полимера определяются, главным образом, деформируемостью аморфных областей структуры, поэтому основными структурными характеристиками, ответственными за деформационные свойства полимера, являются деформационные характеристики молекулярных цепей в аморфных участках структуры, а также число проходных цепей и их разнодлинность (а соответственно их ориентация), определяющих число держащих нагрузку цепей.

Аморфные участки являются и наиболее "слабыми местами", по которым происходит разрушение материала.

Кристаллиты как менее нагруженные области структуры вносят небольшую долю в процесс упругого деформирования.

Однако они являются своеобразными "физическими сшивками", фиксируя сложившуюся структуру и препятствуя проскальзыванию молекулярных цепей при нагружении.

Процессы деформирования при длительном действии внешней нагрузки и последующего отдыха протекают, в основном, по вязкоупругому механизму и связаны с конформационными переходами в аморфных областях структуры и перераспределением межмолекулярных связей.

Протекание этих структурных изменений связано с гибкостью макромолекул и величинами межмолекулярных взаимодействий, а также с температурой, определяющей уровень молекулярной сегментальной подвижности [44].

Чем больше жесткость макромолекул, межмолекулярное взаимодействие и меньше относительная температура (выше температуры стеклования), тем ниже скорость деформационных процессов.

Наряду с этим скорость деформационных процессов тем меньше, чем больше упорядоченность надмолекулярной структуры - величина кристалличности, ориентации.

Изменение надмолекулярной упорядоченности в значительной мере влияет на скорость деформационных процессов.

Величины вязкоупругого восстановления полимеров также определяются их аморфно-кристаллической структурой.

Высокой степенью вязкоупругости обладают гибкоцепные полимеры с невысокими значениями плотности энергии межмолекулярного взаимодействия (полиамидные и др.) и температурой стеклования вблизи или ниже комнатной температуры.

Несколько меньшую степень вязкоупругости имеют полимеры с более высокой температурой стеклования (полиакрилонитрильные и др.).

Отсутствие у этих полимеров сильных межмолекулярных связей (например, водородных) обуславливает слабо выраженные явления вынужденной вязкоупругости.

У полимеров с сильными межмолекулярными связями и высокой температурой стеклования (поливинилспиртовых, целлюлозных) сильно выражено явление вынужденной вязкоупругости, и они обладают невысокими вязкоупругими свойствами.

При действии внешней нагрузки на полимеры наряду с деформированием молекулярных цепей и перестройкой надмолекулярной структуры начинаются процессы разрушения, связанные с неравномерным распределением напряжений по молекулярным цепям в аморфных областях.

Нагрузка на наиболее короткие участки цепей достигает предразрывной, и наличие термических флуктуаций приводит к их диссоциации.

Число нагруженных цепей связано, с надмолекулярной структурой образца - чем больше её упорядоченность (кристалличность, ориентация), тем равномернее распределение напряжений по молекулярным цепям [47].

Таким образом, при определении деформационных параметров-характеристик текстильных материалов и при прогнозировании процессов нелинейно-наследственной вязкоупругости особую роль играет разделение полной деформации и полной механической работы деформирования на составные части, отвечающие тем или иным структурным изменениям материала, происходящим на микроуровне.

1.3. Эксплуатационные процессы полимерных текстильных материалов

Феноменологическое моделирование деформированных состояний изотропных твердых тел получило интенсивное фундаментальное развитие как разделы физики и строительной механики [15, 36, 37, 48 - 51].

Реология охватывает из твердых тел тело Гука, из жидкостей - ньютонову жидкость.

Первое - идеально упругое тело - рассматривается в классической теории упругости, второе - "простая" вязкая жидкость - в классической гидродинамике.

К ним следует добавить еще тело Сен-Венана - твердое тело, обладающее пределом текучести.

Тело Сен-Венана изучает идеальная пластичность.

Все другие "реологические тела" могут рассматриваться как комбинации этих трех основных тел.

При гироскопическом давлении все материалы, жидкие и твердые ведут себя с достаточной степенью приближения одинаково: они являются идеально упругими.

Реологические различия особенно ярко проявляются при сдвиге (или в более общем случае при формоизменении).

Следовательно, каждый материал обладает двумя реологическими уравнениями - одним для деформации объема, общим для всех тел, и другим для формоизменения, специфичным для каждого тела в отдельности [15].

Изложенные исходные положения этой науки вместе с ее математическим аппаратом для анализа механических свойств такого анизотропного материала как синтетическая нить представляет лишь качественный интерес.

В физике твердых полимерных тел общим признанием пользуется линейная теория вязкоупругости.

По существу Больцманом было произведено обобщение закона Гука на случай релаксирующего модуля

$$\sigma_t = \int_{-\infty}^t \frac{\partial \varepsilon_\theta}{\partial \theta} \cdot E_{t-\theta} \cdot d\theta, \quad (1.4)$$

где σ - напряжение; ε - деформация; t - конечный момент времени; E_t - модуль релаксации.

Это уравнение, построенное на основе принципа суперпозиции Больцмана, определенным образом отражает "память" процесса деформирования [36], оно получило название "интегральное уравнение наследственного типа" [50]. Считается, что оно отражает наследственно-упругие свойства материала [50]. Полезно увидеть, что при $t \ll \tau$, где τ - время релаксации, материал ведет себя упруго

$$\sigma_{t \ll \tau} \rightarrow E_0 \cdot \varepsilon_t, \quad (1.5)$$

а при $t \gg \tau$

$$\sigma_{t \gg \tau} \rightarrow E_\infty \cdot \varepsilon_t, \quad (1.6)$$

где E_0 - модуль упругости; E_∞ - модуль вязкоупругости, т. е. "отрелаксировавший" модуль.

Аналогичным образом можно провести сложение бесконечно малых деформационных вкладов

$$\varepsilon_t = \int_{-\infty}^t \frac{\partial \theta_\theta}{\partial \theta} \cdot D_{t-\theta} \cdot d\theta \quad (1.7)$$

где D - податливость, имеющая следующие крайние значения: $D_0 = \frac{I}{E_0}$ и

$$D_\infty = \frac{1}{E_\infty}.$$

Для процесса ползучести, когда напряжение σ приложено квазигмновенно в момент времени $\theta \cong 0$, из уравнения (1.7) получается формула

$$\varepsilon_t = \sigma \cdot D_t. \quad (1.8)$$

Таким же образом из (1.4) получается формула для релаксации напряжения при квазигмновенно приложенной деформации

$$\sigma_t = \varepsilon \cdot E_t. \quad (1.9)$$

Из экспериментов в режимах ползучести и релаксации легко выясняется наличие независимости модуля и податливости от уровня механического воздействия.

Также измерения на гибкоцепных нитях, как правило, обнаруживают нарушение этого требования со стороны рассмотренных уравнений наследственного типа.

Оказывается, что по мере увеличения задаваемых значений напряжения или релаксации процессы ползучести или релаксации протекают быстрее [52].

Скорее всего, такой активирующий характер механического воздействия обусловлен чередованием кристаллитов с менее плотными аморфными упаковками макромолекул, а также наличием межфибриллярных прослоек [9, 52].

В ряде публикаций отмечается, что микромеханизмы процессов деформирования на неразрушающих стадиях у ориентированных полимеров сосредоточены в областях надмолекулярного строения [9].

Несмотря на указанные отклонения синтетических нитей от требований линейной вязкоупругости, уравнения (1.4) и (1.7) являются отправным пунктом при аналитическом описании уже нелинейной вязкоупругости синтетических нитей.

К аналитическому обобщению уравнений (1.4) и (1.7) на случай нелинейной вязкоупругости синтетической нити ближе следующая форма записи этих уравнений [51, 52]

$$\sigma_t = E_0 \cdot \varepsilon_t + \int_0^t \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{\partial E_s}{\partial s} \cdot ds, \quad (1.10)$$

$$\varepsilon_t = D_0 \cdot \sigma_t + \int_0^t \sigma_{t-s} \cdot \frac{\partial D_s}{\partial s} \cdot ds, \quad (1.11)$$

где $s = t - \theta$; в интервале текущего времени $(-\infty, 0]$ механических воздействий на исследуемый материал не было.

Если релаксирующий модуль задается в виде

$$E_t = E_0 - (E_0 - E_\infty) \cdot \varphi_t, \quad (1.12)$$

где φ_t - нормированная релаксационная функция, изменяющаяся от нуля до единицы, то уравнение (1.10) запишется в виде

$$\sigma_t = E_0 \cdot \varepsilon_t - (E_0 - E_\infty) \cdot \int_0^t \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{\partial \varphi_s}{\partial s} \cdot ds \quad (1.13)$$

Если податливость - "запаздывающая упругость" [300, 304] - задается аналогичным образом

$$D_t = D_0 + (D_\infty - D_0) \cdot \psi_t \quad (1.14)$$

где ψ_t - нормированная функция запаздывания, то уравнение (1.11) запишется в виде

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E_0} \cdot \sigma_t + \left(\frac{1}{E_\infty} - \frac{1}{E_0} \right) \cdot \int_0^t \sigma_{t-s} \cdot \frac{\partial \psi_s}{\partial s} \cdot ds. \quad (1.15)$$

Производные нормированных функций релаксации и ползучести, содержащиеся в уравнениях (1.13) и (1.15), называются ядром релаксации и ядром запаздывания (ползучести) соответственно.

Зависимость каждого из этих ядер только от времени является признаком линейности вязкоупругих свойств твердого тела.

1.4. Деформационно-временная и сило-временная аналогии при моделировании эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов

Накопленный опыт работ по аналитическому описанию деформационных свойств различных текстильных материалов - нитей, тканей, лент, трикотажных полотен, кожи, композитных материалов - показывает, что эти материалы обладают нелинейными вязкоупругими свойствами.

На интенсивность протекания процессов запаздывания или релаксации помимо времени оказывают влияние также и уровни механического воздействия.

Теория вязкоупругости указанных материалов строится посредством обобщения уравнений линейной вязкоупругости (1.13) и (1.15) [52 - 55].

При таком обобщении использовались известные физические представления о температурно-сило-временной или температурно-деформационно-временной аналогиях.

Стремление к сочетанию ясной физической интерпретации параметров с удобствами расчетов было продиктовано решением задач в следующих направлениях: анализ физико-механических свойств реальных материалов; взаимосвязь этих свойств с технологией изготовления этих

материалов; расчетное прогнозирование кратковременных и длительных механических нагрузений; расчеты процессов деформирования на различных технологических стадиях; расчеты статически неопределимых конструкций.

Состоявшееся построение уравнений нелинейной вязкоупругости [52 - 55] опирается на современные представления об активирующем действии механической нагрузки и накопленный опыт экспериментальных исследований [56 - 60].

Больцмановская спектральная аналитическая интерпретация обобщенных указанным образом ядер релаксации и запаздывания была показана в работах [52, 61].

Обобщение заключается в том, что в уравнениях (1.13) и (1.15) в нормированные функции вводятся: в качестве параметра релаксации - величина деформации и в качестве параметра запаздывания - величина напряжения соответственно.

Проиллюстрируем это на примере использования интеграла вероятности

$$\varphi_{\varepsilon t} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{V_{\varepsilon t}} e^{-0,5z^2} \cdot dz = \Phi(-\infty, V_{\varepsilon t}), \quad (1.16)$$

где

$$V_{\varepsilon t} = \frac{1}{a_{n \text{ рел.}}} \cdot \ln \frac{t}{\tau_{\varepsilon}} = \frac{1}{a_{n \text{ рел.}}} \cdot \left(\ln \frac{t}{t_1} + \ln \frac{t_1}{\tau_{\varepsilon}} \right) - \quad (1.17)$$

деформационно-временная функция; t_1 - базовое время (как правило, $t_1 = 1 \text{ мин.}$); τ_{ε} - время релаксации, зависящее от деформации ε ; $a_{n \text{ рел.}}$ - параметр исследуемого материала, характеризующий ширину нормированного релаксационного спектра по отношению к логарифмической шкале времен релаксации [52, 61].

Активирующую роль деформации можно рассматривать как проявление деформационно-временной аналогии, которую характеризует деформационная функция

$$f_{\varepsilon_1 \varepsilon} = \ln \frac{t_1}{\tau_{\varepsilon}}, \quad (1.18)$$

где ε_t - значение деформации, при котором $\tau_{\varepsilon_1} = t_1$.

Нормированной релаксационной функции (1.16) соответствует нормированное ядро релаксации в виде логарифмически нормального распределения.

$$r_{\varepsilon t} = \frac{\partial \varphi_{\varepsilon t}}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{a_{n \text{ рел.}}} \cdot \frac{1}{t} \cdot e^{-0,5 \cdot V_{\varepsilon t}^2}. \quad (1.19)$$

С учетом такого преобразования нормированной релаксационной функции преобразованное ядро релаксации можно называть деформационно-временным ядром релаксации, подразумевая под этим использование деформационно-временной аналогии [52].

Аналогичным образом можно задавать нормированную функцию запаздывания

$$\psi_t = \varphi_{\sigma t} = \Phi(-\infty, V_{\sigma t}), \quad (1.20)$$

где

$$V_{\sigma t} = \frac{1}{a_{n \text{ пол.}}} \cdot \ln \frac{t}{\tau_{\sigma}} = \frac{1}{a_{n \text{ пол.}}} \cdot \left(\ln \frac{t}{t_1} + \ln \frac{t_1}{\tau_{\sigma}} \right) - \quad (1.21)$$

сило-временная функция,

$$f_{\sigma_1 \sigma} = \ln \frac{t_1}{\tau_{\sigma}} - \quad (1.22)$$

силовая функция, отражающая активирующее действие напряжения или сило-временную аналогию.

Этому будет соответствовать сило-временное ядро запаздывания

$$r_{\sigma t} = \frac{\partial \varphi_{\sigma t}}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{a_{n \text{ пол.}}} \cdot \frac{1}{t} \cdot e^{-0,5 \cdot V_{\sigma t}^2} \quad (1.23)$$

Симметрия обоих ядер по отношению к логарифмической шкале времени существенно упрощает определение численных значений характеристик [52].

В то же время не следует забывать, что совместимость указанных симметрий обоих ядер, строго говоря, противоречит совместимости обоих уравнений (1.17) и (1.19) при состоявшемся их преобразовании.

Однако этот запрет не обязательно распространяется на расчеты с удовлетворительной точностью.

Рассмотренное дальнейшее преобразование больцмановской наследственной вязкоупругости привело к более физически сложной математической наследственной механике, моделирующей свойства реальных твердых материалов.

Вместе с тем достигнутый минимум деформационных характеристик любого из двух интегральных уравнений - три параметра и одна функция - обеспечивают успех практического использования этих уравнений.

В то же время, сложность строения ориентированного полимера на надмолекулярном уровне обуславливает необходимость тщательной экспериментальной проверки "работоспособности" рассматриваемых интегральных уравнений наследственного типа с деформационно-временным и сило-временным ядрами запаздывания и релаксации соответственно.

1.5. Параметры эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов

Методы определения вязкоупругих параметров-характеристик текстильных материалов не только позволяют проанализировать их

деформационные свойства, но и имеют важное прикладное значение для решения задач по сравнительному анализу и целенаправленному регулированию механических свойств указанных материалов.

В настоящее время известно большое многообразие методик исследования механических свойств текстильных материалов.

Однако предлагаемые методики не всегда являются оптимальными, зачастую используют избыточное число параметров-характеристик и подчас не обладают достаточной точностью прогнозирования деформационных процессов.

На сегодняшний день общепризнанными считаются методы определения вязкоупругих параметров-характеристик и прогнозирования деформационных процессов, разрабатываемые в лаборатории информационных технологий СПбГУПТД под руководством профессоров Макарова А.Г. [62 - 70] и Переборовой Н.В. [71 - 80].

Методы, разработанные в данной лаборатории, обладают рядом преимуществ по сравнению с аналогичными методами, разрабатываемыми другими научными коллективами.

В частности, все они содержат минимальное число физически обусловленных вязкоупругих параметров-характеристик.

Основой указанных методик служат полученные экспериментально с помощью различного рода релаксметров напряжений и деформаций, а также другого экспериментального оборудования, разработанного в данной лаборатории, "семейства" кривых релаксации и ползучести.

При этом нет необходимости рассматривать "семейства", состоящие из большого числа кривых релаксации и ползучести, так как предлагаемые методики обладают достаточной степенью устойчивости к эксперименту.

Для полноценного применения методик вполне достаточно "семейств", состоящих из 5 - 6 экспериментальных кривых.

Кроме того, методики предполагают, что внешнее (лабораторное) время эксперимента выбирается не очень большим.

Здесь, например, вполне достаточно времени исследования порядка 5 - 10 минут (за исключением исследования длительных деформационных процессов).

Таким образом, на проведение эксперимента затрачивается малое время, что позволяет достаточно быстро иметь отправные для методик экспериментальные "семейства" релаксации и ползучести.

Учитывается также, что современные многопозиционные релаксометры позволяют одновременно проводить измерения на нескольких образцах.

Поэтому наличие в релаксометре, например, шести позиций позволяет получать экспериментальные "семейства" за один цикл измерений, т.е. за 5 - 10 минут.

Важную роль в процессе исследования механических свойств текстильных материалов играет разложение полной деформации и полной механической работы деформирования на упругие и поглощаемые компоненты.

Данное разложение может быть получено как экспериментальным путём - с использованием диаграмм растяжения, так и расчётным - с помощью интеграла нелинейно-наследственной вязкоупругости.

Процесс выделения поглощаемой компоненты деформации из полной деформации может быть продолжен путём выделения необратимого (пластического) компонента из поглощаемой компоненты деформации.

Несомненную актуальность методики разделения полной деформации и полной работы деформирования на компоненты имеют при прогнозировании деформационных процессов текстильных материалов.

Это следует из того, что по соотношению величин упругой, вязкоупругой и пластической деформации можно судить о внутреннем микромеханизме деформирования материала.

Данный факт является важным как на стадии целенаправленного технологического отбора материалов, обладающих необходимыми механическими свойствами, так и на стадии производства - для контроля за технологическим процессом, чтобы избежать производства материалов, обладающих нежелательными внутренними структурными изменениями.

При разработке методик определения вязкоупругих параметров-характеристик и прогнозирования деформационных процессов необходимо учитывать, что при этом ключевой задачей является задача определения времён релаксации и запаздывания.

Однако, в отличие от определения других вязкоупругих параметров-характеристик, например, таких как время жизни нагруженного материала, разрывной деформации и разрывного напряжения, которые можно произвести экспериментальным путём, времена релаксации и запаздывания не подлежат экспериментальному определению в силу своей природы.

Тем самым, задачи определения времён релаксации и запаздывания относятся к задачам математической физики, в отличие от приведённых примеров, которые относятся к задачам экспериментальной физики.

1.6. Микромеханизмы эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов

Для выявления наиболее вероятного микромеханизма релаксации и ползучести текстильных материалов необходимо проанализировать сложившиеся представления о надмолекулярной структуре высокоориентированных полимеров.

Интенсивность измеряемой макрорелаксации внешнего усилия определяется количеством сегментально-молекулярных перегруппировок, происходящих, прежде всего, в аморфных межкристаллитных прослойках.

Если бы количество и объем таких прослоек не изменялись, то не наблюдались бы существенные отклонения от линейной вязкоупругости.

Однако, по мере деформирования, наблюдается обратимое увеличение весовой доли молекул, находящихся в аморфном состоянии, которые имеют меньшие времена релаксации по сравнению с молекулами, находящимися в более упорядоченных областях – кристаллитах и кристаллоподобных тяжах [81].

Под действием нагрузки или при повышении температуры происходит обратимый распад тяжей, и увеличение весовой доли сегментов макромолекул в аморфных прослойках.

Таким образом, наблюдаемая изменчивость релаксационного спектра как разновидность нелинейности вязкоупругих свойств высокоориентированного полимера объясняется обратимым распадом тяжей, расположенных в аморфных прослойках.

С такой интерпретацией нелинейно-наследственной вязкоупругости в целом согласуются результаты других исследований механического поведения высокоориентированных волокон из аморфно-кристаллических полимеров: восстановительных деформационных процессов, происходящих после полной или частичной разгрузки и высокоскоростного их растяжения.

Кроме того, наблюдаемое отставание восстановительных деформационных процессов от прогнозируемого, зависимость измеряемого модуля релаксации от скорости деформации, возможность учета релаксационных вкладов при высоких скоростях деформирования – все эти особенности деформационного поведения ориентированных

аморфно-кристаллических образцов полимеров, по крайней мере, не противоречат изложенной выше специфической роли тяжей [82].

Ведущая роль "распада" тяжей подтверждается также оценками значений потенциальных барьеров макромолекулярной подвижности, определяющей процессы ползучести и релаксации.

Оценки проводили по формуле Аррениуса (1.3).

Зависимости вычисляемых потенциальных барьеров соответственно от напряжения и от деформации, как было показано [83] можно считать линейными.

Близость значений энергий активаций процессов релаксации и ползучести согласуется с представлением об идентичности микромеханизмов процессов ползучести и релаксации.

Таким значениям соответствует сегментальная подвижность на молекулярном уровне структуры, что не противоречит предположению о существовании кристаллоподобных тяжей в межкристаллитных аморфных прослойках.

В работе [81] проводится оценка размеров элементарных "носителей" релаксационных процессов.

Показано, что величина больших периодов в высокоориентированных образцах гибкоцепных аморфно-кристаллических полимеров обычно колеблется в пределах 10-20 nm, сравнительно редко достигая 30-50 nm при достаточно высоких температурах обработки.

Показано [81], что элементарным носителем релаксационных процессов является сегмент макромолекулы длиной 5 - 8 nm, что представляется разумным результатом с физической точки зрения. Количество мономерных звеньев, кооперативно участвующих в релаксационных процессах, зависит от длины проекции звена на ось текстуры.

Проведенные оценки кинетических характеристик согласуются с предположением о ведущей роли обратимого распада кристаллоподобных тяжей в микромеханизме наблюдаемого активирующего действия макродеформирования на спектры релаксации.

1.7. Цифровизация эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов

Переход методик определения вязкоупругих параметров-характеристик текстильных материалов и методик прогнозирования нелинейно-наследственных деформационных процессов на компьютерную основу связан, во-первых, со сложностью точного описания процессов деформирования полимеров, нетривиальностью и трудоёмкостью их исследования, во-вторых, существенное повышение эффективности и качества проведения испытаний возможно лишь путём автоматизации, обеспечивающей задание и измерение параметров опыта и необходимую обработку данных, в частности, с применением статистических методов, в-третьих, компьютеризация методик прогнозирования диктуется научно-техническим прогрессом и достаточной степенью доступности вычислительной техники в современных условиях.

Современные методики определения вязкоупругих параметров полимеров, так же как и методики прогнозирования процессов нелинейно-наследственной релаксации, как правило, основаны на применении вычислительной техники.

Компьютерная обработка экспериментальных данных, также как и возможность быстрого численного решения, достаточно сложных интегральных уравнений, составляющих основу нелинейно-наследственной теории вязкоупругости текстильных материалов, позволяет практически сразу же после получения экспериментальных

данных иметь прогноз на поведение материала в тех или иных условиях, причём точность такого прогноза значительно выше, чем точность прогноза, полученного по некомпьютеризированным методикам.

Использование компьютеризации, основанной на современных информационных методах, позволяет также оперативно получать прогноз параллельно по нескольким различным методикам, что существенно увеличивает достоверность и надёжность прогнозируемых параметров.

Компьютеризация методик прогнозирования в настоящих условиях имеет особую актуальность в силу общей доступности, сравнительно невысокой цены и всестороннего внедрения компьютеров в научные исследования, в учебный процесс и на производстве.

Информационные технологии позволяют в несколько раз (а иногда и в десятки!) уменьшить трудозатраты как в научных исследованиях, так и на производстве при обработке экспериментальных данных.

В литературе встречаются многочисленные примеры использования компьютерной техники для исследования механических свойств текстильных материалов.

Так, например, для исследования термо-оптико-механических свойств образцов, моделей и изделий из полимерных материалов, в том числе, с применением информативного экспериментального поляризационно-оптического метода решения краевых задач механики в НИИ математики и механики Санкт-Петербургского государственного университета создана испытательная установка, автоматизированная на базе персонального компьютера [35].

Конструкция данной установки имеет блочную структуру, позволяющую использовать установку и её узлы для проведения различных экспериментальных исследований материалов и изделий, а также применять её для макетирования разнообразных новых испытательных устройств.

Встречаются также и установки других типов, однако, общим для всех является применение ЭВМ, в основном в виде персонального компьютера.

Существенную роль в обработке экспериментальных данных в лаборатории информационных технологий СПбГУПТД играет компьютеризация вычислений с помощью современных ЭВМ.

Разработанное программное обеспечение [84] позволяет свести процедуру обработки экспериментальных "семейств" релаксации и ползучести к простейшему действию на уровне общения оператора, с помощью разработанного интерфейса, с вычислительной техникой.

Данное обстоятельство существенно сказывается на производительности труда, так как работа оператора не требует специальной квалификации и доступна практически любому, имеющему опыт работы на ЭВМ.

Компьютерные методики [85] обладают следующими преимуществами перед методиками, не использующими ЭВМ: оперативностью - ввиду малых затрат времени, простотой обработки эксперимента - ввиду компьютеризации расчёта, простотой работы на ЭВМ - ввиду удобного интерфейса.

Всё это способствует широкому внедрению разработанных методик определения параметров-характеристик релаксации и ползучести как в области научного исследования текстильных материалов, включая и учебный процесс, так и в области их производства - для оперативного целенаправленного технологического контроля за параметрами-характеристиками производимых материалов [86].

Включение методик определения вязкоупругих параметров-характеристик и прогнозирования деформационных процессов в единые программные пакеты определяет их универсальность и возможность использования при прогнозировании вязкоупругих процессов текстильных

материалов любой сложности.

Создание удобного и наглядного интерфейса позволяет освоить применимость данных методик персоналу с минимальной степенью подготовленности и не требует специальной квалификации.

1.8. Выводы по главе 1

Математическое моделирование процессов релаксации и ползучести подразумевают наличие неких микромеханизмов процессов релаксации и запаздывания.

Это обстоятельство определенным образом идеализирует реальную картину сило-тепловых перегруппировок частиц на надмолекулярном уровне строения ориентированных полимеров.

Вероятнее всего решающими оказываются межмолекулярные взаимодействия, расположенные в аморфных межкристаллитных и межфибриллярных прослойках.

К сложности энергетической картины перестройки таких взаимодействий добавляется еще сложная картина термодинамического описания одноосно-ориентированного состояния аморфно-кристаллического полимера, а также фактор снижения набора конформационных перегруппировок по мере деформирования текстильного материала [9].

Из этих трех возможных объяснений наблюдаемых отклонений расчета от эксперимента трудно выбрать какое-либо одно.

Именно так обстояло дело при обнаружении таких отклонений при анализе деформационно-восстановительных процессов [87 - 90].

Предполагаемые объяснения этих отклонений в рамках вязкоупругих свойств текстильных материалов способствовали решению

задачи об уточнении расчета деформационно-восстановительных процессов и других сложных режимов деформирования [87 - 90].

Обнаружение пластического компонента деформации затрудняется "термодинамическим" стремлением ориентированного полимера к усадке.

Именно этим затруднением объясняются попытки обойтись без этого компонента.

Кратко изложенные в настоящей главе современные представления о методах анализа механических свойств текстильных материалов, описанные известные способы прогнозирования их деформационных процессов и возможность компьютеризации методик прогнозирования показывают актуальность задачи, решение которой предлагается в данной работе.

Научные исследования по разработке методов математического моделирования эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов были продолжены, в том числе, в работах автора диссертации [91 - 112].

По результатам проведенных исследований было разработано программное обеспечение [113 - 116], позволяющее определять параметры указанных математических моделей, а также осуществлять цифровое прогнозирование эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов.

2. Математическое моделирование эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов

В настоящей главе приводится информация об объектах исследования - полимерных текстильных материалах, в виде которых представлены полимерные текстильные нити различного компонентного состава и различной линейной плотности, а также изготовленные из них полимерные текстильные полотна, различного компонентного состава.

Кроме этого, поэтапно излагаются вопросы проведения экспериментальных исследований эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов, варианты построения математических моделей указанных свойств этих материалов, а также методы проверки работоспособности приведенных моделей с целью их дальнейшего применения при прогнозировании эксплуатационных процессов.

2.1. Описание объектов исследования - полимерных текстильных материалов

Объектами исследования являются полимерные текстильные материалы относительно простой макроструктуры в виде полимерных текстильных нитей различного компонентного состава и различной линейной плотности, технические характеристики которых приведены в табл. 2.1.

К исследуемым в диссертации объектам более сложной макроструктуры следует отнести текстильные полотна, изготовленные из указанных выше полимерных текстильных нитей.

Таблица 2.1. - Технические характеристики полимерных текстильных нитей

Условное обозначение	Компонентный состав	Линейная плотность, Текс	Разрывная деформация, %	Разрывное напряжение, ГПа	Изготовитель
ЛН-114	лавсан	114	16,7	0,86	ВНИИСВ, Тверь
ЛН-16	лавсан	16	24,5	0,54	"Химволокно", Курск
КН-91	капрон	91	14,2	0,97	"Клинволоконно", Клин
КН-187	капрон	187	16,5	0,89	ВНИИСВ, Тверь
КН-210	капрон	210	18,3	0,82	НИИТТ, Ярославль

Технические характеристики изучаемых полимерных текстильных полотен приведены в табл. 2.2.

Выбор приведенных объектов исследования определялся их репрезентативностью среди большого многообразия полимерных текстильных материалов.

Кроме того, приведенный набор объектов исследования позволяет проводить сравнение эксплуатационных свойств изучаемых материалов в зависимости от их компонентного состава, линейной (для нитей) и поверхностной (для полотен) плотности.

Таблица 2.2. - Технические характеристики полимерных текстильных полотен

Условное обозначение	Ширина, мм	Компонентный состав, %	Линейная плотность, Текс (основа/уток)	Разрывная деформация, %	Разрывная нагрузка, кН
ЛКП-130	130	лавсан -60, капрон - 40	6,7/9,6	18	2,9
КП-100	100	капрон-100	3,3/5,2	22	3,7
ЛП-140	140	лавсан -100	7,2/9,8	19	3,4
ЛКП-150	150	лавсан -80, капрон -20	6,8/9,5	21	3,6
КП-120	120	капрон-100	5,2/5,2	18	3,1

2.2. Экспериментальное исследование релаксационного процесса полимерных текстильных материалов

Исследования процесса релаксации начинаются с проведения эксперимента, в основу которого положены методики, разработанные в лаборатории информационных технологий СПбГУПТД.

Эксперимент в режиме релаксации проводился на релаксометре напряжений.

После закрепления образца текстильного материала в зажимах релаксометра напряжений, образец удлинялся на величину заданного относительного удлинения $\varepsilon = const$.

Далее по приборам в заданные моменты времени t снимались значения напряжений σ_t .

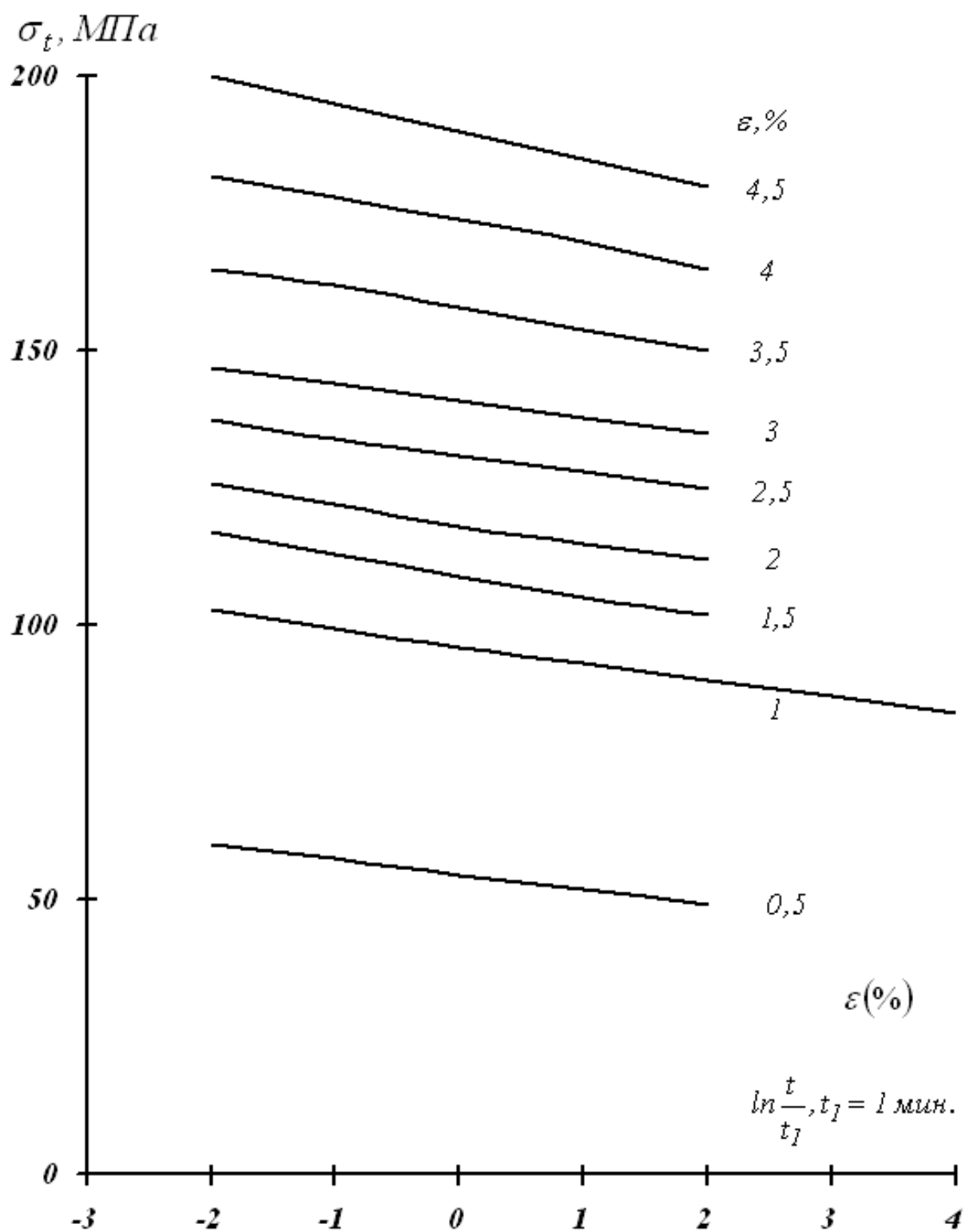


Рисунок 2.1. - Графическое изображение "семейства" кривых релаксации напряжений при различных значениях деформации полимерной текстильной нити ЛН-114, $T = 20^\circ\text{C}$

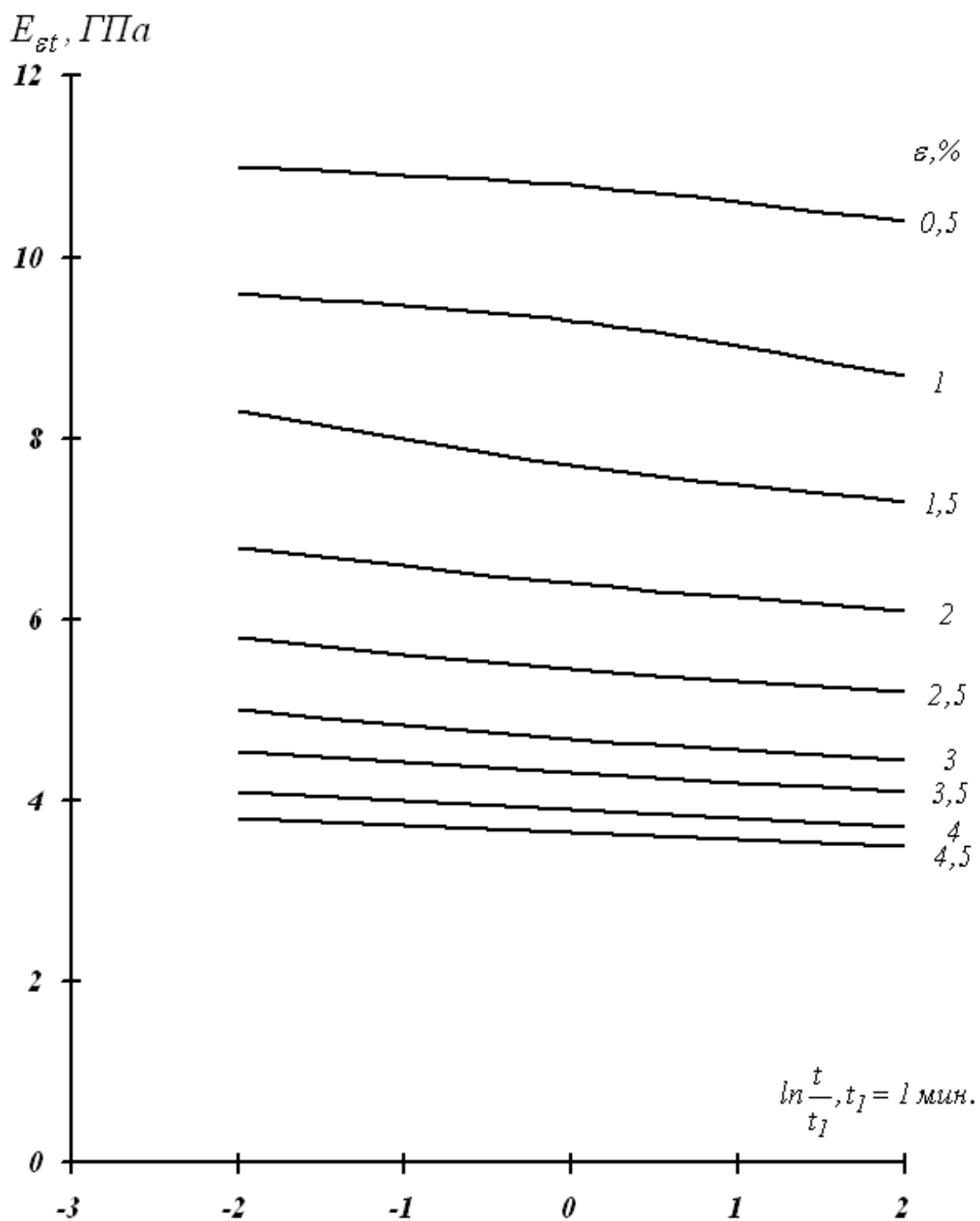


Рисунок 2.2. - Графическое изображение "семейства" кривых модуля релаксации при различных значениях деформации полимерной текстильной нити ЛН-114, $T = 20^{\circ}C$

По результатам эксперимента были построены графики зависимости величины напряжения σ_t от времени t в логарифмическо-временной шкале безразмерного времени $\frac{t}{t_1}$ (рис. 2.1):

$$\sigma_t = \sigma(t, \varepsilon), \quad (2.1)$$

где

t_1 - некоторое значение "базового" времени, в качестве которого часто принимается $t_1 = 1 \text{ мин.}$

Указанные графики, построенные для нескольких значений деформации ε , образуют в совокупности "семейства" кривых релаксации напряжений.

Пример "семейства" кривых релаксации напряжений для полимерной текстильной нити ЛН-114 (линейная плотность 114 Текс, разрывное напряжение $\sigma_p = 0,86 \text{ ГПа}$, разрывная деформация $\varepsilon_p = 16,7 \%$, изготовлена во ВНИИСВ, г. Тверь) при температуре $T = 20^\circ \text{C}$ приведен на рис. 2.1.

Далее кривые "семейства" релаксации напряжений перестраивают в кривые "семейства" модуля релаксации $E_{\varepsilon t}$ по формуле

$$E_{\varepsilon t} = \frac{\sigma_t}{\varepsilon}. \quad (2.2)$$

Пример "семейства" кривых модуля релаксации для полимерной текстильной нити ЛН-114, $T = 20^\circ \text{C}$ приведен на рис.2.2.

2.3. Математическое моделирование релаксационного процесса полимерных текстильных материалов

Аппроксимируем модуль релаксации $E_{\varepsilon t}$, определенный по формуле (2.2), с помощью нормированной релаксационной функции $\varphi_{\varepsilon t}$

$$E_{\varepsilon t} = E_0 - (E_0 - E_{\infty})\varphi_{\varepsilon t}, \quad (2.3)$$

где

E_0 - модуль упругости,

E_{∞} - модуль вязкоупругости.

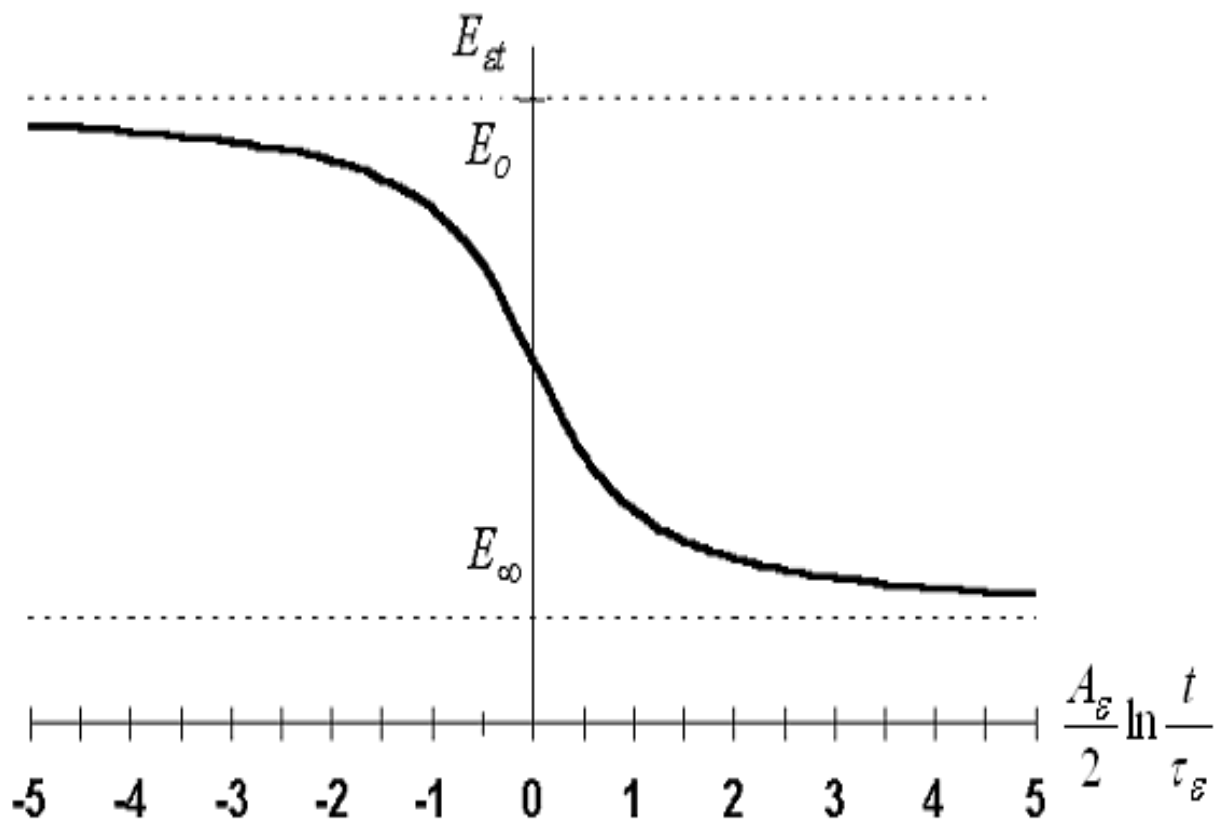


Рисунок 2.3. - Графическое изображение модуля релаксации

Схематически график модуля релаксации в логарифмической системе координат показан на рис.2.3.

Функция (2.3) представляет собой математическую модель модуля релаксации, которой удобно пользоваться, как при описании процессов простой релаксации ($\varepsilon = const$), так и при описании более сложных процессов, например, процессов обратной релаксации, когда имеется некоторый закон изменения деформации во времени.

В качестве релаксационной функции $\varphi_{\varepsilon t}$ допустимо применение любой нормированной, неубывающей, определенной для значений времени $t > 0$ функции, причем:

$$\lim_{t \rightarrow 0} \varphi_{\varepsilon t} = 0, \quad (2.4)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varphi_{\varepsilon t} = 1. \quad (2.5)$$

Для удобства исследований в качестве аргумента функции $\varphi_{\varepsilon t}$ выбирают безразмерное время $\frac{t}{\tau_{\varepsilon}}$, где τ_{ε} - время релаксации, зависящее от деформации ε .

Традиционно функция $\varphi_{\varepsilon t}$ выбирается либо в виде интеграла вероятности:

$$\varphi_{\varepsilon t} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{t}{\tau_{\varepsilon}}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz, \quad (2.6)$$

что физически оправдано, так как большое число физических процессов статистически описываются законами, близкими к нормальному закону распределения, для которого интеграл вероятности является интегральной функцией распределения, либо в виде функции Кольрауша:

$$\varphi_{\varepsilon t} = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau_{\varepsilon}}\right)^{k_{\varepsilon}}}, \quad (2.7)$$

имеющей более простой аналитический вид, чем интеграл вероятностей и, тем самым, являющейся привлекательной для исследователей.

Здесь константы a_ε и k_ε - есть структурные параметры интенсивности процесса релаксации, зависящие от релаксационных свойств материала и от выбора нормированной функции.

Макаровым А.Г. для моделирования релаксации полимерных текстильных материалов в качестве функции $\varphi_{\varepsilon t}$ начал применяться нормированный арктангенс логарифма приведенного времени

$$\varphi_{\varepsilon t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{b_\varepsilon} \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} \right), \quad (2.8)$$

где

b_ε - структурный параметр интенсивности процесса релаксации, соответствующий выбранной функции (2.8).

Данная функция положительно зарекомендовала себя при моделировании релаксационных свойств полимерных текстильных материалов сложного строения.

В настоящее время остается малоизученной для прогнозирования процессов релаксации еще одна функция - нормированный гиперболический тангенс логарифма приведенного времени:

$$\varphi_{\varepsilon t} = \frac{1}{2} \left(1 + th \left(\frac{A_\varepsilon}{2} \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} \right) \right), \quad (2.9)$$

где

A_ε - структурный параметр интенсивности процесса релаксации, соответствующий выбранной функции (2.9).

Преимуществом функции (2.9) является близкое сходство с интегралом вероятности, в чем можно убедиться, сравнивая значения функций, соответствующие одинаковым аргументам, и, в тоже время, более простая аналитическая форма ее задания, так как, в отличие от интеграла вероятности, она является элементарной, что существенно упрощает интегро-дифференциальные преобразования, неизбежные при дальнейшем прогнозировании релаксационных процессов.

Опишем метод определения параметров релаксации по обработке экспериментального "семейства" релаксации на примере полимерной текстильной нити ЛН-114 (линейная плотность 114 Текс, разрывное напряжение $\sigma_p = 0,86 \text{ ГПа}$, разрывная деформация $\varepsilon_p = 16,7 \%$, изготовлена во ВНИИСВ, г. Тверь) при температуре $T = 20^\circ \text{C}$ (рис. 2.1).

В качестве релаксационной функции $\varphi_{\varepsilon t}$ выберем функцию (2.9).

Геометрически с помощью тангенса угла наклона касательных к кривым $E_{\varepsilon t}$ на рис.2.2 определим производные модуля релаксации по логарифмическо-временной шкале

$$E'_{\varepsilon t} = \frac{\partial E_{\varepsilon t}}{\partial \ln \frac{t}{t_1}} = \frac{\partial E_{\varepsilon t}}{\partial (\ln t - \ln t_1)} = \frac{\partial E_{\varepsilon t}}{\partial \ln t}. \quad (2.10)$$

Выберем фиксированное значение базового времени $t_1 = 60 \text{ с}$ и построим для него изохроны модуля релаксации $E_{\varepsilon t_1}$ (рис.2.4) и его

производной $E'_{\varepsilon t_1} = \left. \frac{\partial E_{\varepsilon t}}{\partial \ln t} \right|_{t=t_1}$ (рис.2.5).

На основе полученных графиков изохрон строим график зависимости изохроны производной модуля релаксации от самого модуля (рис.2.6).

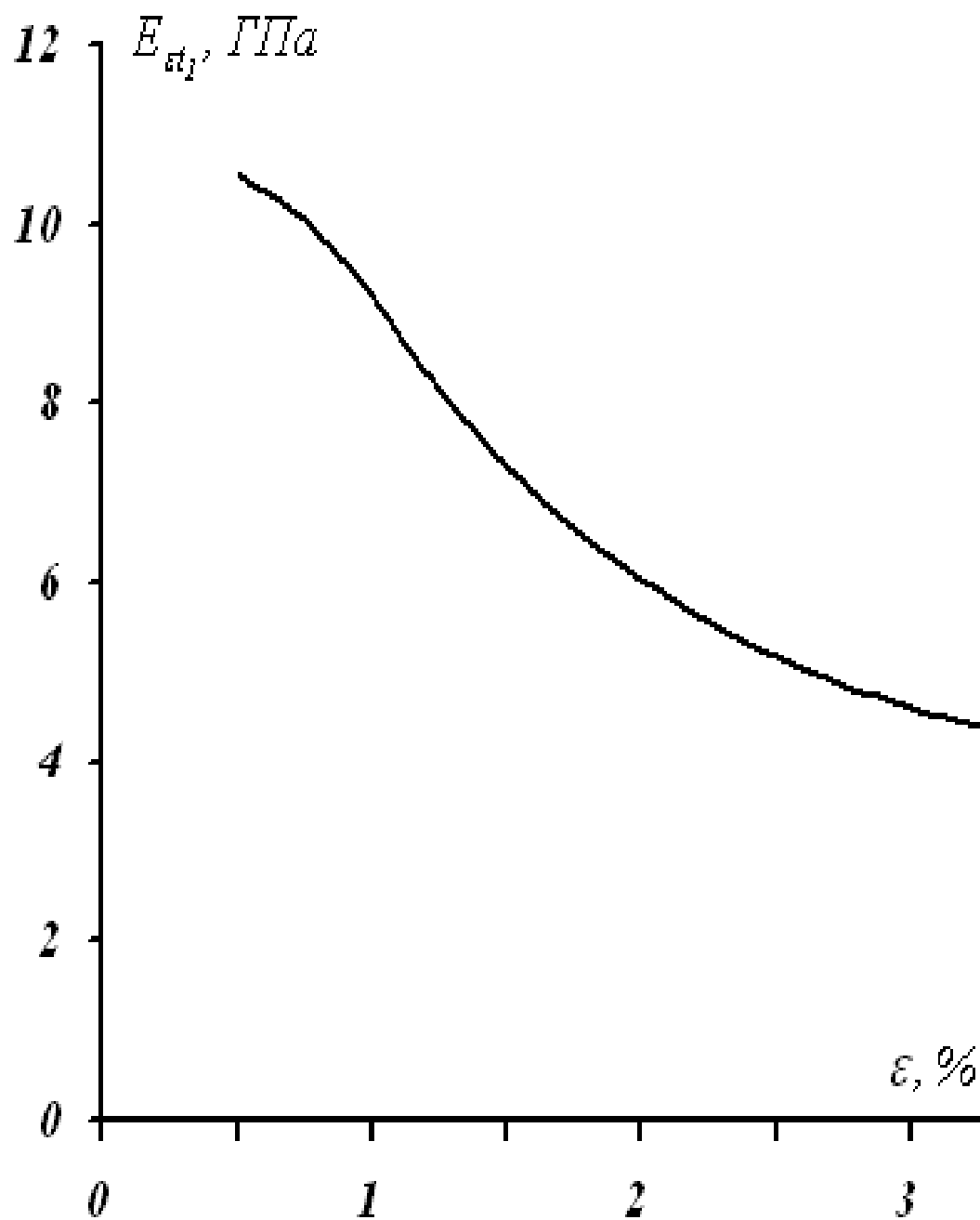


Рисунок 2.4. - Изохрона модуля релаксации $E_{\epsilon t_1}$ при $t_1 = 60$ с полимерной текстильной нити ЛН-114, $T = 20^\circ\text{C}$

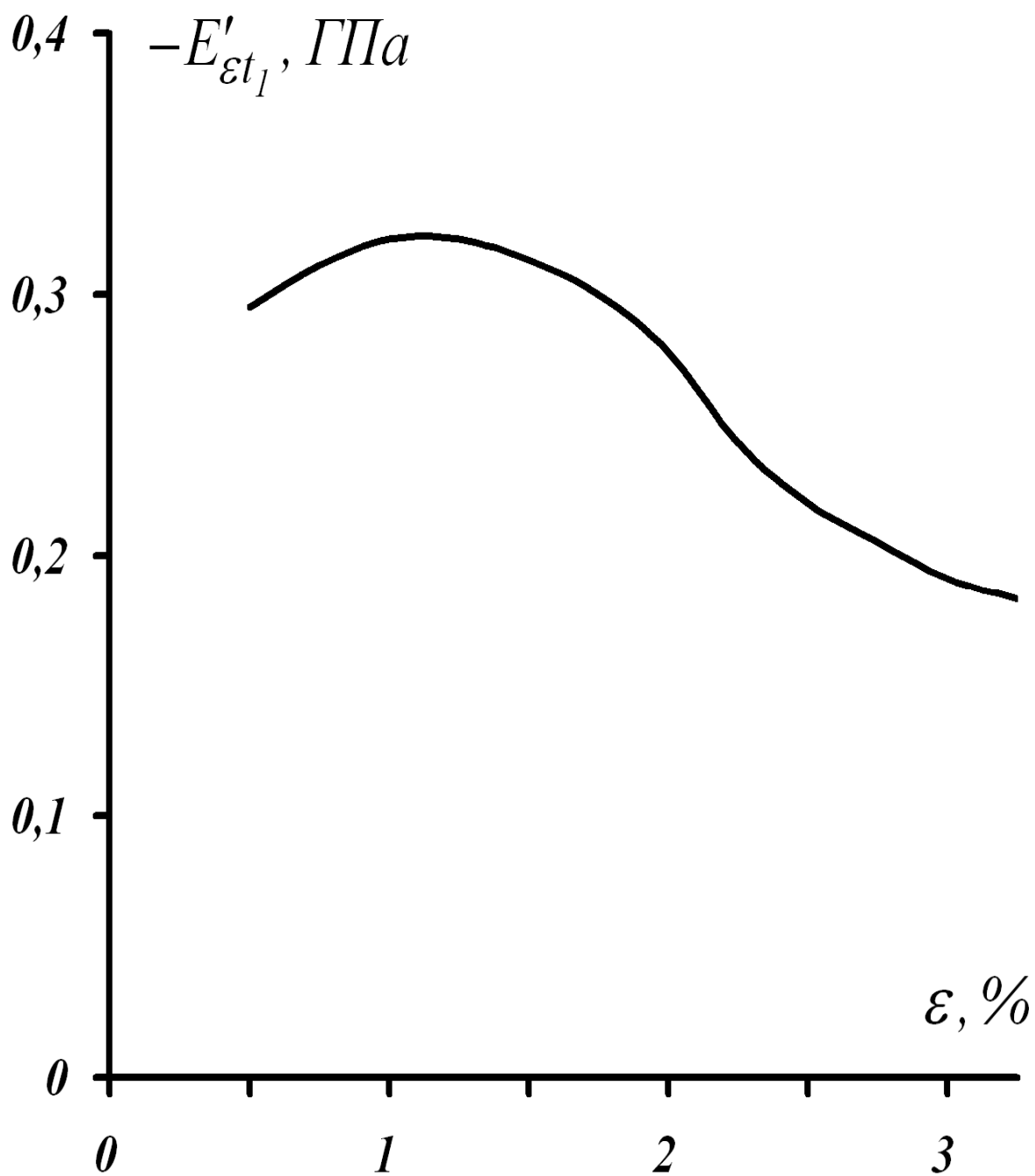


Рисунок 2.5. - Изохрона производной модуля релаксации $E'_{\epsilon t_1}$ при $t_1 = 60$ с полимерной текстильной нити ЛН-114, $T = 20^\circ \text{C}$

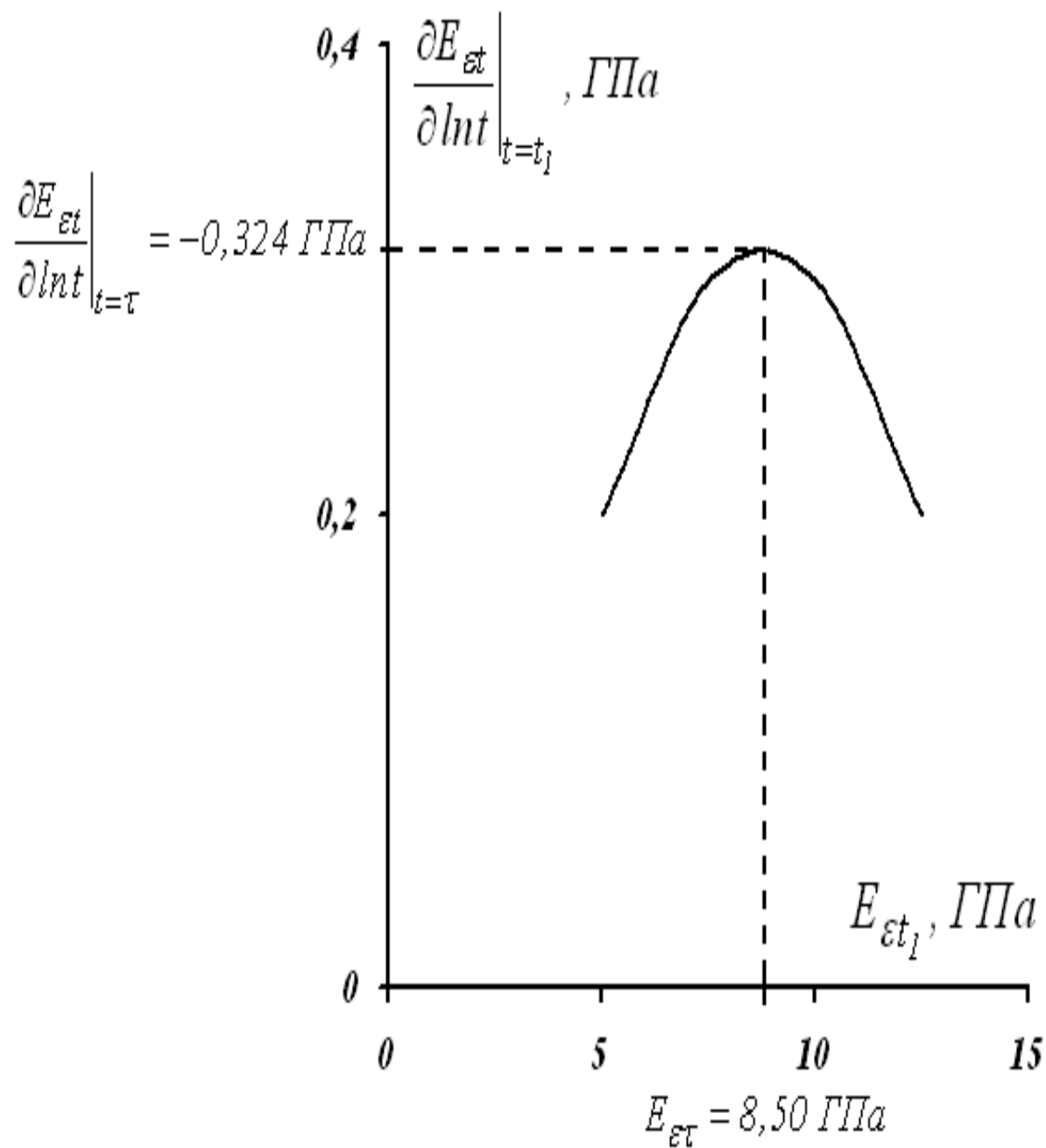


Рисунок 2.6. - Зависимость изохроны производной модуля релаксации от модуля релаксации при $t_1 = 60$ с полимерной текстильной нити ЛН-114, $T = 20^\circ\text{C}$

Из последнего графика видно, что указанная зависимость имеет экстремальную точку $\left. \frac{\partial E_{\varepsilon t}}{\partial \ln t} \right|_{\tau} = -0,324 ГПа$, при некотором значении

$$E_{\tau} = 8,50 ГПа.$$

Введём следующие обозначения:

$$\varphi_{\varepsilon t} = \frac{1}{2} \cdot (1 + th(W_{\varepsilon t})) = \Psi(W_{\varepsilon t}), \quad (2.11)$$

где

$$W_{\varepsilon t} = \frac{A_{\varepsilon}}{2} \ln \frac{t}{\tau_{\varepsilon}} = \frac{A_{\varepsilon}}{2} \left(\ln \left(\frac{t}{t_1} \right) + \ln \left(\frac{t_1}{\tau_{\varepsilon}} \right) \right) - \quad (2.12)$$

структурно-деформационно-временной аргумент-функционал.

Дифференцируя (2.3), получим:

$$E'_{\varepsilon t} = \frac{\partial E_{\varepsilon t}}{\partial \ln t} = -(E_0 - E_{\infty}) \cdot \bar{r}_{\varepsilon t} = -\frac{A_{\varepsilon}}{4} \cdot (E_0 - E_{\infty}) \cdot (1 - th^2(W_{\varepsilon t})), \quad (2.13)$$

где $\bar{r}_{\varepsilon t}$ - соответствующее нормированное логарифмическое ядро релаксации:

$$\bar{r}_{\varepsilon t} = \frac{\partial \varphi_{\varepsilon t}}{\partial \ln t} = \frac{A_{\varepsilon}}{4} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\varepsilon t})} = \frac{A_{\varepsilon}}{4} \cdot (1 - th^2(W_{\varepsilon t})) = A_{\varepsilon} \cdot \varphi_{\varepsilon t} \cdot (1 - \varphi_{\varepsilon t}). \quad (2.14)$$

Учитывая, что наименьшее значение производной $E'_{\varepsilon t}$ достигается при значении аргумента-функционала $W_{\varepsilon t} = W_{\tau} = 0$, что соответствует значению времени $t = \tau_{\varepsilon}$ и значению релаксационной функции $\varphi_{\tau} = 0,5$, определяем характеристическое значение E_{τ}

$$E_{\tau} = E_0 - (E_0 - E_{\infty}) \cdot 0,5 = \frac{E_0 + E_{\infty}}{2}. \quad (2.15)$$

Для характеристического значения логарифмического ядра релаксации имеем

$$\bar{r}_{\tau} = \frac{A_{\varepsilon}}{4}. \quad (2.16)$$

Используя далее свойство симметрии нормированной релаксационной функции (2.9), получим

$$E_o - E_\tau = \frac{E_o - E_\infty}{2} = E_\tau - E_\infty = \Delta E_\tau, \quad (2.17)$$

откуда имеем формулы для модуля упругости

$$E_o = E_\tau + \Delta E_\tau \quad (2.18)$$

и для модуля вязкоупругости

$$E_\infty = E_\tau - \Delta E_\tau. \quad (2.19)$$

Далее, учитывая (2.17) и условие $W_\tau = 0$ из (2.13) получаем характеристическое значение производной модуля релаксации

$$E'_\tau = -\frac{A_\varepsilon}{4} \cdot (E_o - E_\infty) = -\frac{A_\varepsilon}{2} \cdot \Delta E_\tau. \quad (2.20)$$

Следует заметить, что экстремальное значение E'_τ соответствует равенству нулю второй производной релаксационной функции:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \varphi_{\varepsilon t}}{\partial (\ln t)^2} \Big|_{t=\tau} &= \frac{\partial \bar{r}_{\varepsilon t}}{\partial \ln t} \Big|_{t=\tau} = -\left(\frac{A_\varepsilon}{2}\right)^2 \cdot \frac{th(W_{\varepsilon t})}{ch^2(W_{\varepsilon t})} \Big|_{t=\tau} = \\ &= -\left(\frac{A_\varepsilon}{2}\right)^2 \cdot th(W_{\varepsilon t}) \cdot (1 - th^2(W_{\varepsilon t})) \Big|_{t=\tau} = 0. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Из (2.10) и (2.17) следует:

$$E'_{\varepsilon t} = E'_\tau \cdot (1 - th^2(W_{\varepsilon t})), \quad (2.22)$$

откуда получаем формулу для определения аргумента-функционала

$$W_{\varepsilon t} = \pm arth\left(\sqrt{1 - \frac{E'_{\varepsilon t}}{E'_\tau}}\right) = \pm \frac{1}{2} \cdot \ln\left(\frac{1+z}{1-z}\right), \quad (2.23)$$

где

$$z = \sqrt{1 - \frac{E'_{\varepsilon t}}{E'_\tau}}. \quad (2.24)$$

Вычтем из первой части равенства (2.15) равенство (2.3). С учётом (2.17) получаем

$$E_{\varepsilon t} - E_\tau = (E_o - E_\infty) \cdot (0,5 - \varphi_{\varepsilon t}) = 2\Delta E_\tau (0,5 - \varphi_{\varepsilon t}). \quad (2.25)$$

Далее из (2.25) имеем:

$$\Delta E_\tau = -0,5 \cdot \frac{(E_{\varepsilon t} - E_\tau)}{\Psi(W_{\varepsilon t}) - 0,5}, \quad (2.26)$$

откуда с учётом (2.20) получаем формулу для определения параметра интенсивности процесса релаксации A_ε

$$A_\varepsilon = -2 \cdot \frac{E'_\tau}{\Delta E_\tau}. \quad (2.27)$$

Чтобы определить времена релаксации τ_ε достаточно определить деформационно-временную функцию

$$f_{\varepsilon 1\varepsilon} = \ln \frac{t_1}{\tau_\varepsilon}. \quad (2.28)$$

Для этого, сначала из (2.3) определим $\varphi_{\varepsilon t}$

$$\varphi_{\varepsilon t} = \frac{E_o - E_{\varepsilon t}}{E_o - E_\infty}, \quad (2.29)$$

затем, по численным значениям $\varphi_{\varepsilon t} = \Psi(W_{\varepsilon t})$ находим значения аргумента-функционала $W_{\varepsilon t}$

$$W_{\varepsilon t} = \text{arth}(2 \cdot \varphi_{\varepsilon t} - 1) = \frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{\varphi_{\varepsilon t}}{1 - \varphi_{\varepsilon t}} \right) \quad (2.30)$$

и из (2.9) получаем формулу для деформационно-временной функции

$$f_{\varepsilon 1\varepsilon} = \ln \left(\frac{t_1}{\tau_\varepsilon} \right) = \frac{2}{A_\varepsilon} \cdot W_{\varepsilon t_1}. \quad (2.31)$$

Для значения времени $t = t_1$ из формул (2.29) и (2.30) получаем формулы:

$$\varphi_{\varepsilon t_1} = \frac{E_o - E_{\varepsilon t_1}}{E_o - E_{\infty}} \quad (2.32)$$

и

$$W_{\varepsilon t_1} = \ln \left(\frac{\varphi_{\varepsilon t_1}}{1 - \varphi_{\varepsilon t_1}} \right), \quad (2.33)$$

которые следует учесть при использовании формулы (2.31).

Приведём пример использования функции гиперболический тангенс для расчёта параметров процесса релаксации полимерной текстильной нити ЛН-114, $T = 20^\circ C$.

Исходные данные:

$$\left. \frac{\partial E_{\varepsilon t}}{\partial \ln t} \right|_{\tau} = -0,324 \text{ ГПа};$$

$$E_{\tau} = 8,5 \text{ ГПа};$$

$$\varepsilon = 1,15\%;$$

$$t_1 = 60 \text{ с} - \text{базовое значение времени.}$$

$$\text{Значения } E_{\varepsilon t}; E_{\tau}; \left. \frac{\partial E_{\varepsilon t}}{\partial \ln t} \right|_{t_1}; \left. \frac{\partial E_{\varepsilon}}{\partial \ln t} \right|_{\tau} \text{ получены из эксперимента}$$

(рис.2.1, рис.2.2, рис.2.6).

Функционал $W_{\varepsilon t_1}$ определялся по формуле (2.23) и далее по формуле (2.26) вычислялись значения ΔE_{τ} .

Полученные значения ΔE_τ для разных значений ε усреднялись

$$\overline{\Delta E_\tau} = \sum_{\varepsilon} \Delta E_\tau \quad (2.34)$$

и по полученному среднему значению $\overline{\Delta E_\tau}$ с помощью формул (2.18) и (2.19) находились модули E_0 и E_∞ , а по формуле (2.27) - параметр интенсивности A_ε .

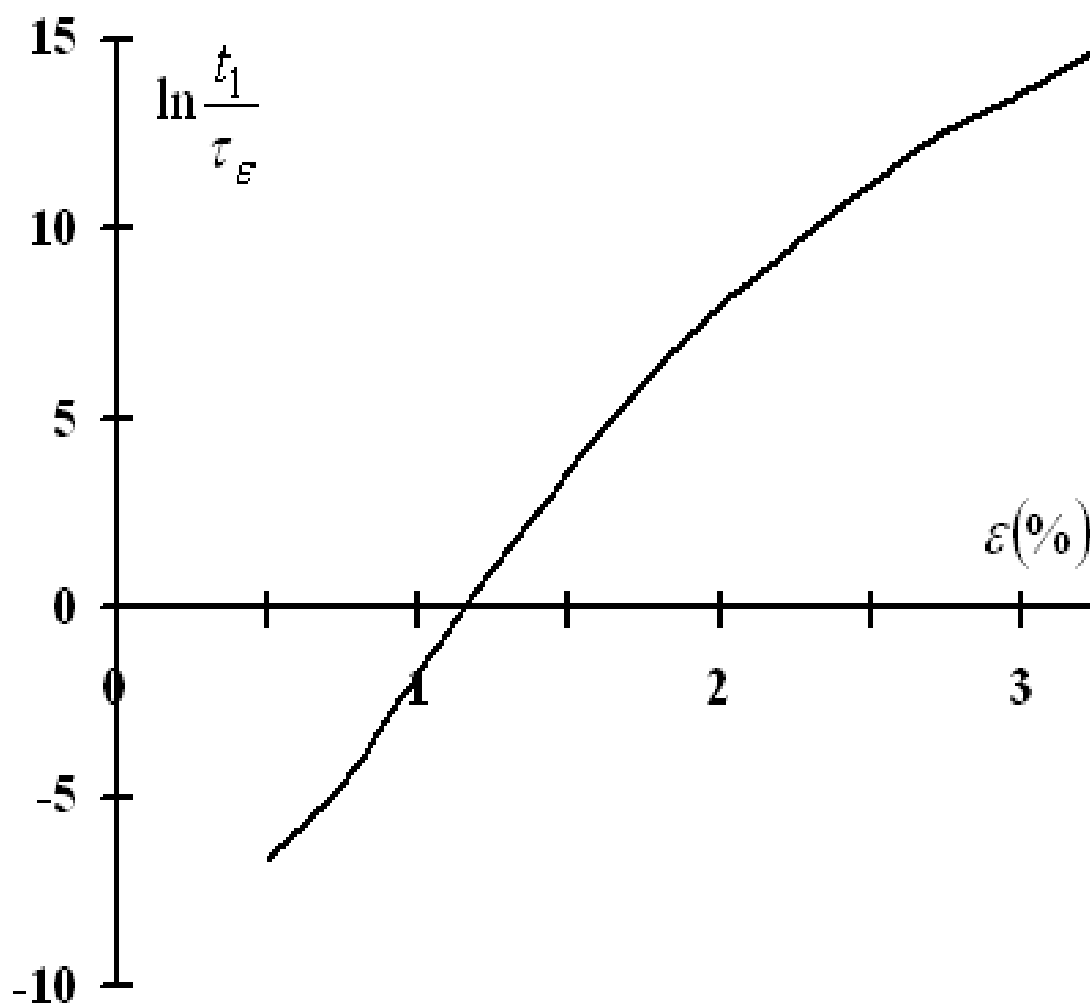


Рисунок 2.7. - Деформационно-временная функция полимерной текстильной нити ЛН-114, $T = 20^\circ C$

Затем, по формуле (2.29) определялись значения $\varphi_{\varepsilon t_1}$ и, далее, с помощью (2.30) находился функционал $W_{\varepsilon t_1}$, а по формуле (2.31) - деформационная функция $f_{\varepsilon|\varepsilon} = \frac{2}{A_{\varepsilon}} \cdot W_{\varepsilon t_1}$ (рис.2.7).

Результаты расчётов приводятся в табл.2.3.

Таблица 2.3. - Расчёт параметров процесса релаксации полимерной текстильной нити ЛН-114, $T = 20^{\circ}C$

$\varepsilon, \%$	$E_{\varepsilon t_1}, ГПа$	$-\frac{\partial E_{\varepsilon t}}{\partial \ln t} \Big _{t_1},$ $ГПа$	$\sqrt{1 - \frac{E'_{\varepsilon t_1}}{E'_\tau}}$	$W_{\varepsilon t_1}$	$\varphi_{\varepsilon t_1}$	$\Delta E_{\tau}, ГПа$	$\varphi_{\varepsilon t_1}$	$W_{\varepsilon t_1}$	$f_{\varepsilon \varepsilon}$
0,50	10,56	0,295	0,297	-0,307	0,351	6,92	0,341	-0,329	-6,60
0,75	10,05	0,311	0,196	-0,200	0,401	7,86	0,380	-0,244	-4,89
1,00	9,05	0,321	0,100	-0,090	0,455	6,13	0,458	-0,085	-1,70
1,25	8,15	0,321	0,100	0,090	0,545	3,90	0,527	0,054	1,08
1,50	7,30	0,313	0,184	0,185	0,592	6,55	0,593	0,187	3,75
1,75	6,60	0,300	0,271	0,279	0,636	6,99	0,647	0,302	6,05
2,00	6,05	0,278	0,377	0,397	0,689	6,50	0,689	0,398	7,97
2,25	5,56	0,243	0,498	0,547	0,749	5,90	0,727	0,489	9,80
2,50	5,17	0,230	0,537	0,600	0,769	6,20	0,757	0,568	11,37
2,75	4,85	0,208	0,597	0,689	0,799	6,11	0,781	0,637	12,77
3,00	4,68	0,191	0,640	0,760	0,820	5,96	0,795	0,676	13,55
3,25	4,40	0,183	0,659	0,792	0,830	6,22	0,816	0,745	14,94

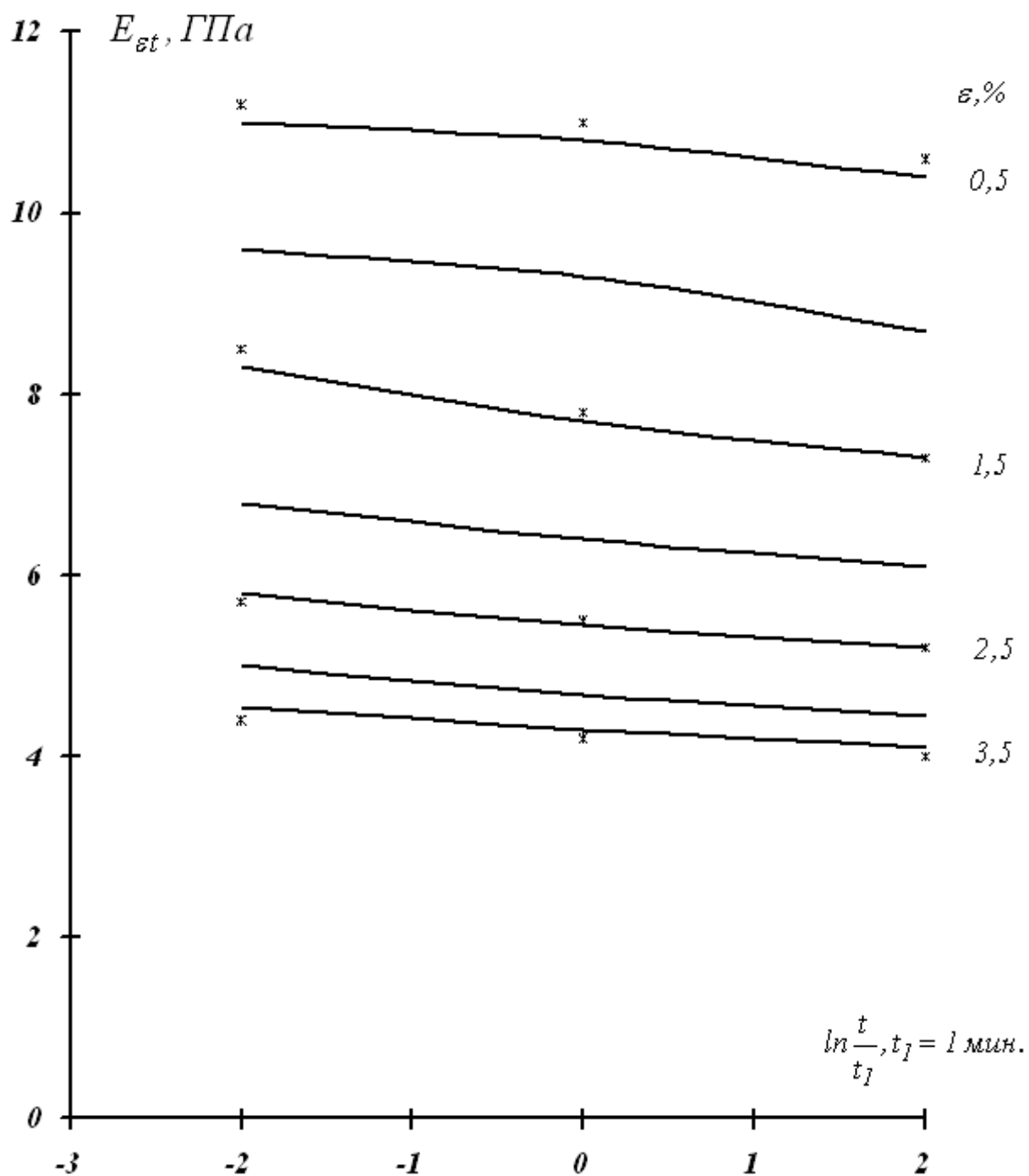


Рисунок 2.8. - Экспериментальные и расчётные значения модуля релаксации полимерной текстильной нити ЛН-114, $T = 20^\circ \text{C}$ (сплошная линия - эксперимент, * - расчёт для значений деформации ε 0,5%, 1,5%, 2,5% , 3,5%).

По данным табл. 2.3 с помощью (2.34) определяем значение

$$\overline{\Delta E_\tau} = 6,48 \text{ ГПа},$$

модуль упругости

$$E_o = E_\tau + \Delta E_\tau = 8,5 + 6,48 = 14,98 \text{ (ГПа)}$$

и модуль вязкоупругости

$$E_\infty = 8,5 - 6,48 = 2,02 \text{ (ГПа)}.$$

Для контроля приведём пример расчёта модуля релаксации для значений $\varepsilon = 2\%$ и $t = 300 \text{ с}$.

$$W_{\varepsilon t} = \frac{A_\varepsilon}{2} \left(\ln \frac{t}{t_1} + \ln \frac{t_1}{\tau_\varepsilon} \right) = 0,05 \cdot (1,61 + 7,97) = 0,479.$$

По формуле (2.11) определяем

$$\Psi(W_{\varepsilon t}) = 0,723$$

и далее по (2.3)

$$E_{\varepsilon t} = E_o - (E_o - E_\infty) \cdot \Psi(W_{\varepsilon t}) = 14,98 - (14,98 - 2,02) \cdot 0,723 = 5,61 \text{ ГПа}.$$

По формуле (2.27) определяем параметр интенсивности процесса

$$A_\varepsilon = -2 \cdot \frac{E'_\tau}{\Delta E_\tau} = 0,10.$$

Как видно из приведённого примера, результаты эксперимента полностью подтверждаются приведёнными расчётами.

Сравним экспериментальные и расчётные значения модуля релаксации для других значений деформации и времени (рис. 2.8).

Расчётные значения модуля релаксации близки к экспериментальным значениям для всей полосы рассмотренных значений деформации в разные моменты времени.

Этот факт позволяет сделать вывод о пригодности функции гиперболический тангенс для аналитического описания процесса релаксации.

Работоспособность приведенной математической модели релаксации проверялась также на других исследуемых полимерных текстильных материалах.

Анализируя полученные данные, можно сделать выводы о степени релаксации того или иного материала.

2.4. Экспериментальное исследование деформационного процесса полимерных текстильных материалов

Исследования деформационного процесса начинаются с проведения эксперимента, в основу которого положены методы, разработанные в лаборатории информационных технологий СПбГУПТД.

Эксперимент в режиме деформационного процесса проводился на релаксометре деформаций.

После закрепления образца текстильного материала в зажимах релаксометра деформаций, образец подвергался напряжению $\sigma = const$.

Далее по приборам в заданные моменты времени t снимались значения деформации ε_t .

По результатам эксперимента строились графики зависимости величины деформации ε_t от времени t в логарифмическо-временной шкале безразмерного времени $\frac{t}{t_1}$, где t_1 - некоторое значение "базового" времени, в качестве которого часто принимается $t_1 = 1 \text{ мин.}$

Указанные графики, построенные для нескольких значений напряжения σ , образуют в совокупности "семейства" кривых деформационного процесса (ползучести).

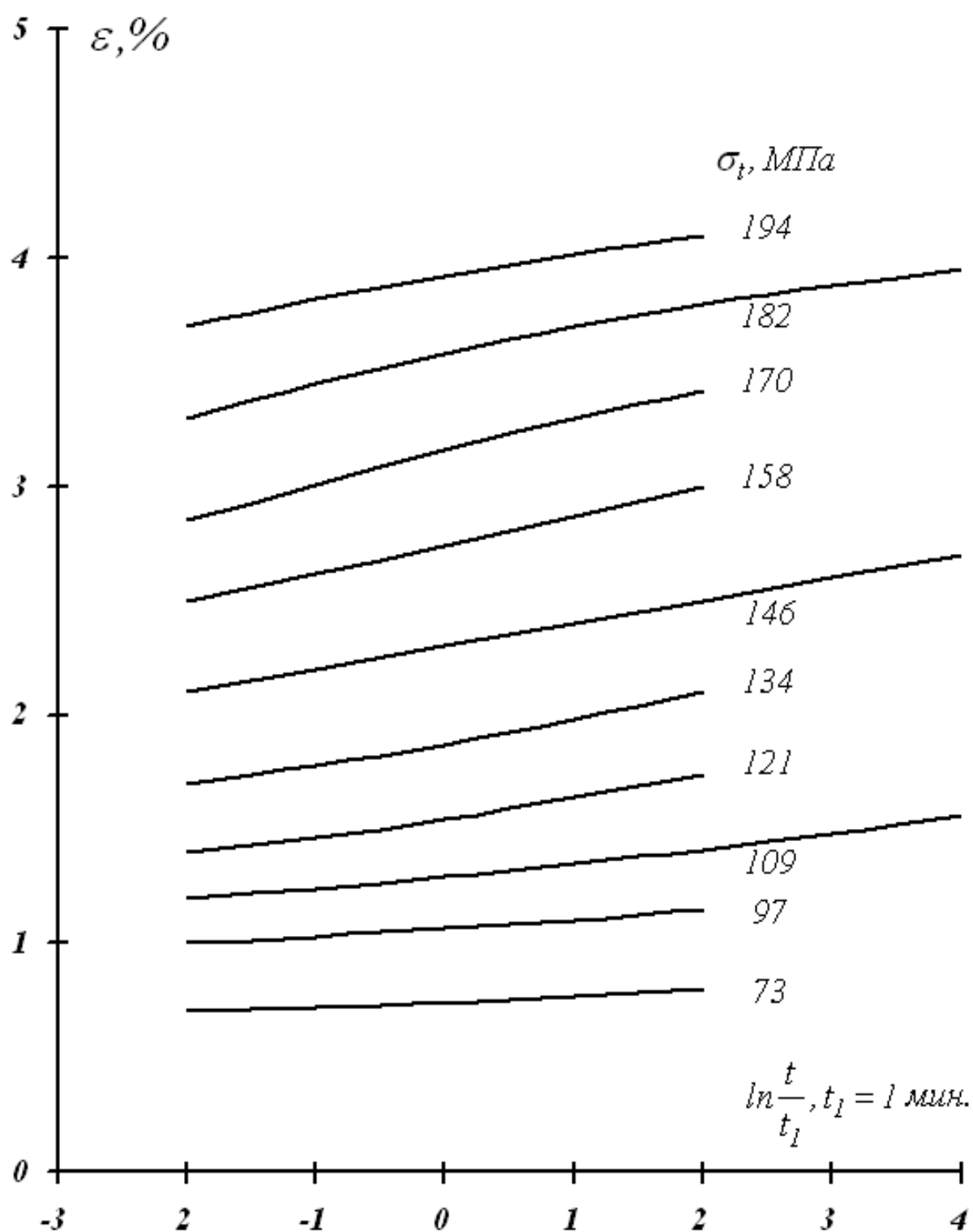


Рисунок 2.9. - Графическое изображение "семейства" кривых деформационного процесса при различных значениях напряжения полимерной текстильной нити ЛН-114, $T = 20^\circ \text{C}$

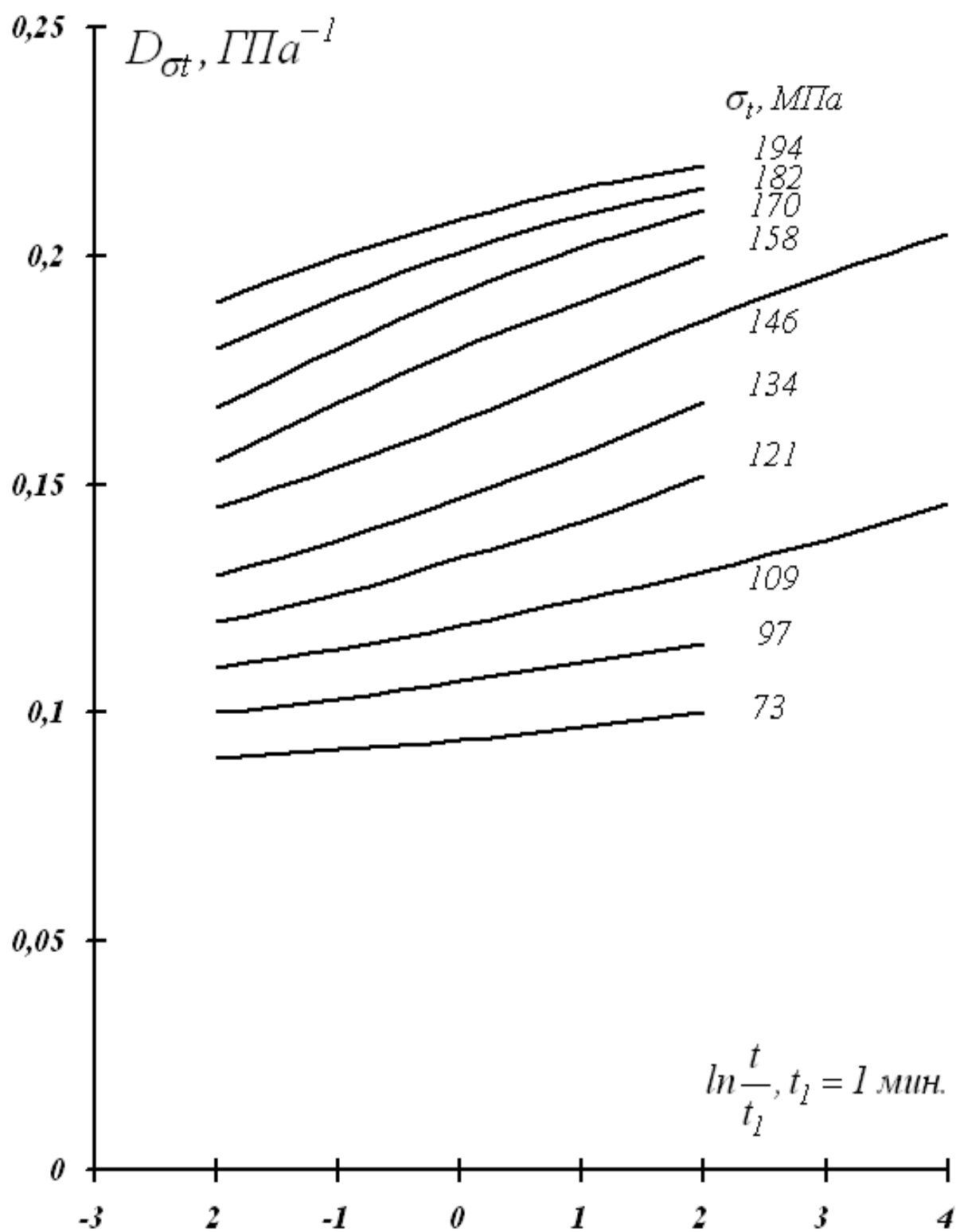


Рисунок 2.10. - Графическое изображение "семейства" кривых податливости при различных значениях напряжения полимерной текстильной нити ЛН-114, $T = 20^\circ \text{C}$

Пример "семейства" кривых деформационного процесса полимерной текстильной нити ЛН-114 (линейная плотность 114 Текс, разрывное напряжение $\sigma_p = 0,86 \text{ ГПа}$, разрывная деформация $\varepsilon_p = 16,7 \%$, изготовлена во ВНИИСВ, г. Тверь) при температуре $T = 20^\circ \text{C}$ приведен на рис. 2.9.

Далее кривые "семейства" деформационного процесса перестраивают в кривые "семейства" податливости $D_{\sigma t}$ по формуле

$$D_{\sigma t} = \frac{\varepsilon_t}{\sigma}. \quad (2.35)$$

Пример "семейства" кривых податливости полимерной текстильной нити ЛН-114, $T = 20^\circ \text{C}$ приведен на рис. 2.10.

2.5. Математическое моделирование деформационного процесса полимерных текстильных материалов

Аппроксимируем податливость $D_{\sigma t}$, определенную по формуле (2.35) с помощью нормированной функции запаздывания $\varphi_{\sigma t}$

$$D_{\sigma t} = D_0 + (D_\infty - D_0)\varphi_{\sigma t}, \quad (2.36)$$

где

D_0 - начальная упругая податливость,

D_∞ - предельно-равновесная податливость.

Геометрически график податливости в логарифмической системе координат показан на рис. 2.11.

Функция (2.36) представляет собой модель податливости, которой удобно пользоваться как при описании простых деформационных процессов ($\sigma = \text{const}$), так и при описании более сложных процессов, например, деформационно-восстановительных процессов, когда имеется некоторый закон изменения напряжения во времени.

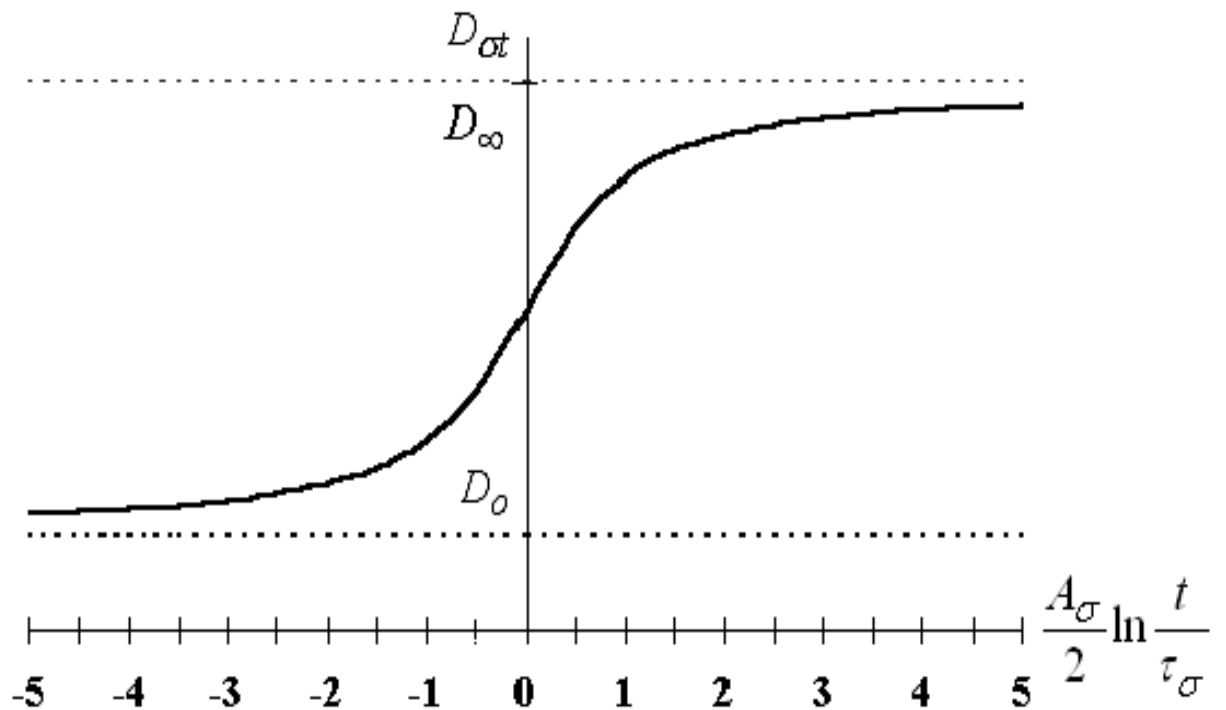


Рисунок 2.11. - Геометрическое изображение графика податливости

В качестве функции запаздывания (ползучести) $\varphi_{\sigma t}$ допустимо применение любой нормированной, неубывающей, определенной для значений времени $t > 0$ функции, причем

$$\lim_{t \rightarrow 0} \varphi_{\sigma t} = 0, \quad (2.37)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varphi_{\sigma t} = 1. \quad (2.38)$$

Для удобства исследований, в качестве аргумента функции $\varphi_{\sigma t}$ выбирают безразмерное время $\frac{t}{\tau_{\sigma}}$,

где

τ_{σ} - время запаздывания, зависящее от напряжения σ .

Традиционно функция $\varphi_{\sigma t}$ выбирается либо в виде интеграла вероятности:

$$\varphi_{\sigma t} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{1}{a_{\sigma}} \ln \frac{t}{\tau_{\sigma}} - \frac{z^2}{2}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz, \quad (2.39)$$

что физически оправдано, так как большое число физических процессов статистически описываются законами, близкими к нормальному закону распределения, для которого интеграл вероятности является интегральной функцией распределения, либо в виде функции Кольрауша:

$$\varphi_{\sigma t} = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau_{\sigma}}\right)^{k_{\sigma}}}, \quad (2.40)$$

имеющей более простой аналитический вид, чем интеграл вероятностей и, тем самым, являющейся привлекательной для исследователей.

Здесь константы

a_{σ} и k_{σ} - есть структурные параметры интенсивности процесса ползучести, зависящие от деформационных свойств материала и от выбора нормированной функции.

Макаровым А.Г. для моделирования деформационных процессов (ползучести) в качестве функции $\varphi_{\sigma t}$ начал применяться нормированный арктангенс логарифма приведенного времени:

$$\varphi_{\sigma t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{b_{\sigma}} \ln \frac{t}{\tau_{\sigma}} \right), \quad (2.41)$$

где

b_{σ} - структурный параметр интенсивности процесса ползучести, соответствующий выбранной функции (2.41).

Данная функция, например, положительно зарекомендовала себя при исследовании деформационных свойств полимерных текстильных материалов сложного строения.

В настоящее время остается малоизученной для прогнозирования деформационных процессов полимерных текстильных материалов функция нормированный гиперболический тангенс логарифма приведенного времени:

$$\varphi_{\sigma t} = \frac{I}{2} \left(1 + th \left(\frac{A_{\sigma}}{2} \ln \frac{t}{\tau_{\sigma}} \right) \right), \quad (2.42)$$

где

A_{σ} - структурный параметр интенсивности процесса ползучести, соответствующий выбранной функции (2.42).

Преимуществом функции (2.42) является близкое сходство с интегралом вероятности, в чем можно убедиться, сравнивая значения функций, соответствующие одинаковым аргументам, и, в тоже время, у нее более простая аналитическая форма ее задания.

Кроме того, функция нормированный гиперболический тангенс, в отличие от интеграла вероятности, является элементарной, что существенно упрощает интегро-дифференциальные преобразования, неизбежные при дальнейшем прогнозировании деформационных процессов.

Перейдём к описанию метода определения параметров деформационного процесса по обработке экспериментального "семейства" указанного процесса на примере полимерной текстильной нити ЛН-114 (линейная плотность 114 Текс, разрывное напряжение $\sigma_p = 0,86$ ГПа, разрывная деформация $\varepsilon_p = 16,7$ %, изготовлена во ВНИИСВ, г. Тверь) при температуре $T = 20^{\circ}C$ (рис. 2.9).

В качестве функции запаздывания $\varphi_{\sigma t}$ выберем функцию (2.42).

Геометрически с помощью тангенса угла наклона касательных к кривым $D_{\sigma t}$ на рис. 2.10 определим производные податливости по логарифмической шкале

$$D'_{\sigma t} = \frac{\partial D_{\sigma t}}{\partial \ln \frac{t}{t_1}} = \frac{\partial D_{\sigma t}}{\partial (\ln t - \ln t_1)} = \frac{\partial D_{\sigma t}}{\partial \ln t}. \quad (2.43)$$

Выберем фиксированное значение базового времени $t_1 = 60 \text{ с}$ и построим для него изохроны податливости $D_{\sigma t_1}$ (рис. 2.12) и её

производной $D_{\sigma t_1} = \left. \frac{\partial D_{\sigma t}}{\partial \ln t} \right|_{t=t_1}$ (рис. 2.13).

На основе полученных графиков изохрон податливости $D_{\sigma t_1}$ (рис. 2.12) строим график зависимости изохроны производной

податливости $D_{\sigma t_1} = \left. \frac{\partial D_{\sigma t}}{\partial \ln t} \right|_{t=t_1}$ от самой податливости (рис. 2.14).

Из последнего графика видно, что указанная зависимость имеет экстремальную точку $\left. \frac{\partial D_{\sigma t}}{\partial \ln t} \right|_{\tau} = 0,0128 \text{ ГПа}^{-1}$, при некотором значении

$$D_{\tau} = 0,171 \text{ ГПа}^{-1}.$$

Введём следующие обозначения:

$$\varphi_{\sigma t} = \frac{1}{2} \cdot (1 + th(W_{\sigma t})) = \Psi(W_{\sigma t}), \quad (2.44)$$

где

$$W_{\sigma t} = \frac{A_{\sigma}}{2} \ln \frac{t}{\tau_{\sigma}} = \frac{A_{\sigma}}{2} \left(\ln \left(\frac{t}{t_1} \right) + \ln \left(\frac{t_1}{\tau_{\sigma}} \right) \right) - \quad (2.45)$$

структурно-сило-временной аргумент-функционал.

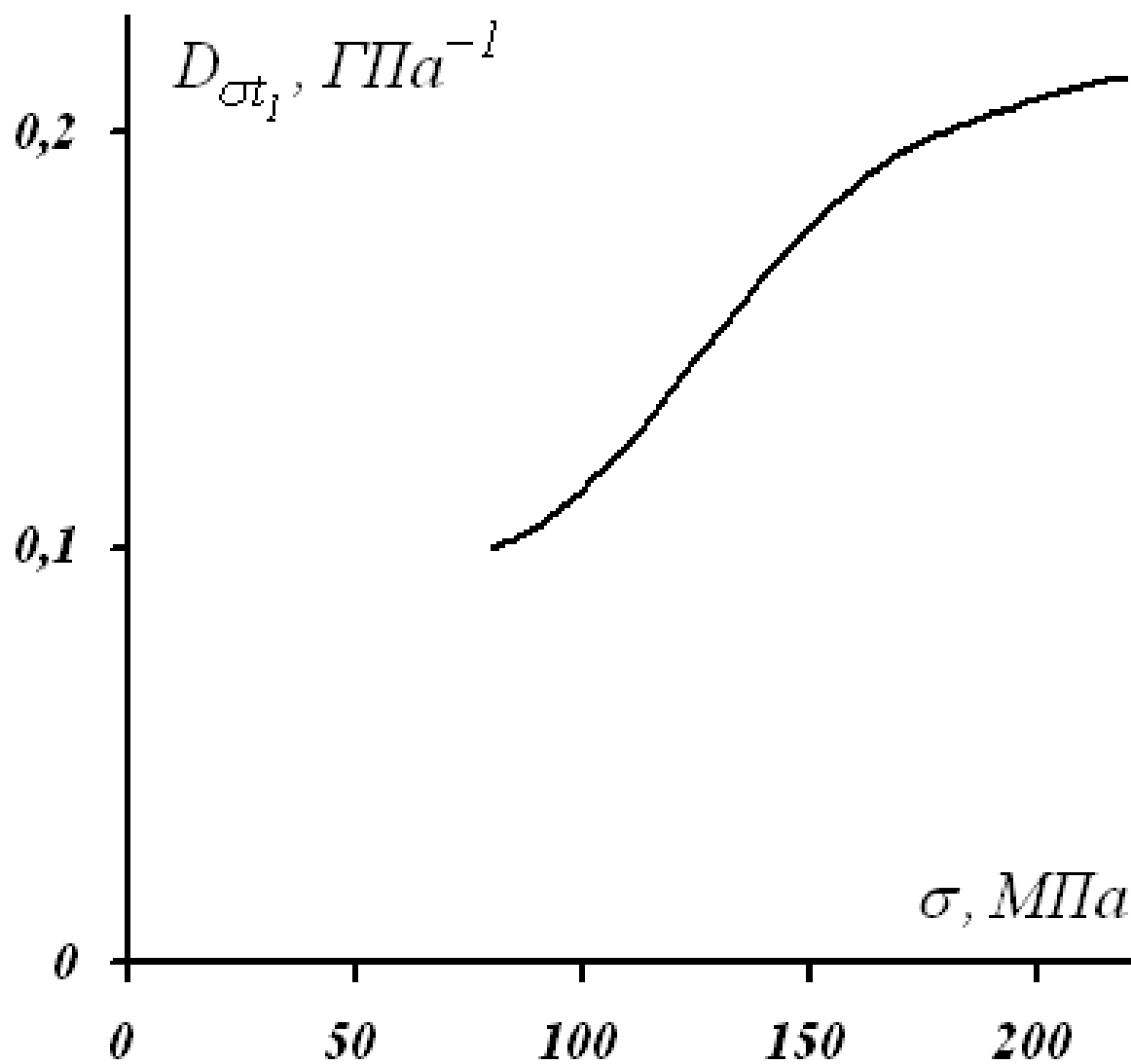


Рисунок 2.12. - Изохрона податливости $D_{\sigma t_1}$ при $t_1 = 60 \text{ с}$ полимерной текстильной нити ЛН-114, $T = 20^\circ \text{C}$

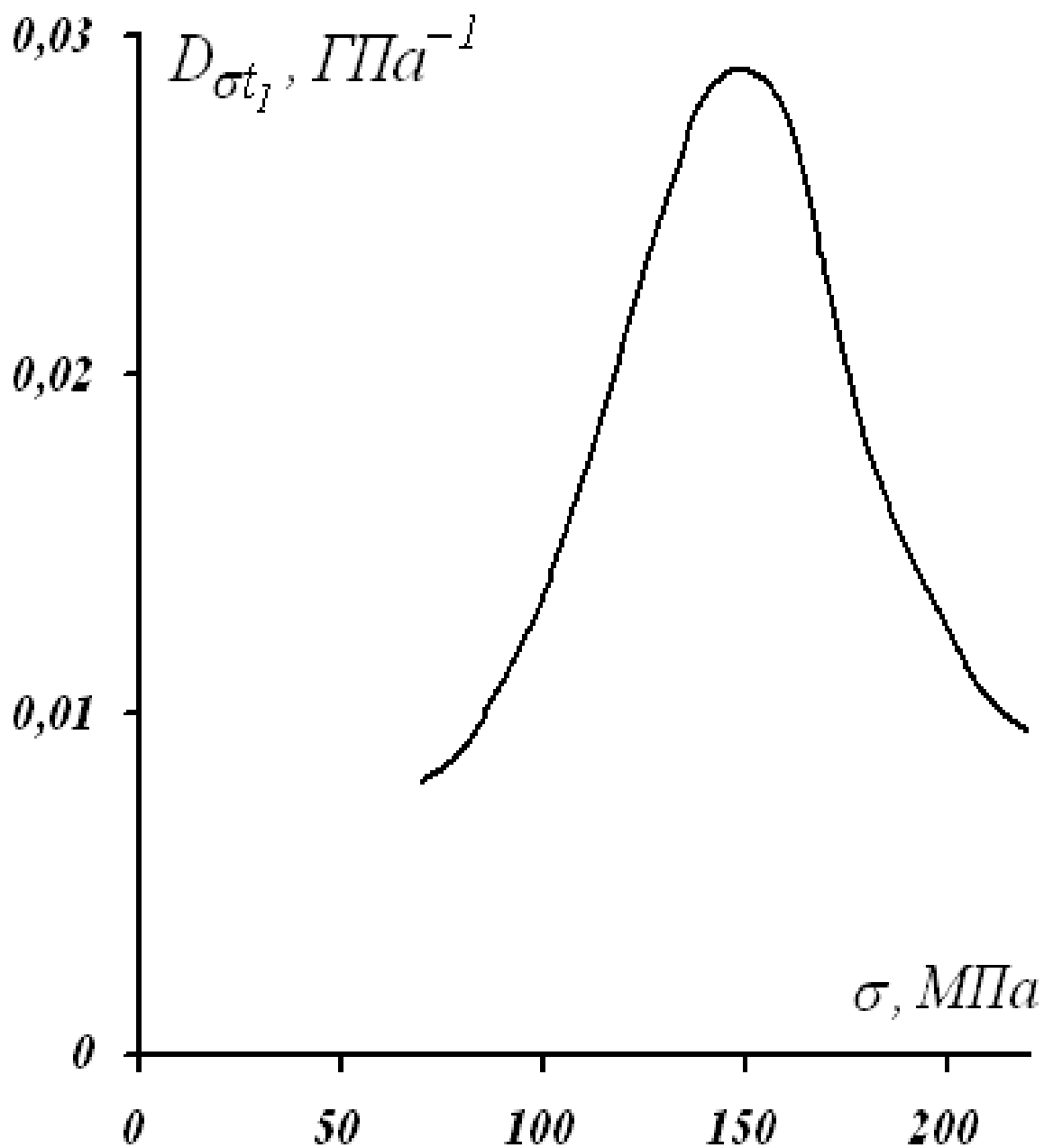


Рисунок 2.13. - Изохрона производной податливости $D'_{\sigma t_1}$ при $t_1 = 60$ с полимерной текстильной нити ЛН-114, $T = 20^\circ \text{C}$

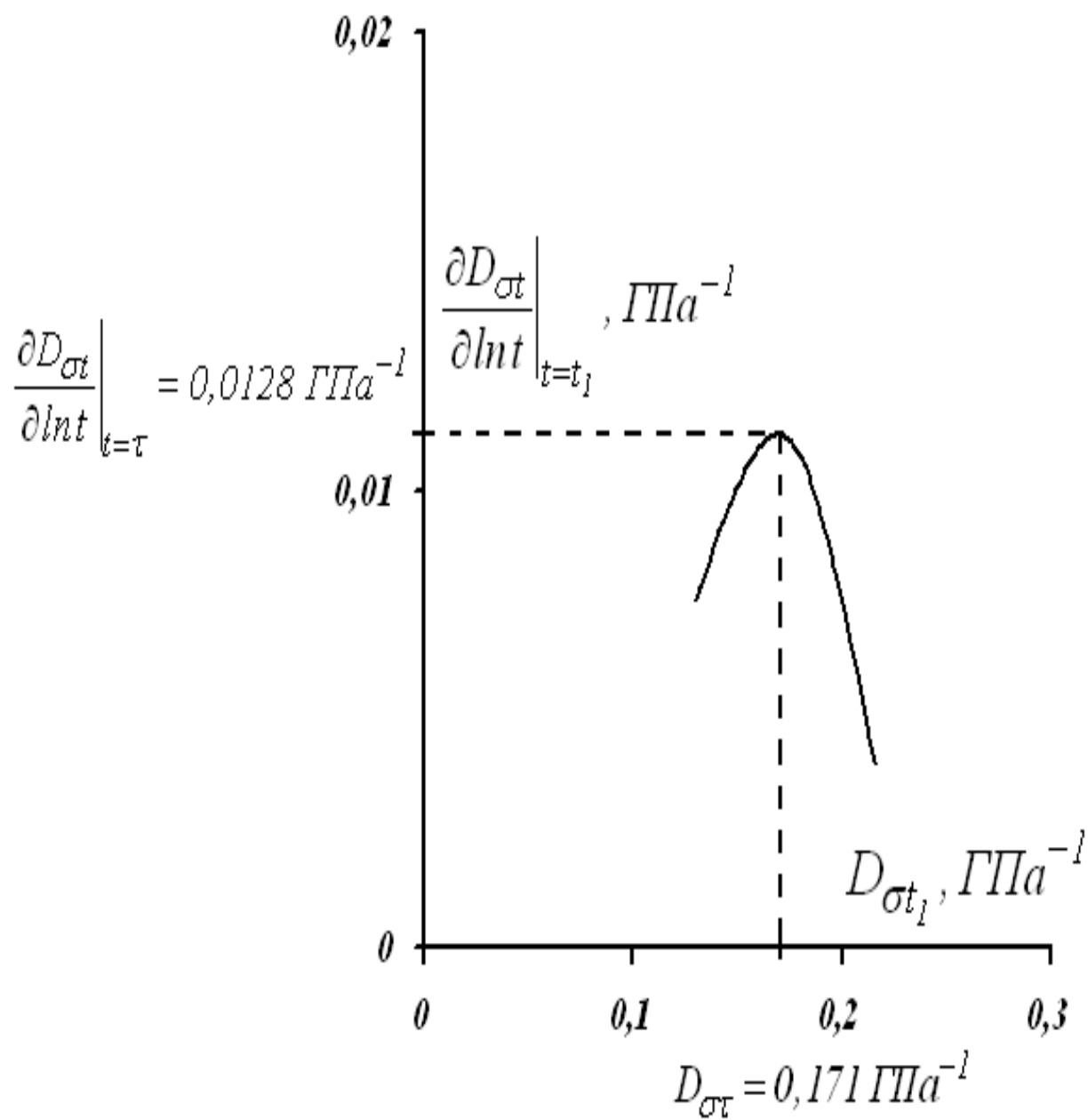


Рисунок 2.14. - Зависимость изохроны производной податливости от податливости при $t_1 = 60 \text{ с}$ полимерной текстильной нити ЛН-114, $T = 20^\circ \text{C}$

Дифференцируя (2.38), получим:

$$D'_{\sigma t} = \frac{\partial D_{\sigma t}}{\partial \ln t} = (D_{\infty} - D_0) \cdot \bar{r}_{\sigma t} = \frac{A_{\sigma}}{4} \cdot (D_{\infty} - D_0) \cdot (1 - th^2(W_{\sigma t})), \quad (2.46)$$

где

$\bar{r}_{\sigma t}$ - соответствующее нормированное логарифмическое ядро запаздывания:

$$\bar{r}_{\sigma t} = \frac{\partial \varphi_{\sigma t}}{\partial \ln t} = \frac{A_{\sigma}}{4} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\sigma t})} = \frac{A_{\sigma}}{4} \cdot (1 - th^2(W_{\sigma t})) = A_{\sigma} \cdot \varphi_{\sigma t} \cdot (1 - \varphi_{\sigma t}). \quad (2.47)$$

Учитывая, что наибольшее значение производной $D'_{\sigma t}$ достигается при значении аргумента-функционала $W_{\sigma t} = W_{\tau} = 0$, что соответствует значению времени $t = \tau_{\sigma}$ и значению функции запаздывания $\varphi_{\tau} = 0,5$, определяем характеристическое значение D_{τ}

$$D_{\tau} = D_0 + (D_{\infty} - D_0) \cdot 0,5 = \frac{D_0 + D_{\infty}}{2}. \quad (2.48)$$

Для характеристического значения логарифмического ядра ползучести имеем

$$\bar{r}_{\tau} = \frac{A_{\sigma}}{4}. \quad (2.49)$$

Используя далее свойство симметрии нормированной функции ползучести (2.42), получим

$$D_{\infty} - D_{\tau} = \frac{D_{\infty} - D_0}{2} = D_{\tau} - D_0 = \Delta D_{\tau}, \quad (2.50)$$

откуда имеем формулы для начальной упругой податливости

$$D_0 = D_{\tau} - \Delta D_{\tau} \quad (2.51)$$

и для предельно-равновесной податливости

$$D_{\infty} = D_{\tau} + \Delta D_{\tau}. \quad (2.52)$$

Далее, учитывая (2.50) и условие $W_{\tau} = 0$ из (2.46) получаем характеристическое значение производной податливости

$$D'_{\tau} = \frac{A_{\sigma}}{4} \cdot (D_{\infty} - D_0) = \frac{A_{\sigma}}{2} \cdot \Delta D_{\tau}. \quad (2.53)$$

Следует заметить, что экстремальное значение D'_{τ} соответствует равенству нулю второй производной функции запаздывания:

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial^2 \varphi_{\sigma t}}{\partial (\ln t)^2} \right|_{t=\tau} &= \left. \frac{\partial \bar{r}_{\sigma t}}{\partial \ln t} \right|_{t=\tau} = \left(\frac{A_{\sigma}}{2} \right)^2 \cdot \left. \frac{th(W_{\sigma t})}{ch^2(W_{\sigma t})} \right|_{t=\tau} = \\ &= \left(\frac{A_{\sigma}}{2} \right)^2 \cdot th(W_{\sigma t}) \cdot \left(1 - th^2(W_{\sigma t}) \right) \Big|_{t=\tau} = 0. \end{aligned} \quad (2.54)$$

Из (2.46) и (2.53) следует:

$$D'_{\sigma t} = D'_{\tau} \cdot \left(1 - th^2(W_{\sigma t}) \right), \quad (2.55)$$

откуда получаем формулу для определения аргумента-функционала

$$W_{\sigma t} = \pm arth \left(\sqrt{1 - \frac{D'_{\sigma t}}{D'_{\tau}}} \right) = \pm \frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{1+z}{1-z} \right), \quad (2.56)$$

где

$$z = \sqrt{1 - \frac{D'_{\sigma t}}{D'_{\tau}}}. \quad (2.57)$$

Вычтем из первой части равенства (2.48) равенство (2.38).

С учётом (2.50) получаем

$$D_{\sigma t} - D_{\tau} = (D_{\infty} - D_0) \cdot (\varphi_{\sigma t} - 0,5) = 2\Delta D_{\tau} (\varphi_{\sigma t} - 0,5). \quad (2.58)$$

Далее, из (2.58) имеем:

$$\Delta D_{\tau} = 0,5 \cdot \frac{(D_{\sigma t} - D_{\tau})}{\Psi(W_{\sigma t}) - 0,5}, \quad (2.59)$$

откуда, с учётом (2.53) получаем формулу для определения параметра интенсивности процесса релаксации A_{σ}

$$A_{\sigma} = 2 \cdot \frac{D'_{\sigma}}{\Delta D_{\sigma}}. \quad (2.60)$$

Чтобы определить времена запаздывания τ_{σ} достаточно определить сило-временную функцию

$$f_{\sigma 1 \sigma} = \ln \frac{t_1}{\tau_{\sigma}}. \quad (2.61)$$

Для этого, сначала из (2.38) определим $\varphi_{\sigma t}$:

$$\varphi_{\sigma t} = \frac{D_{\sigma t} - D_o}{D_{\infty} - D_o}, \quad (2.62)$$

затем, по численным значениям $\varphi_{\sigma t} = \Psi(W_{\sigma t})$ находим значения аргумента-функционала $W_{\sigma t}$

$$W_{\sigma t} = \operatorname{arth}(2 \cdot \varphi_{\sigma t} - 1) = \frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{\varphi_{\sigma t}}{1 - \varphi_{\sigma t}} \right) \quad (2.63)$$

и из (2.45) получаем формулу для сило-временной функции

$$f_{\sigma 1 \sigma} = \ln \left(\frac{t_1}{\tau_{\sigma}} \right) = \frac{2}{A_{\sigma}} \cdot W_{\sigma t_1}. \quad (2.64)$$

Для значения времени $t = t_1$ из формул (2.62) и (2.63) получаем формулы:

$$\varphi_{\sigma 1} = \frac{D_{\sigma t_1} - D_o}{D_{\infty} - D_o} \quad (2.65)$$

и

$$W_{\sigma t_1} = \frac{1}{2} \cdot \ln \left(\frac{\varphi_{\sigma t_1}}{1 - \varphi_{\sigma t_1}} \right), \quad (2.66)$$

которые следует учесть при использовании формулы (2.64).

Приведём пример использования функции гиперболический тангенс для расчёта параметров деформационного процесса полимерной текстильной нити ЛН-114, $T = 20^\circ C$.

Исходные данные:

$$\left. \frac{\partial D_{\sigma t}}{\partial \ln t} \right|_{\tau} = 0,0128 \text{ ГПа}^{-1};$$

$$D_{\tau} = 0,171 \text{ ГПа}^{-1};$$

$$\sigma_1 = 0,146 \text{ ГПа};$$

$t_1 = 60 \text{ с}$ - базовое значение времени.

Значения $D_{\sigma t}$; D_{τ} ; $\left. \frac{\partial D_{\sigma t}}{\partial \ln t} \right|_{t_1}$; $\left. \frac{\partial D_{\sigma t}}{\partial \ln t} \right|_{\tau}$ получены из эксперимента

(рис. 2.9, рис. 2.10, рис. 2.14).

Функционал $W_{\sigma t_1}$ определялся по формуле (2.56) и далее по формуле (2.59) вычислялись значения ΔD_{τ} .

Далее полученные значения ΔD_{τ} для разных значений напряжения σ усреднялись

$$\overline{\Delta D_{\tau}} = \sum_{\sigma} \Delta D_{\tau} \quad (2.67)$$

и по полученному среднему значению $\overline{\Delta D_{\tau}}$ с помощью формул (2.51) и (2.52) находились податливости D_0 и D_{∞} , а по формуле (2.60) - параметр интенсивности A_{σ} .

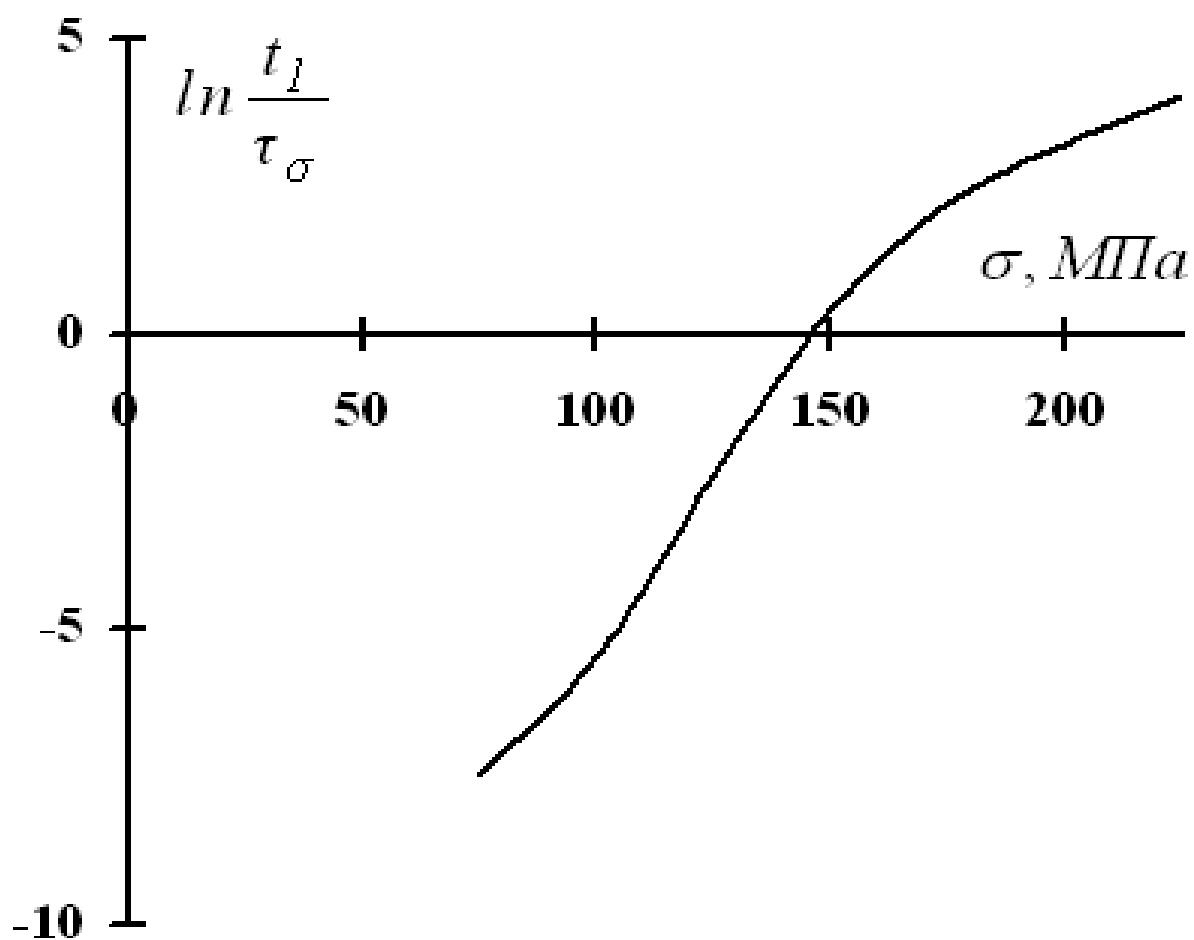


Рисунок 2.15. - Сило-временная функция полимерной текстильной нити ЛН-114, $T = 20^{\circ}C$

Затем, по формуле (2.65) определялись значения $\varphi_{\sigma t_1}$ и, далее, с помощью (2.66) находился функционал $W_{\sigma t_1}$, а по формуле (2.64) - сило-временная функция $f_{\sigma_1 \sigma} = \frac{2}{A_{\sigma}} \cdot W_{\sigma t_1}$ (рис. 2.15).

Результаты расчётов приводятся в табл. 2.4.

Таблица 2.4. - Расчёт параметров процесса ползучести полимерной текстильной нити ЛН-114, $T = 20^{\circ}C$

σ , $ГПа$	$D_{\sigma t_1}$, $ГПа^{-1}$	$\left. \frac{\partial D_{\sigma t}}{\partial \ln t} \right _{t_1}$, $ГПа^{-1}$	$\sqrt{1 - \frac{D_{\sigma t_1}}{D_{\tau}}}$	$W_{\sigma t_1}$	$\varphi_{\sigma t_1}$	ΔD_{τ} , $ГПа^{-1}$	$\varphi_{\sigma t_1}$	$W_{\sigma t_1}$	$f_{\sigma_1 \sigma}$
0,073	0,100	0,0082	0,849	-1,253	0,214	0,124	0,080	-1,224	-8,09
0,097	0,109	0,0124	0,760	-0,997	0,250	0,124	0,133	-0,938	-6,20
0,109	0,126	0,0165	0,662	-0,797	0,286	0,105	0,234	-0,594	-3,93
0,121	0,139	0,0215	0,518	-0,574	0,334	0,096	0,311	-0,399	-2,64
0,134	0,152	0,0268	0,297	-0,307	0,405	0,100	0,388	-0,299	-1,51
0,146	0,171	0,0294	0	0	0,500	-	0,500	0	0
0,158	0,187	0,0278	0,230	0,238	0,574	0,108	0,595	0,192	1,27
0,170	0,196	0,0220	0,501	0,552	0,660	0,078	0,648	0,305	2,02
0,182	0,203	0,0186	0,606	0,703	0,695	0,082	0,689	0,399	2,64
0,194	0,206	0,0154	0,690	0,848	0,724	0,078	0,707	0,411	2,92
0,206	0,211	0,0121	0,767	1,013	0,752	0,079	0,737	0,515	3,40
0,218	0,213	0,0100	0,812	1,134	0,770	0,078	0,749	0,546	3,61

По данным таблицы 2.4. с помощью (2.67) определяем среднее значение податливости:

$$\overline{\Delta D_{\tau}} = 0,084 \text{ ГПа}^{-1},$$

начальную податливость:

$$D_o = D_{\tau} - \Delta D_{\tau} = 0,171 - 0,084 = 0,087 \text{ ГПа}^{-1}$$

и предельно-равновесную податливость:

$$D_{\infty} = 0,171 + 0,084 = 0,255 \text{ ГПа}^{-1}.$$

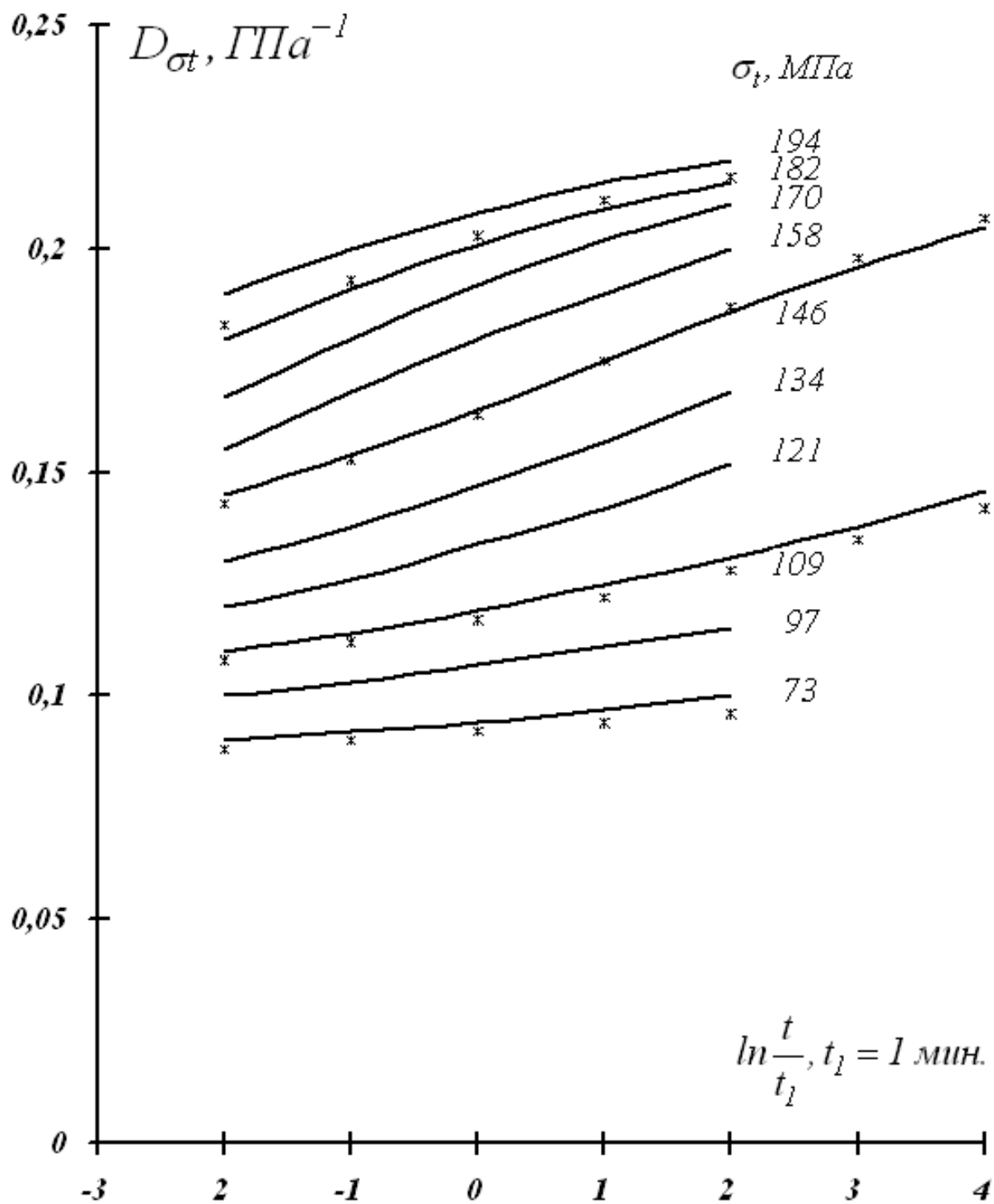


Рисунок 2.16. - Экспериментальные и расчётные значения податливости полимерной текстильной нити ЛН-114, $T = 20^\circ \text{C}$ (сплошная линия - эксперимент, * - расчёт для значений напряжения σ 73 МПа, 109 МПа, 146 МПа, 182 МПа)

По формуле (2.44) определяем

По формуле (2.60) определяем параметр интенсивности процесса

$$A_{\sigma} = 2 \cdot \frac{D'_{\sigma}}{\Delta D_{\sigma}} = 0,30.$$

Для контроля приведём пример расчёта податливости полимерной текстильной нити ЛН-114, $T = 20^{\circ}C$ для значений $\sigma = 0,182 ГПа$ и $t = 300 с$.

$$W_{\sigma t} = \frac{A_{\sigma}}{2} \cdot \left(\ln \frac{t}{t_1} + \ln \frac{t_1}{\tau_{\sigma}} \right) = 0,15 \cdot (1,61 + 2,64) = 0,638.$$

$$\Psi(W_{\sigma t}) = 0,782$$

и далее по (2.38)

$$D_{\sigma t} = D_o + (D_{\infty} - D_o) \cdot \Psi(W_{\sigma t}) = 0,087 + (0,255 - 0,087) \cdot 0,782 = 0,218 ГПа^{-1}.$$

Как видно из приведённого примера, результаты эксперимента полностью подтверждаются приведёнными расчётами.

Сравним экспериментальные и расчётные значения податливости для других значений напряжений и времени (рис. 2. 16).

Расчётные значения податливости близки к экспериментальным для всей полосы рассмотренных значений напряжений в разные моменты времени.

Этот факт позволяет сделать вывод о пригодности функции гиперболический тангенс для аналитического описания процесса ползучести.

Анализируя полученные данные, можно сделать выводы о степени деформируемости того или иного материала.

Коэффициент степени деформируемости определяется по формуле

$$k_p = \frac{D_{\infty} - D_0}{D_{\infty}} \cdot 100 \%. \quad (2.68)$$

2.6. Выводы по главе 2

Содержание главы 2 можно коротко охарактеризовать следующим образом.

Предложена к использованию в качестве релаксационной функции и функции запаздывания функция гиперболический тангенс, обладающая близким сходством с интегралом вероятности и, в силу этого, достаточно точно аппроксимирующая релаксационные и деформационные процессы, которые часто задают в виде нормального распределения числа релаксирующих или запаздывающих частиц по логарифмической шкале приведённого времени.

Аналитическое задание функции гиперболический тангенс и принадлежность её к классу элементарных функций упрощает дифференциально-интегральные преобразования в рамках рассматриваемой математической модели и тем самым ускоряет процесс нахождения вязкоупругих характеристик.

Функция гиперболический тангенс достаточно быстро стремится к своим асимптотическим значениям, что отводит ей первоочередную роль при исследовании и прогнозировании быстротекущих деформационных процессов синтетических материалов.

На основе применения функции гиперболический тангенс, разработаны методы определения релаксационных и деформационных параметров по обработкам экспериментальных релаксационных и деформационных "семейств", соответственно.

Данные методы позволяют с достаточной точностью прогнозировать релаксационные и деформационные процессы полимерных текстильных материалов, используя при этом минимальное число возможных параметров-характеристик, что упрощает процедуру расчёта.

Рассмотренные в главе методы определения релаксационных и деформационных параметров, вместе с ранее известными методами, основанными на применении функций интеграл вероятности, нормированный арктангенс и функции Кольрауша, получили дальнейшее развитие в виде программного продукта автоматизированного расчёты релаксационных и деформационных параметров.

Использование автоматизированного метода расчёта релаксационных и деформационных параметров полимерных текстильных материалов существенно сокращает время и трудоёмкость обработки экспериментальных релаксационных и деформационных "семейств", реально дает возможность сравнивать результаты использования различных математических моделей, что помимо увеличения точности вычислений, повышает достоверность определяемых величин.

3. Цифровое прогнозирование эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов

В главе рассмотрены методы цифрового прогнозирования эксплуатационных процессов (релаксационного и деформационного) полимерных текстильных материалов на основе определяющих уравнений Больцмана-Вольтерра с интегральными ядрами релаксации и запаздывания, соответствующими математическим моделям релаксационного и деформационного процессов, предложенным в предыдущей главе 2.

3.1. Определяющие интегральные соотношения эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов

Прогнозирование эксплуатационных процессов (релаксационного и деформационного) полимерных текстильных материалов является следующим этапом после математического моделирования этих процессов и определения релаксационных и деформационных параметров указанных математических моделей.

Экспериментальные релаксационные и деформационные "семейства" полимерных текстильных материалов, пример которых приведен на рис. 2.1 и рис 2.9, представлены в полулогарифмической системе координат.

Аналитическое описание этих "семейств" связано с определяющими уравнениями наследственной релаксации

$$\sigma_t = E_0 \cdot \varepsilon_t - (E_0 - E_\infty) \cdot \int_0^t \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{\partial \varphi_{\varepsilon s}}{\partial s} \cdot ds \quad (3.1)$$

для релаксационного процесса и наследственной ползучести

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E_0} \cdot \sigma_t + \left(\frac{1}{E_\infty} - \frac{1}{E_0} \right) \cdot \int_0^t \sigma_{t-s} \cdot \frac{\partial \varphi_{\sigma s}}{\partial s} \cdot ds \quad (3.2)$$

для деформационного процесса, которые являются частными случаями определяющих уравнений Больцмана-Вольтерра.

При постоянном значении деформации $\varepsilon = const$ из уравнения (3.1) получается уравнение для релаксационного "семейства", подробно описанного в главе 2

$$\sigma_t = E_0 \cdot \varepsilon - (E_0 - E_\infty) \cdot \varepsilon \cdot \varphi_{\varepsilon t}, \quad (3.3)$$

где

$$\frac{\sigma_t}{\varepsilon} = E_{\varepsilon t} = E_0 - (E_0 - E_\infty) \cdot \varphi_{\varepsilon t} - \quad (3.4)$$

модуль релаксации,

$\varphi_{\varepsilon t} \in (0;1)$ - деформационно-временная нормированная функция релаксации.

При постоянном значении напряжения $\sigma = const$ из уравнения (3.2) получается уравнение для деформационного "семейства", также подробно описанного в главе 2

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E_0} \cdot \sigma + \left(\frac{1}{E_\infty} - \frac{1}{E_0} \right) \cdot \sigma \cdot \varphi_{\sigma t}, \quad (3.5)$$

где

$$\frac{\varepsilon_t}{\sigma} = D_{\sigma t} = \frac{1}{E_0} + \left(\frac{1}{E_\infty} - \frac{1}{E_0} \right) \cdot \varphi_{\sigma t} - \quad (3.6)$$

запаздывающая податливость при ползучести,

$\varphi_{\sigma t} \in (0;1)$ - напряженно-временная нормированная функция запаздывания.

На рис. 2.2 и рис. 2.10 представлены "семейства" модуля релаксации и податливости полимерной текстильной нити ЛН-114, $T = 20^{\circ}\text{C}$, полученные из релаксационных (рис. 2.1) и деформационных (рис. 2.9) "семейств", соответственно.

Использованная логарифмическая шкала времени "растягивает" малые времена, "сжимает" большие времена и, в конечном счете, "стремится распрямить" кривые модуля релаксации и запаздывающей податливости.

Физическая обоснованность логарифмического преобразования обычной шкалы времени продиктована классической формулой Больцмана-Аррениуса

$$kT \cdot \ln \frac{\tau}{\tau_0} = U, \quad (3.7)$$

где

k - постоянная Больцмана,

$T^{\circ}\text{K}$ - абсолютная температура по Кельвину,

U - энергия активации;

τ_0 - время элементарного "перескока" релаксирующей или запаздывающей частицы,

τ - время релаксации или запаздывания частицы, как длительность ожидания для "перескока" необходимой величины тепловой энергии U .

Из рис. 2.1 и рис. .10 видно, что картина измеренных значений модуля релаксации и податливости не противоречит гипотезе о том, что модуль упругости E_0 и модуль вязкоупругости E_{∞} можно считать постоянными величинами при конкретной температуре.

По расположению линий "семейств" видны также признаки деформационно-временной (рис.2.2) и сило-временной (рис.2.10) аналогий, заключающихся в том, что по мере увеличения задаваемой

деформации или напряжения линии сдвигаются в сторону малых времен вдоль логарифмически-временной шкалы, без изменения своей формы.

При изображении кривых модуля релаксации и податливости при обычной шкале времени указанные аналогии трудно заметить и анализировать.

Проверка произведенной аппроксимации релаксационного и деформационного процессов производилась по формулам (2.3), (2.36) и проиллюстрирована на рис.2. 8, рис. 2.16.

Таким образом, получились взаимосвязанными параметры физически альтернативных уравнений наследственного типа (3.1) и (3.2).

Вместе с тем вопрос о привилегиях какой-либо одной из двух используемых аналогий - сило-временной или деформационно-временной остается не выясненным.

Не исключено, что каждая из этих аналогий имеет приближенный характер, в связи со сложностью микромеханизмов "релаксирующего" деформирования (2.3) или "запаздывающей" упругости (2.36).

В то же время отмеченная физическая противоречивость этих уравнений не запрещает их совместного использования в расчетах материаловедческого характера.

3.2. Цифровое прогнозирование релаксационных процессов полимерных текстильных материалов

Рассмотрим определяющее уравнение нелинейно-наследственной релаксации типа Больцмана-Вольтерра (3.1). В качестве релаксационной функции $\varphi_{\varepsilon t}$ выберем гиперболический тангенс, рассмотренный в главе 2,

$$\varphi_{\varepsilon t} = \frac{I}{2} \left(1 + th \left(\frac{A_{\varepsilon}}{2} \ln \frac{t}{\tau_{\varepsilon}} \right) \right), \quad (3.8)$$

где

$$W_{\varepsilon t} = \frac{A_{\varepsilon}}{2} \ln \frac{t}{\tau_{\varepsilon}} = \frac{A_{\varepsilon}}{2} \left(\ln \left(\frac{t}{t_1} \right) + \ln \left(\frac{t_1}{\tau_{\varepsilon}} \right) \right) - \quad (3.9)$$

аргумент-функционал, а

t_1 - выбранное значение базового времени.

Дифференцируя (3.8), получаем выражение для ядра релаксации

$$\begin{aligned} \varphi'_{\varepsilon t} &= \frac{\partial \varphi_{\varepsilon t}}{\partial t} = \frac{A_{\varepsilon}}{4} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\varepsilon t})} \cdot \frac{1}{t} = \frac{A_{\varepsilon}}{4} \cdot (1 - th^2(W_{\varepsilon t})) \cdot \frac{1}{t} = \\ &= A_{\varepsilon} \cdot \varphi_{\varepsilon t} \cdot (1 - \varphi_{\varepsilon t}) \cdot \frac{1}{t}. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Уравнение (3.1) с учётом (3.10) принимает вид

$$\sigma_t = E_o \varepsilon_t - (E_o - E_{\infty}) \cdot \frac{A_{\varepsilon}}{4} \cdot \int_0^t \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\varepsilon s})} \cdot \frac{ds}{s}. \quad (3.11)$$

Учитывая, что

$$\frac{ds}{s} = d(\ln s),$$

получим

$$\sigma_t = E_o \varepsilon_t - (E_o - E_{\infty}) \cdot \frac{A_{\varepsilon}}{4} \cdot \int_0^t \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\varepsilon s})} \cdot d(\ln s). \quad (3.12)$$

Займёмся вычислением интеграла, входящего в формулу (3.12), для чего введём следующие обозначения:

$$I = \frac{A_{\varepsilon}}{4} \cdot \int_0^t \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\varepsilon s})} \cdot d(\ln s). \quad (3.13)$$

Следует заметить, что данный интеграл является несобственным, так как содержит особенность в точке $t = 0$.

Разбивая интервал $(0; t]$ на n частей точками:

$$t_o = 0, t_1, \dots, t_k, \dots, t_n = t,$$

интеграл можно представить в виде суммы двух интегралов, причём только первый из них останется несобственным:

$$I = \frac{A_\varepsilon}{4} \cdot \int_0^{t_1} \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\varepsilon s})} \cdot d(\ln s) + \frac{A_\varepsilon}{4} \cdot \int_{t_1}^t \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\varepsilon s})} \cdot d(\ln s). \quad (3.14)$$

или

$$I = I^* + \tilde{I},$$

где

$$I^* = \frac{A_\varepsilon}{4} \cdot \int_0^{t_1} \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\varepsilon s})} \cdot d(\ln s), \quad (3.15)$$

$$\tilde{I} = \frac{A_\varepsilon}{4} \cdot \int_{t_1}^t \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\varepsilon s})} \cdot d(\ln s). \quad (3.16)$$

Вычислим интеграл (3.15).

В предположении непрерывности деформации ε_t по t можно записать

$$I^* \approx \frac{A_\varepsilon}{4} \cdot \varepsilon_{t-\xi} \cdot \int_0^{t_1} \frac{1}{ch^2(W_{\varepsilon s})} \cdot d(\ln s), \quad (3.17)$$

где

$$\xi \in (0; t_1].$$

Заметим, что, по теореме о среднем значении и в силу непрерывности интегрируемых функций, существует такое значение ξ , при котором данное приближённое равенство (3.17) становится точным.

Далее получаем:

$$I^* \approx \frac{A_\varepsilon}{4} \cdot \varepsilon_{t-\xi} \cdot \varphi_{\varepsilon s} \Big|_0^{t_1}, \quad (3.18)$$

откуда, учитывая, что

$$\varphi_{\varepsilon s} \rightarrow 0 \text{ при } s \rightarrow 0,$$

следует

$$I^* \approx \frac{A_\varepsilon}{4} \cdot \varepsilon_{t-\xi} \cdot \varphi_{\varepsilon t_1}. \quad (3.19)$$

Теперь займёмся вычислением интеграла (3.16).

Выберем, для определённости, равномерное разбиение интервала $(0; t]$ на n частей точками

$$t_0 = 0, t_1 = \frac{t}{n}, \dots, t_k = \frac{kt}{n}, \dots, t_n = t,$$

о котором говорилось выше.

Фиксируем в середине каждого интервала $(t_{k-1}; t_k)$ некоторую точку

$$\xi_k = \frac{t_k + t_{k-1}}{2}.$$

Таким образом, можно для приближённого значения интеграла (3.16) написать три различные интегральные суммы:

$\tilde{I}_1$ - интегральная сумма по средним точкам ξ_k ,

$\tilde{I}_2$ - правая интегральная сумма (для точек t_k) и

$\tilde{I}_3$ - левая интегральная сумма (для точек t_{k-1}).

Для первой из них имеем

$$\tilde{I}_1 = \frac{A_\varepsilon}{4} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\varepsilon_{\xi_k}})} \cdot \Delta_k, \quad (3.20)$$

где

$$\Delta_k = \frac{\Delta}{\xi_k}, \quad \Delta = \frac{t}{n}.$$

Следовательно,

$$\tilde{I}_1 = \frac{A_\varepsilon}{4} \cdot \frac{t}{n} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\varepsilon_{\xi_k}})} \cdot \frac{1}{\xi_k}, \quad (3.21)$$

где

$$\xi_k = \frac{t_k + t_{k-1}}{2} = \frac{t}{2n}(2k-1),$$

$$\ln \xi_k = \ln \left(\frac{t}{2n}(2k-1) \right) = \ln t + \ln(2k-1) - \ln(2n).$$

Учитывая вышесказанное, получаем:

$$\tilde{I}_1 = \frac{A_\varepsilon}{4} \cdot 2 \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\varepsilon\xi_k})} \cdot \frac{1}{2k-1}. \quad (3.22)$$

Таким образом,

$$I_1 = \varepsilon_{t-\xi_1} \cdot \varphi_{\varepsilon t_1} + \frac{A_\varepsilon}{2} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\varepsilon\xi_k})} \cdot \frac{1}{2k-1}. \quad (3.23)$$

Найденная интегральная сумма представляет собой приближённое значение интеграла (3.14), найденное по средним точкам ξ_k интервалов разбиения области $(0; t]$.

Для правой интегральной суммы имеем

$$\tilde{I}_2 = \frac{A_\varepsilon}{4} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_k} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\varepsilon t_k})} \cdot \Delta_k, \quad (3.24)$$

где

$$\Delta_k = \frac{\Delta}{t_k}, \quad \Delta = \frac{t}{n}.$$

Следовательно,

$$\tilde{I}_2 = \frac{A_\varepsilon}{4} \cdot \frac{t}{n} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_k} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\varepsilon t_k})} \cdot \frac{1}{t_k}, \quad (3.25)$$

где

$$t_k = \frac{kt}{n}, \quad \ln t_k = \ln\left(\frac{kt}{n}\right) = \ln t + \ln k - \ln n.$$

Таким образом,

$$\tilde{I}_2 = \frac{A_\varepsilon}{4} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_k} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\varepsilon t_k})} \cdot \frac{1}{k}. \quad (3.26)$$

Окончательно получаем

$$I_2 = \varepsilon_{t-t_1} \cdot \varphi_{\varepsilon t_1} + \frac{A_\varepsilon}{4} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_k} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\varepsilon t_k})} \cdot \frac{1}{k}. \quad (3.27)$$

Найденная интегральная сумма представляет собой приближённое значение интеграла (3.14), найденное по правым точкам t_k интервалов разбиения области $(0; t]$.

Для левой интегральной суммы имеем

$$\tilde{I}_3 = \frac{A_\varepsilon}{4} \cdot \frac{t}{n} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\varepsilon t_{k-1}})} \cdot \frac{1}{t_{k-1}}, \quad (3.28)$$

где

$$t_{k-1} = \frac{(k-1) \cdot t}{n},$$

$$\ln t_{k-1} = \ln \left(\frac{(k-1) \cdot t}{n} \right) = \ln t + \ln(k-1) - \ln n, \quad k \geq 2.$$

Следовательно,

$$\tilde{I}_3 = \frac{A_\varepsilon}{4} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\varepsilon t_{k-1}})} \cdot \frac{1}{k-1}, \quad (3.29)$$

откуда окончательно получим

$$I_3 = \varepsilon_t \cdot \varphi_{\varepsilon t_1} + \frac{A_\varepsilon}{4} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\varepsilon t_{k-1}})} \cdot \frac{1}{k-1}. \quad (3.30)$$

Найденная интегральная сумма представляет собой приближённое значение интеграла (3.14), найденное по левым точкам t_{k-1} интервалов разбиения области $(0; t]$.

Оценим точность полученных интегральных сумм.

Для этого можно взять усреднённое значение интеграла (3.16):

$$I = \frac{I_2 + I_3}{2} \pm \frac{I_2 - I_3}{2}. \quad (3.31)$$

Здесь первое слагаемое

$$\alpha = \frac{I_2 + I_3}{2} \quad (3.32)$$

даёт величину интеграла, а второе

$$\beta = \pm \frac{I_2 - I_3}{2} - \quad (3.33)$$

доверительный интеграл.

Заметим, что наиболее точным из приближённых значений интеграла (3.14), как правило, является значение I_1 , найденное по формуле (3.23).

Однако, предпочтительнее находить интегралы I_2 и I_3 по формулам (3.27) и (3.30) с дальнейшим применением (3.31), так как формула (3.31) содержит как значение интеграла (3.32), так и доверительный интервал (3.33).

Таким образом, в случае цифрового прогнозирования процесса релаксации полимерной текстильной нити ЛН-114, $T = 20^\circ C$, посредством вычисления нелинейно-наследственного интеграла путём равномерного разбиения отрезка интегрирования получены результаты, имеющие относительную погрешность менее 10 %, что является достаточно хорошей величиной погрешности.

Полученную относительную погрешность можно уменьшить, увеличивая число отрезков разбиения.

Следует также заметить, что сложность вычисления рассмотренных несобственных интегралов состоит в наличии у них сингулярной части при $t = 0$.

3.3. Цифровое прогнозирование деформационных процессов полимерных текстильных материалов

Рассмотрим определяющее уравнение нелинейно-наследственной ползучести типа Больцмана-Вольтерра (3.2).

В качестве функции запаздывания $\varphi_{\sigma t}$ выберем гиперболический тангенс, рассмотренный в главе 2:

$$\varphi_{\sigma t} = \frac{1}{2} \left(1 + th \left(\frac{A_{\sigma}}{2} \ln \frac{t}{\tau_{\sigma}} \right) \right), \quad (3.34)$$

где

$$W_{\sigma t} = \frac{A_{\sigma}}{2} \ln \frac{t}{\tau_{\sigma}} = \frac{A_{\sigma}}{2} \left(\ln \left(\frac{t}{t_1} \right) + \ln \left(\frac{t_1}{\tau_{\sigma}} \right) \right) - \quad (3.35)$$

аргумент-функционал, а

t_1 - выбранное значение базового времени.

Дифференцируя (3.34), получим выражение для ядра запаздывания

$$\begin{aligned} \varphi'_{\sigma t} &= \frac{\partial \varphi_{\sigma t}}{\partial t} = \frac{A_{\sigma}}{4} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\sigma t})} \cdot \frac{1}{t} = \frac{A_{\sigma}}{4} \cdot (1 - th^2(W_{\sigma t})) \cdot \frac{1}{t} = \\ &= A_{\sigma} \cdot \varphi_{\sigma t} \cdot (1 - \varphi_{\sigma t}) \cdot \frac{1}{t}. \end{aligned} \quad (3.36)$$

Уравнение (3.2) с учётом (3.36) принимает вид

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E_o} \cdot \varepsilon_t + \left(\frac{1}{E_{\infty}} - \frac{1}{E_o} \right) \cdot \frac{A_{\sigma}}{4} \cdot \int_0^t \sigma_{t-s} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\sigma s})} \cdot \frac{ds}{s}. \quad (3.37)$$

Учитывая, что

$$\frac{ds}{s} = d(\ln s),$$

получим:

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E_o} \cdot \varepsilon_t + \left(\frac{1}{E_{\infty}} - \frac{1}{E_o} \right) \cdot \frac{A_{\sigma}}{4} \cdot \int_0^t \sigma_{t-s} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\sigma s})} \cdot d(\ln s). \quad (3.38)$$

Займёмся вычислением интеграла, входящего в формулу (3.38), для чего введём следующие обозначения

$$I = \frac{A_{\sigma}}{4} \cdot \int_0^t \sigma_{t-s} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\sigma s})} \cdot d(\ln s). \quad (3.39)$$

Следует заметить, что данный интеграл является несобственным, так как содержит особенность в точке $t = 0$.

Разбивая интервал $(0; t]$ на n частей точками

$$t_0 = 0, t_1, \dots, t_k, \dots, t_n = t,$$

интеграл можно представить в виде суммы двух интегралов, причём только первый из них останется несобственным

$$I = \frac{A_\sigma}{4} \cdot \int_0^{t_1} \sigma_{t-s} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\sigma s})} \cdot d(\ln s) + \frac{A_\sigma}{4} \cdot \int_{t_1}^t \sigma_{t-s} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\sigma s})} \cdot d(\ln s). \quad (3.40)$$

или

$$I = I^* + \tilde{I},$$

где

$$I^* = \frac{A_\sigma}{4} \cdot \int_0^{t_1} \sigma_{t-s} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\sigma s})} \cdot d(\ln s), \quad (3.41)$$

$$\tilde{I} = \frac{A_\sigma}{4} \cdot \int_{t_1}^t \sigma_{t-s} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\sigma s})} \cdot d(\ln s). \quad (3.42)$$

Вычислим интеграл (3.41).

В предположении непрерывности напряжения σ_t по t можно записать

$$I^* \approx \frac{A_\sigma}{4} \cdot \sigma_{t-\xi} \cdot \int_0^{t_1} \frac{1}{ch^2(W_{\sigma s})} \cdot d(\ln s), \quad (3.43)$$

где

$$\xi \in (0; t_1].$$

Заметим, что, по теореме о среднем значении и в силу непрерывности интегрируемых функций, существует такое значение ξ , при котором данное приближённое равенство (3.43) становится точным.

Далее получаем:

$$I^* \approx \frac{A_\sigma}{4} \cdot \sigma_{t-\xi} \cdot \varphi_{\sigma s} \Big|_0^{t_1}, \quad (3.44)$$

откуда, учитывая, что

$$\varphi_{\sigma s} \rightarrow 0 \text{ при } s \rightarrow 0,$$

следует

$$I^* \approx \frac{A_\sigma}{4} \cdot \sigma_{t-\xi} \cdot \varphi_{\sigma t_1}. \quad (3.45)$$

Займёмся вычислением интеграла (3.42).

Выберем, для определённости, равномерное разбиение интервала $(0; t]$ на n частей точками

$$t_0 = 0, \quad t_1 = \frac{t}{n}, \quad \dots, \quad t_k = \frac{kt}{n}, \quad \dots, \quad t_n = t,$$

о котором говорилось выше.

Фиксируем в середине каждого интервала $(t_{k-1}; t_k)$ некоторую точку

$$\xi_k = \frac{t_k + t_{k-1}}{2}.$$

Таким образом, можно для приближённого значения интеграла (3.42) написать три различные интегральные суммы:

$\tilde{I}_1$ - интегральная сумма по средним точкам ξ_k ,

$\tilde{I}_2$ - правая интегральная сумма (для точек t_k) и

$\tilde{I}_3$ - левая интегральная сумма (для точек t_{k-1}).

Для первой из них имеем

$$\tilde{I}_1 = \frac{A_\sigma}{4} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon \sigma_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\sigma \xi_k})} \cdot \Delta_k, \quad (3.46)$$

где

$$\Delta_k = \frac{\Delta}{\xi_k}, \quad \Delta = \frac{t}{n}.$$

Следовательно,

$$\tilde{I}_1 = \frac{A_\sigma}{4} \cdot \frac{t}{n} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\sigma_{\xi_k}})} \cdot \frac{1}{\xi_k}, \quad (3.47)$$

где

$$\xi_k = \frac{t_k - t_{k-1}}{2} = \frac{t}{2n}(2k-1),$$

$$\ln \xi_k = \ln \left(\frac{t}{2n}(2k-1) \right) = \ln t + \ln(2k-1) - \ln(2n).$$

Учитывая вышесказанное, получаем

$$\tilde{I}_1 = \frac{A_\sigma}{4} \cdot 2 \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\sigma_{\xi_k}})} \cdot \frac{1}{2k-1}. \quad (3.48)$$

Таким образом,

$$I_1 = \sigma_{t-\xi_1} \cdot \varphi_{\sigma_{t_1}} + \frac{A_\sigma}{2} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\sigma_{\xi_k}})} \cdot \frac{1}{2k-1}. \quad (3.49)$$

Найденная интегральная сумма представляет собой приближённое значение интеграла (3.40), найденное по средним точкам ξ_k интервалов разбиения области $(0; t]$.

Для правой интегральной суммы имеем

$$\tilde{I}_2 = \frac{A_\sigma}{4} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_k} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\sigma_{t_k}})} \cdot \Delta_k, \quad (3.50)$$

где

$$\Delta_k = \frac{\Delta}{t_k}, \quad \Delta = \frac{t}{n}.$$

Следовательно,

$$\tilde{I}_2 = \frac{A_\sigma}{4} \cdot \frac{t}{n} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_k} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\sigma_{t_k}})} \cdot \frac{1}{t_k}, \quad (3.51)$$

где

$$t_k = \frac{kt}{n},$$

$$\ln t_k = \ln \left(\frac{kt}{n} \right) = \ln t + \ln k - \ln n.$$

Таким образом,

$$\tilde{I}_2 = \frac{A_\sigma}{4} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_k} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\sigma t_k})} \cdot \frac{1}{k}. \quad (3.52)$$

Окончательно получаем

$$I_2 = \sigma_{t-t_1} \cdot \varphi_{\sigma t_1} + \frac{A_\sigma}{4} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_k} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\sigma t_k})} \cdot \frac{1}{k}. \quad (3.53)$$

Найденная интегральная сумма представляет собой приближённое значение интеграла (3.40), найденное по правым точкам t_k интервалов разбиения области $(0; t]$.

Для левой интегральной суммы имеем

$$\tilde{I}_3 = \frac{A_\sigma}{4} \cdot \frac{t}{n} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\sigma t_{k-1}})} \cdot \frac{1}{t_{k-1}}, \quad (3.54)$$

где

$$t_{k-1} = \frac{(k-1) \cdot t}{n},$$

$$\ln t_{k-1} = \ln \left(\frac{(k-1) \cdot t}{n} \right) = \ln t + \ln(k-1) - \ln n,$$

$$k \geq 2.$$

Следовательно,

$$\tilde{I}_3 = \frac{A_\sigma}{4} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\sigma t_{k-1}})} \cdot \frac{1}{k-1}, \quad (3.55)$$

откуда окончательно получим

$$I_3 = \sigma_t \cdot \varphi_{\sigma t_1} + \frac{A_\sigma}{4} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{ch^2(W_{\sigma t_{k-1}})} \cdot \frac{1}{k-1}. \quad (3.56)$$

Найденная интегральная сумма представляет собой приближённое значение интеграла (3.40), найденное по левым точкам t_{k-1} интервалов разбиения области $(0; t]$.

Оценим точность полученных интегральных сумм.

Для этого можно взять усреднённое значение интеграла (3.40)

$$I = \frac{I_2 + I_3}{2} \pm \frac{I_2 - I_3}{2}. \quad (3.57)$$

Здесь первое слагаемое

$$\alpha = \frac{I_2 + I_3}{2} \quad (3.58)$$

даёт величину интеграла, а второе

$$\beta = \pm \frac{I_2 - I_3}{2} - \quad (3.59)$$

доверительный интеграл.

Заметим, что наиболее точным из приближённых значений интеграла (3.40), как правило, является значение I_1 , найденное по формуле (3.49).

Однако, предпочтительнее находить интегралы I_2 и I_3 по формулам (3.53) и (3.56) с дальнейшим применением (3.57), так как формула (3.57) содержит как значение интеграла (3.58), так и доверительный интервал (3.59).

Таким образом, в случае цифрового прогнозирования деформационного процесса полимерной текстильной нити ЛН-114, $T = 20^\circ C$, посредством вычисления нелинейно-наследственного интеграла путём равномерного разбиения отрезка интегрирования получены результаты, имеющие относительную погрешность менее 10 %, что является достаточно хорошей величиной погрешности.

Полученную относительную погрешность можно уменьшить, увеличивая число отрезков разбиения.

Следует также заметить, что сложность вычисления рассмотренных несобственных интегралов состоит в наличии у них сингулярной части при $t = 0$.

3.4. Выводы по главе 3

Таким образом, в главе рассмотрены методы цифрового прогнозирования эксплуатационных процессов (релаксационного и деформационного) полимерных текстильных материалов на основе определяющих уравнений Больцмана-Вольтерра с интегральными ядрами релаксации и запаздывания, соответствующими математическим моделям релаксационного и деформационного процессов.

Показано, что относительная погрешность цифрового прогнозирования релаксационных и деформационных процессов полимерных текстильных материалов не превышает величины 10 %, что является технически допустимой величиной погрешности.

Полученную относительную погрешность можно уменьшить, увеличивая число отрезков разбиения.

4. Проверка адекватности математических моделей эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов

В настоящей главе предлагаются методы проверки адекватности математических моделей эксплуатационно-релаксационных процессов и эксплуатационно-деформационных процессов полимерных текстильных материалов.

Указанные методы проверки адекватности математических моделей основаны на применении интегральных критериев точности прогнозирования эксплуатационно-релаксационных процессов и эксплуатационно-деформационных процессов полимерных текстильных материалов.

Кроме методов проверки адекватности математических моделей эксплуатационно-релаксационных процессов и эксплуатационно-деформационных процессов полимерных текстильных материалов, предлагается построение цифровых математических моделей указанных процессов, наилучшим образом удовлетворяющим интегральным критериям точности прогнозирования эксплуатационно-релаксационных процессов и эксплуатационно-деформационных процессов полимерных текстильных материалов.

4.1. Определение степени точности математического моделирования релаксационных процессов полимерных текстильных материалов

Для построения критерия проверки адекватности математической модели эксплуатационно-релаксационных процессов полимерных текстильных материалов рассмотрим уравнение нелинейно-

наследственной релаксации (3.1), преобразовав его делением на напряжение σ_t к виду

$$E_0 \cdot D(\sigma, t) + \int_0^t D(\sigma, t - \theta) \cdot \frac{\partial E(\varepsilon, \theta)}{\partial \theta} \cdot d\theta = 1. \quad (4.1)$$

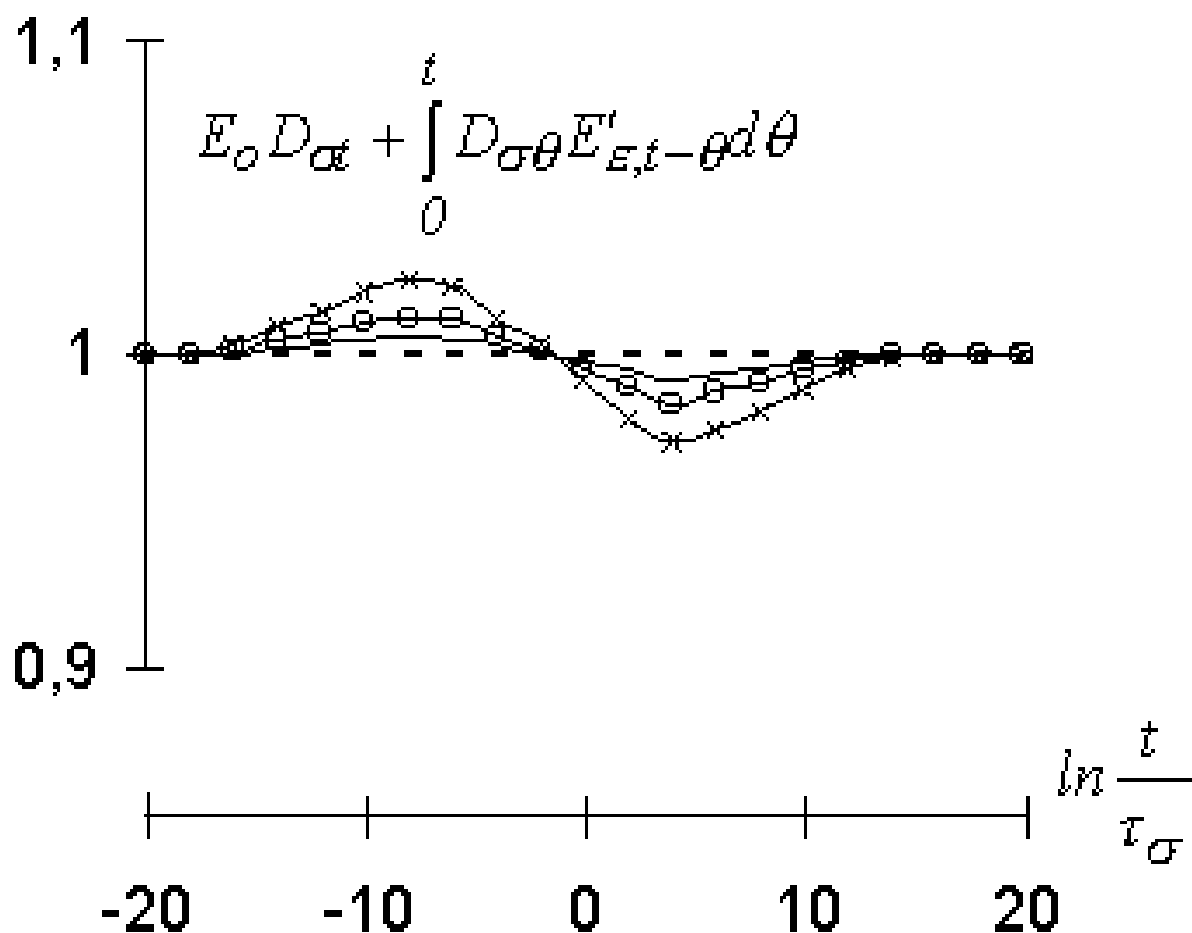


Рисунок 4.1. - Применение интегрального критерия адекватности математического моделирования эксплуатационно-релаксационного процесса полимерных текстильных материалов (4.1) с нормированной функцией в виде гиперболического тангенса (2.9) к полимерной текстильной нити ЛН-114, $T = 20^\circ C$ (сплошная линия - $\varepsilon = 1\%$, о - $\varepsilon = 2\%$, * - $\varepsilon = 3\%$).

Указанное интегральное соотношение является условием адекватности выбора модуля релаксации $E(\varepsilon, t)$ и податливости $D(\sigma, t)$.

Для априорно выбранной математической модели на основе нормированных функций релаксации $\varphi_{\varepsilon t}$ и запаздывания $\varphi_{\sigma t}$ левая часть соотношения (4.1) отличается от значения "единица".

Чем меньше указанное отклонение левой части от "единицы", тем более соответствуют друг другу модуль релаксации $E(\varepsilon, t)$ и податливость $D(\sigma, t)$, то есть, тем более адекватной является математическая модель релаксационного процесса.

В силу сказанного, критерием выбора наиболее адекватной математической модели релаксационного процесса полимерных текстильных материалов может служить минимизация отклонения функционала

$$\chi\left(\ln\frac{t}{\tau(\sigma)}\right) = E_0 \cdot D(\sigma, t) + \int_0^t D(\sigma, t - \theta) \cdot \frac{\partial E(\varepsilon, \theta)}{\partial \theta} \cdot d\theta, \quad (4.2)$$

от единичного значения, то есть функциональное соотношение

$$\left| E_0 \cdot D(\sigma, t) + \int_0^t D(\sigma, t - \theta) \cdot \frac{\partial E(\varepsilon, \theta)}{\partial \theta} \cdot d\theta - 1 \right| \rightarrow \min. \quad (4.3)$$

Применение интегрального критерия адекватности математического моделирования релаксационных процессов полимерных текстильных материалов к математической модели релаксационного процесса на основе нормированной функции гиперболический тангенс (2.9) на примере полимерной текстильной нити ЛН-114, $T = 20^\circ C$ показано на рис. 4.1.

Из рис. 4.1, в частности видно, что применяемая математическая модель релаксационного процесса на основе гиперболического тангенса обладает достаточной степенью надежности при определении параметров-характеристик релаксации и прогнозировании релаксационных процессов.

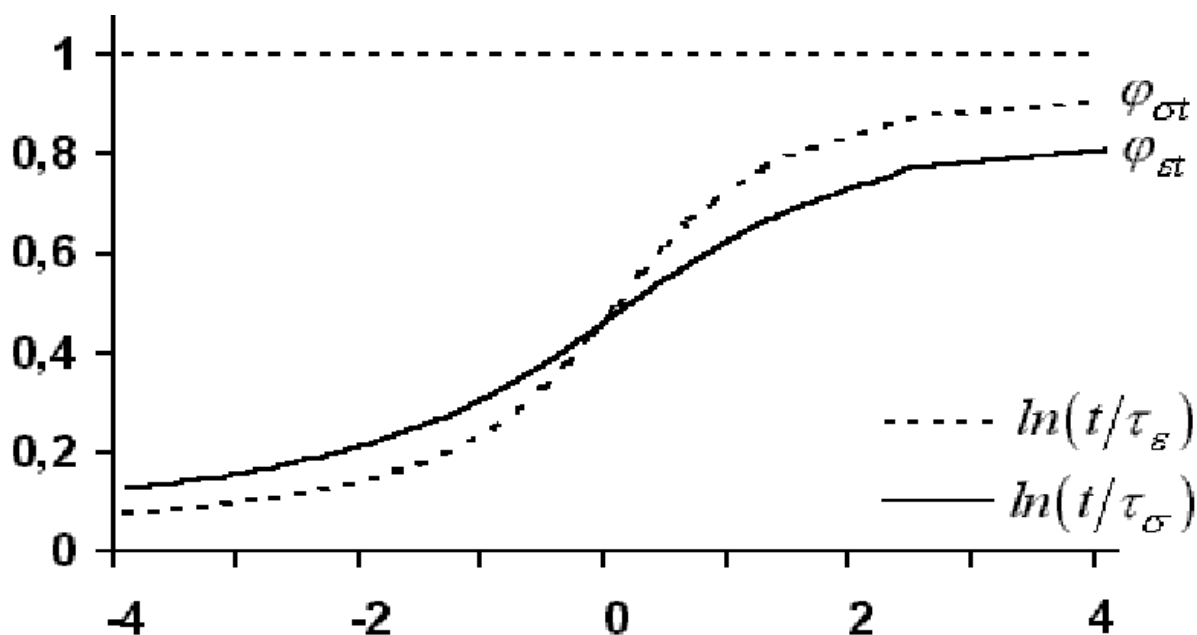


Рисунок 4.2. - Графическое построение релаксационной функции $\varphi_{\varepsilon t}$ - основы наиболее адекватной математической модели релаксационного процесса нормированной функции релаксации (сплошная линия) по заданной нормированной функции запаздывания $\varphi_{\sigma t}$ (пунктир) в виде гиперболического тангенса (2.44) для полимерной текстильной нити ЛН-114, $T = 20^{\circ}C$

Критерий адекватности выбора математической модели релаксационного процесса полимерных текстильных материалов (4.3) можно использовать для цифрового нахождения наилучшей функции релаксации по заданному ядру запаздывания (рис. 4.2) для построения математической модели релаксационного процесса, обладающего наивысшей адекватностью.

Расчетные значения функции релаксации $\varphi_{\varepsilon t}$ (рис. 4.2) используются для построения наиболее адекватной математической модели релаксационного процесса полимерных текстильных материалов.

4.2. Определение степени точности математического моделирования деформационных процессов полимерных текстильных материалов

Для построения критерия проверки адекватности математической модели эксплуатационно-деформационных процессов полимерных текстильных материалов рассмотрим уравнение нелинейно-наследственной ползучести (3.2), преобразовав его делением на деформацию ε_t к виду

$$D_0 \cdot E(\varepsilon, t) + \int_0^t E(\varepsilon, t - \theta) \cdot \frac{\partial D(\sigma, \theta)}{\partial \theta} \cdot d\theta = 1. \quad (4.4)$$

Указанное интегральное соотношение является условием адекватности выбора податливости $D(\sigma, t)$ и модуля релаксации $E(\varepsilon, t)$.

Для априорно выбранной математической модели на основе нормированных функций запаздывания $\varphi_{\sigma t}$ и релаксации $\varphi_{\varepsilon t}$ левая часть соотношения (4.4) отличается от значения "единица".

Чем меньше указанное отклонение левой части от "единицы", тем более соответствуют друг другу податливость $D(\sigma, t)$ и модуль релаксации $E(\varepsilon, t)$, то есть, тем более адекватной является математическая модель деформационного процесса.

В силу сказанного, критерием выбора наиболее адекватной математической модели деформационного процесса полимерных текстильных материалов может служить минимизация отклонения функционала

$$\chi \left(\ln \frac{t}{\tau(\varepsilon)} \right) = D_0 \cdot E(\varepsilon, t) + \int_0^t E(\varepsilon, t - \theta) \cdot \frac{\partial D(\sigma, \theta)}{\partial \theta} \cdot d\theta, \quad (4.5)$$

от единичного значения, то есть функциональное соотношение

$$\left| D_0 \cdot E(\varepsilon, t) + \int_0^t E(\varepsilon, t - \theta) \cdot \frac{\partial D(\sigma, \theta)}{\partial \theta} \cdot d\theta - 1 \right| \rightarrow \min. \quad (4.6)$$

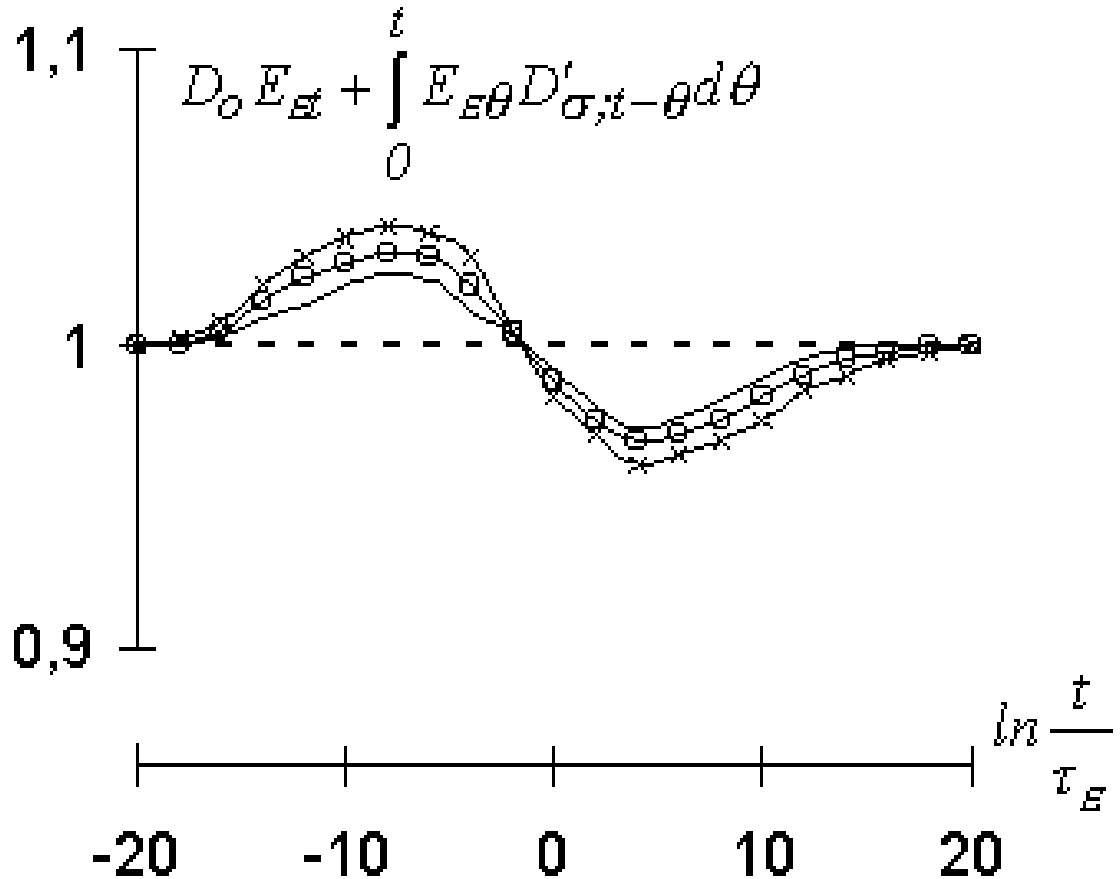


Рисунок 4.3. - Применение интегрального критерия адекватности математического моделирования эксплуатационно-деформационного процесса полимерных текстильных материалов (4.4) с нормированной функцией в виде гиперболического тангенса (2.44) к полимерной текстильной нити ЛН-114, $T = 20^{\circ}C$ (сплошная линия - $\sigma = 109 \text{ МПа}$, о - $\sigma = 146 \text{ МПа}$, * - $\sigma = 182 \text{ МПа}$)

Применение интегрального критерия адекватности математического моделирования деформационных процессов полимерных текстильных материалов к математической модели деформационного процесса на

основе нормированной функции гиперболический тангенс (2.44) на примере полимерной текстильной нити ЛН-114, $T = 20^{\circ}C$ показано на рис. 4.3.

Из рис. 4.3, в частности видно, что применяемая математическая модель деформационного процесса на основе гиперболического тангенса обладает достаточной степенью надежности при определении параметров-характеристик ползучести и прогнозировании деформационных процессов.

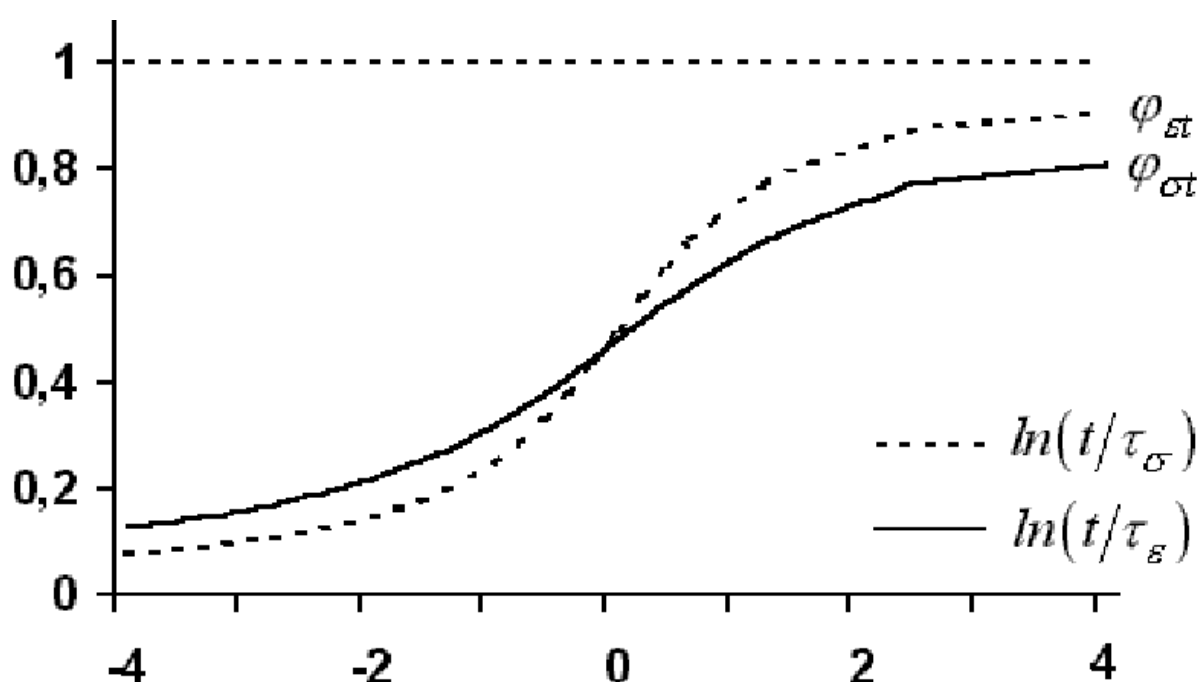


Рисунок 4.4. - Графическое построение деформационной функции $\varphi_{\sigma t}$ - основы наиболее адекватной математической модели деформационного процесса нормированной функции запаздывания (сплошная линия) по заданной нормированной релаксационной функции $\varphi_{\epsilon t}$ (пунктир) в виде гиперболического тангенса (2.9) для полимерной текстильной нити ЛН-114, $T = 20^{\circ}C$

Критерий адекватности выбора математической модели деформационного процесса полимерных текстильных материалов (4.6) можно использовать для цифрового нахождения наилучшей функции запаздывания по заданному ядру релаксации (рис. 4.4) для построения математической модели деформационного процесса, обладающего наивысшей адекватностью

Расчетные значения функции запаздывания $\varphi_{\sigma t}$ (рис. 4.4) используются для построения наиболее адекватной математической модели деформационного процесса полимерных текстильных материалов.

4.3. Выводы по главе 4

Таким образом, в настоящей главе предложены методы проверки адекватности математических моделей релаксационных и деформационных процессов полимерных текстильных материалов.

Разработанный критерий наиболее адекватного выбора математической модели релаксационного процесса (4.3) можно использовать для цифрового определения наилучшего (с точки зрения точности математического моделирования релаксационного процесса) ядра релаксации по заданному ядру запаздывания (рис. 4.2).

В этом случае, построенная математическая модель релаксационного процесса полимерных текстильных материалов будет обладать наивысшей адекватностью, по сравнению с другими аналогичными математическими моделями.

И аналогично, разработанный критерий наиболее адекватного выбора математической модели деформационного процесса (4.6) можно использовать для цифрового определения наилучшего (с точки зрения точности математического моделирования деформационного процесса) ядра запаздывания по заданному релаксационному ядру (рис. 4.4).

В этом случае, построенная математическая модель деформационного процесса полимерных текстильных материалов будет обладать наивысшей адекватностью, по сравнению с другими аналогичными математическими моделями.

5. Практическое применение математического моделирования эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов

В главе рассматривается применение методов, разработанных в диссертационной работе для решения задач по сравнительному анализу свойств полимерных текстильных материалов, для исследования взаимосвязи указанных свойств со структурой и их целенаправленного технологического регулирования, а также для расчетного прогнозирования кратковременных и длительных эксплуатационных процессов указанных материалов.

5.1. Применение методов моделирования эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов

Методы моделирования эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов имеют важное прикладное значение.

В их основе лежат полученные экспериментально с помощью релаксметров напряжений и деформаций, а также другого подобного оборудования "семейства" релаксационных и деформационных кривых.

При этом разработанные методы позволяют определять релаксационно-эксплуатационные и деформационно-эксплуатационные параметры-характеристики по одноименным "семействам", состоящим из небольшого числа релаксационных и деформационных кривых, то есть указанные методы обладают достаточной степенью устойчивости к эксперименту.

Для полноценного применения разработанных методов моделирования релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов на практике вполне достаточно релаксационных и деформационных "семейств", состоящих всего из 5 - 6 экспериментальных кривых.

Кроме того, предлагаемые методы позволяют определять релаксационно-эксплуатационные и деформационно-эксплуатационные параметры-характеристики по небольшому значению внешнего (лабораторного) времени (порядка 5 - 10 минут), что положительно сказывается на сокращении времени проведения исследования.

Следует заметить, что используемые многопозиционные релаксометры напряжений и деформаций позволяют одновременно проводить измерения на нескольких образцах.

Поэтому наличие у релаксометра, например, шести позиций позволяет получать экспериментальные "семейства" за один цикл измерений, т.е. за 5 - 10 минут.

Существенную роль в обработке экспериментальных данных играет компьютерная автоматизация цифровых вычислений.

Для этой цели было разработано соответствующее программное обеспечение, на основе которого были официально зарегистрированы и прошли успешную апробацию программы для ЭВМ:

- "Расчет параметров математических моделей деформационных процессов технических тканей". Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663557 от 26.06.2023.

- "Расчет параметров математических моделей вязкоупругих процессов технических тканей". Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663584 от 26.06.2023.

Разработанное программное обеспечение позволяет свести обработку экспериментальных "семейств" к простейшему действию на уровне общения оператора с компьютером, посредством разработанного удобного интерфейса.

5.2. Применение методов цифрового прогнозирования эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов

Разработанные методы цифрового прогнозирования эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов имеют важное прикладное значение.

Указанные методы применимы для цифрового прогнозирования различных релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов.

К наиболее типичным из них относятся: процессы релаксации напряжения, характеризующиеся приложенной деформацией; процессы ползучести, характеризующиеся приложенным напряжением; деформационно-восстановительные процессы как с полной, так и с частичной разгрузкой, характеризующиеся меняющейся величиной приложенного напряжения; процессы обратной релаксации, характеризующиеся меняющейся величиной приложенной деформации; процессы растяжения, характеризующиеся скоростью деформирования; процессы активной релаксации, характеризующейся увеличением скорости деформирования; процессы длительной релаксации, характеризующиеся уменьшением скорости деформирования; процессы активной ползучести, характеризующиеся увеличением скорости нагружения; процессы длительной ползучести, характеризующиеся уменьшением скорости нагружения и другие.

Цифровое прогнозирование релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов имеет важное значение, как на стадии подборов образцов полимеров, обладающих необходимыми свойствами, для запуска их производства, так и на стадии самого производства - для контроля технологического процесса за соблюдением необходимых параметров-характеристик, получаемых материалов.

Трудно себе представить современную лабораторию, изучающую свойства полимерных текстильных материалов, либо осуществляющую контроль за технологией их производства, не владеющую методиками по прогнозированию релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных процессов указанных материалов.

Научно-технический прогресс и постоянное совершенствование полимерных текстильных материалов, применяемых в различных отраслях промышленности, требует от производителей повышенного внимания к контролю качества производимых материалов и к наличию у данных материалов заданных эксплуатационных свойств.

Применение разработанных методов прогнозирования релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов было бы существенно затруднено при отсутствии автоматизированного расчета соответствующих нелинейно-наследственных несобственных интегралов, обладающих свойством сингулярности в начальный момент времени процесса деформирования, входящих в состав определяющих интегральных уравнений (3.1), (3.2).

С целью автоматизации цифрового прогнозирования было разработано соответствующее программное обеспечение, на основе которого была официально зарегистрирована программа для ЭВМ:

- "Прогнозирование релаксационно-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения". Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018612848 от 01.03.2018.

Компьютеризация цифрового прогнозирования релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов снимает указанную проблему, а удобный интерфейс способствует наглядному и простому общению пользователей с ЭВМ.

Существенно, что методы по прогнозированию эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов объединены с методами определения их релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных параметров-характеристик в рамках единого программного продукта, снабжённого необходимым интерфейсом.

5.3. Разработка методов проведения сравнительного анализа эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов

Еще одной стороной компьютеризации исследований эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов является разработка программного обеспечения и официальная регистрация программы для ЭВМ по проведению сравнительного анализа эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов:

- "Проведение сравнительного анализа релаксационно-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения". Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018612704 от 22.02.2018.

Всё сказанное позволяет рассматривать прогнозирование релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов, определение релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных параметров-характеристик, проведение сравнительного анализа эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов как единый программный продукт, объединенный единым интерфейсом.

5.4. Выводы по главе 5

Таким образом, все методы, разработанные и приведённые в настоящей работе, находят своё применение как в научных и учебных целях - при исследовании релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов, так и в производственных целях - на стадии контроля за технологическим процессом производства материалов, обладающих определенными механическими свойствами.

Применение разработанных методов на практике заметно упрощается благодаря автоматизации соответствующих вычислительных процедур.

Включение методов определения релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных параметров-характеристик, методов цифрового прогнозирования релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных процессов, а также методов сравнительного анализа эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов в единые программные пакеты определяет их универсальность и возможность использования при прогнозировании любых эксплуатационных процессов указанных материалов с учетом их сложности.

Создание удобного и наглядного интерфейса позволяет освоить применимость данных методов персоналу на уровне оператора ЭВМ с минимальной степенью подготовленности и не требует специальной квалификации.

Следует также особо отметить, что разработанные методы носят универсальный характер, они применимы не только для исследования эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов, но и более широкого класса полимеров, например, материалов, применяемых в легкой промышленности и в других отраслях техники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработанные математические модели релаксационных и деформационных процессов, адаптированные к конкретным полимерным текстильным материалам с большой степенью точности моделируют указанные процессы.

2. Разработанные методы цифрового прогнозирования релаксационных и деформационных процессов полимерных текстильных материалов позволяют осуществить указанное прогнозирование и являются средством для подтверждения адекватности проведенного математического моделирования этих процессов.

3. Разработанные методы компьютерного определения релаксационно-эксплуатационных и деформационно-эксплуатационных параметров полимерных текстильных материалов, а также методы цифрового прогнозирования релаксационных и деформационных процессов полимерных текстильных материалов позволяют проводить сравнительный анализ эксплуатационных свойств указанных материалов, имеющий существенное значение для повышения их конкурентоспособности и решении проблемы импортозамещения продукции.

4. Разработанное программное обеспечение по расчету параметров математических моделей процессов релаксационных и деформационных процессов полимерных текстильных материалов и по численному прогнозированию указанных процессов, объединенное общим интерфейсом в единый комплекс программ, позволяет проводить качественную оценку эксплуатационных свойств изучаемых материалов.

5. Разработанные в диссертации методы математического моделирования, численного прогнозирования эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов и их сравнительной оценки опробованы на большой группе указанных материалов с положительным эффектом, что позволяет считать их универсальными и рекомендовать для проведения аналогичных исследований других групп полимерных текстильных материалов.

Библиографический список использованной литературы

1. Физика полимеров. Перевод с английского. М.: Мир, 1969, 322 с.
2. Бартенев Г.М., Френкель С.Я. Физика полимеров. Л.: Химия, 1990, 430с.
3. Бартенев Г.М., Зеленев Ю.В. Физика и механика полимеров. М.: Высшая школа. 1983. 392 с.
4. Вундерлих Б. Физика макромолекул. М.: Мир, 1976. Т. 1. 624 с.
5. Вундерлих Б. Физика макромолекул. М.: Мир, 1979. Т. 2. 576 с.
6. Джейл Ф. К. Полимерные монокристаллы. Л.: Химия, 1968. 552 с.
7. Уорд И. Механические свойства твёрдых полимеров. М.:Химия, 1975. 350 с.
8. Бартенев Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров. М.: Химия, 1984. 280 с.
9. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твёрдых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.
10. Рабинович А.Л. Введение в механику армированных полимеров. М., Наука, 1970, 482 с.
11. Ростиашвили В.Г., Иржак В.И., Розенберг Б.А. Стеклование полимеров. Л.: Химия, 1987, 188с.
12. Перепелкин К. Е. Структурная обусловленность механических свойств высокоориентированных волокон. М.: НИИТЭХИМ, 1970. 72 с.
13. Перепелкин К.Е. Физическое материаловедение ориентированных полимерных волокон // В кн. Механические свойства и износостойкость текстильных материалов. Вильнюс - Каунас, 1971, С. 7-14.
14. Овчинников В.А., Жоров В.А., Баскаев З.П. Упругость кристаллической решетки полиэтилентерефталата // Механика полимеров, 1972, № 6, С. 982-986.
15. Рейнер М. Реология. Пер. с англ. М.: Наука, 1965, 224 с.

16. Бродская Л.И., Геллер В.Э. Изучение оптической анизотропии по толщине полиэфирного моноволокна // Химические волокна, 1973, № 2, С. 48-50.
17. Начинкин О.И. О форме поперечного сечения химических волокон. Хим. волокна, 1973, № 2, С. 28-30.
18. Носов М.П., Пахомова Л.Н. О радиальной неоднородности капроновых волокон // Известия вузов. Технология легкой промышленности, 1964, № 2, С. 73-78.
19. Аскадский А.А. Деформация полимеров. М.: Химия, 1973. 448 с.
20. Бирштейн Т.М., Птицин О.Б. Конформации макромолекул. М.: Наука, 1964, 392 с.
21. Волькенштейн М.В. Конформационная статистика полимерных цепей. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1959. 468 с.
22. Годовский Ю.К. Теплофизика полимеров. М.: Химия, 1982, 280 с.
23. Готлиб Ю.Я., Даринский А.А., Светлов Ю.Е. Физическая кинетика макромолекул. Л.: Химия, 1986, 272 с.
24. Гросберг А.Ю., Хохлов А.Р. Статистическая физика макромолекул. М.: Наука, 1989, 344 с.
25. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. Пер. с англ. М.: Наука, 1978, 780с.
26. Кобеко П.П. Аморфные вещества. Л.: Изд. АН СССР, 1952, 432 с.
27. Манделькern Л. Кристаллизация полимеров. М.-Л.: Химия, 1966. -336 с.
28. Марихин В.А., Мясникова Л.П. Надмолекулярная структура полимеров. Л.:Химия, 1977. 240 с.
29. Нильсон Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций. М.: Химия, 1978. 312 с.
30. Рихтмайер Р. Принципы современной математической физики. М.: Мир, 1982. 488 с.

31. Сверхвысокомодульные полимеры // Под ред. А. Чиффери и И. Уорда. Пер. с англ. Л.: Химия, 1983, 272 с.
32. Тамупс В.П., Куксенко В.С. Микромеханика разрушения полимерных материалов. Рига. Зинатне, 1978, 294 с.
33. Тобольский А. Свойства и структура полимеров. Пер. с англ. М.: Химия, 1964, 322 с.
34. Уржумцев Ю.С. Прогнозирование длительного сопротивления полимерных материалов. М.: Наука, 1982. 222 с.
35. Феодоровский Г.Д. Определяющие уравнения реологически сложных полимерных сред // Вестник Ленингр. ун-та. Матем., механ., астрон. 1990, №15, вып.3. С. 87-91.
36. Хопкинс И., Керкджиан К. Физическая акустика. Пер. с англ. М.: ИЛ, 1969, Т.2. Часть Б, С.110.
37. Ильюшин А.А., Победря Б.Е. Основы математической теории термовязко-упругости. М., 1970. 280 с.
38. Шермергор Т.Д. Реологические характеристики упруго-вязких материалов, обладающих асимметричным релаксационным спектром // Механика твердого тела. 1967, №5, С. 73-83.
39. Шермергор Т.Д. Описание наследственных свойств материала при помощи суперпозиции операторов // В кн.: Механика деформируемых тел и конструкций. М., 1975. С. 528-532.
40. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. ФМ, М., 1963, 848 с.
41. Смит Т.Л. Эмпирические уравнения для вязкоупругих характеристик и вычисления релаксационных спектров // В кн.: Вязкоупругая релаксация в полимерах. М.: Мир, 1974. 270 с.
42. Перепелкин К.Е. Самопроизвольное (спонтанное) ориентирование и удлинение химических волокон и пленок. М.: НИИТЭХИМ, 1980. 56 с.

43. Перепелкин К.Е. Межмолекулярные взаимодействия в волокнообразующих линейных полимерах и их некоторые механические свойства // Механика полимеров, 1971, № 5, с.790-795.
44. Перепелкин К.Е. Основные закономерности ориентирования и релаксации химических волокон на основе гибко- и жесткоцепных полимеров. М.: НИИТЭХИМ, 1977. 48 с.
45. Веттегрень В.И., Марихин В.А., Мясникова Л.П., Чмель А. Структура поверхности полиэтилена // Высокомолекулярные соединения, 1975, сер. А, Т. 17, № 7, С. 1546-1549.
46. Веттегрень В.И., Воробьев В.М., Фридлянд К.Ю. Длина перенапряженных участков полимерных молекул // Высокомолекулярные соединения, 1977, сер. Б, т. 19, № 4, С. 266-269.
47. Веттегрень В.И. Влияние механических напряжений на инфракрасные спектры полимеров. Автореф. канд. дис. -Л.: ФТИ АН СССР им. А. Ф. Иоффе. 1970. - 14 с.
48. Гольберг И.И. Механическое поведение полимерных материалов. М.: Химия, 1970. 192 с.
49. Гуревич Г.И. О законе деформации твёрдых и жидких тел // Журнал технической физики. 1947, 17, №12, С. 1491-1502.
50. Работнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твёрдых тел. М.: Наука, 1977. 384с.
51. Ферри Дж. Вязкоупругие свойства полимеров. М.: ИЛ, 1963. 535с.
52. Сталевич А.М. Деформирование высокоориентированных полимеров. Теория нелинейной вязкоупругости: Конспект лекций. Ч.2. СПб: СПГУТД, 1997. 197 с.
53. Сталевич А.М., Тиранов В.Г., Слуцкер Г.Я., Романов В.А. Прогнозирование изотермической ползучести синтетических нитей технического назначения // Химические волокна. 1978, №4, С. 52-56.
54. Сталевич А.М., Тиранов В.Г., Слуцкер Г.Я. Количественное описание

ползучести кордной нити из ароматического полиамида // Химические волокна. 1981, №4. С. 38-39.

55. Сталевич А.М. Уравнения нелинейной вязкоупругости высокоориентированных полимеров // Проблемы прочности. 1981, №12, С. 95-98.

56. Сталевич А.М. Описание процессов механической релаксации синтетических нитей с помощью алгебраической функции // Известия вузов. Технология лёгкой промышленности. 1981, №3, С. 14-17.

57. Гиниятуллин А.Г., Сталевич А.М. Расчёт диаграмм растяжения капроновых лент // Проблемы прочности. 1982, №3, С. 118-122.

58. Сталевич А.М. Прогнозирование сложных режимов деформирования высокоориентированных полимеров // Проблемы прочности. -1985, №2, с. 40-42.

59. Сталевич А.М. Расчётное прогнозирование нагруженных состояний ориентированных полимеров // Известия вузов. Технология лёгкой промышленности. 1989, №3, С. 23-29

60. Сталевич А.М. Определение характеристик нелинейной вязкоупругости синтетических нитей // Известия высших учебных заведений. Технология лёгкой промышленности. 1989, №1, С. 35-38.

61. Сталевич А.М. Спектральное моделирование вязкоупругих свойств синтетических нитей // Известия вузов. Технология лёгкой промышленности. 1988, №2, с.43-47.

62. Макаров А.Г. Цифровое прогнозирование деформационных процессов текстильных материалов с повышенной точностью // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2022. № 4. С. 91-95.

63. Макаров А.Г. Математическое моделирование и прогнозирование деформационно-восстановительных процессов полимерных нитей // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета

технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2023. № 2. С. 104-107.

64. Макаров А.Г. Развитие методологии математического моделирования и цифрового прогнозирования деформационно восстановительных процессов полимерных нитей // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2023. Т. 62. № 4. С. 5-8.

65. Макаров А.Г. Повышение точности математического моделирования и прогнозирования деформационных процессов полимерных текстильных материалов // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2023. Т. 60. № 2. С. 36-39.

66. Макаров А.Г. Процессы усадки и восстановления арамидных текстильных материалов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2024. № 4. С. 35-38.

67. Макаров А.Г. Разработка математических моделей эксплуатационных процессов арамидных текстильных материалов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2024. № 2. С. 21-25.

68. Макаров А.Г. Спектральное моделирование вязкоупругих процессов полимерных текстильных материалов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2024. № 1. С. 22-27.

69. Макаров А.Г. Методология выделения упругой, вязкоупругой и пластической компонент полной деформации в нетканых материалах // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2024. Т. 70. № 6. С. 137-142.

70. Макаров А.Г. Разработка методов математического моделирования релаксационно-деформационных процессов термостойких арамидных

материалов // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2024. Т. 67. № 3. С. 18-22.

71. Переборова Н.В. Управление качеством материалов текстильной и легкой промышленности // Дизайн. Материалы. Технология. 2022. № 1. С. 154-160.

72. Переборова Н.В. Разработка критериев цифровой качественной оценки релаксационно-восстановительных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2022. № 2. С. 93-98.

73. Переборова Н.В. Цифровое прогнозирование деформационных режимов эксплуатации полимерных волокнистых материалов // Химические волокна. 2022. № 2. С. 18-21.

74. Переборова Н.В. Решение задачи управления качеством материалов текстильной и легкой промышленности // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2022. № 2. С. 16-22.

75. Переборова Н.В. Инновационные методы контроля качества и функциональности полимерных материалов текстильной и легкой промышленности // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2022. № 1. с. 27-32.

76. Переборова Н.В. Критерии качественной оценки релаксационных процессов полимерных текстильных материалов - основа повышения их конкурентоспособности // Дизайн. Материалы. Технология. 2023. № 4 (72). С. 127-133.

77. Переборова Н.В. Оценка релаксационных и восстановительных свойств полимерных текстильных материалов // Дизайн. Материалы. Технология. 2023. № 3 (71). С. 83-86.

78. Переборова Н.В. Разработка рекомендаций по проектированию медицинских текстильных материалов на основе критериев качественной оценки их эксплуатационных свойств // Дизайн. Материалы. Технология. 2023. № 2 (70). С. 121-126.
79. Переборова Н.В. Решение задачи по управлению качеством полимерных текстильных материалов // Дизайн. Материалы. Технология. 2024. № 2 (74). С. 143-148.
80. Переборова Н.В. Разработка цифровых методов определения достоверности прогнозирования деформационных и релаксационных процессов полимерных материалов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2025. № 1. С. 22-25.
81. Ginzburg B.M., Sultanov N. Revision of the Model of a Fibril with Amorphous Nodules for Oriented Soft-chain Semicrystalline Polymers // Journal of Macromolecular Science - Physics, 2002, № 41(1), p. 149 - 176.
82. Гинзбург Б.М., Сталевич А.М. Об одном из надмолекулярных механизмов нелинейной вязкоупругости ориентированных полимеров // Журнал технической физики, 2004, т. 74, вып. 11, С. 58 - 62.
83. Гинзбург Б.М., Султанов Н. Влияние температуры на микродеформационное поведение ориентированных аморфно-кристаллических полимеров // Высокомолекулярные соединения, 2001, Т. 43, № 7, С. 1140 - 1151.
84. Макаров А.Г. Разработка компьютерных технологий анализа свойств полимеров и прогнозирования деформационных процессов // Вестник СПГУТД, вып.6. -СПб.: Изд-во СПГУТД, 2002. С. 121-128.
85. Макаров А.Г. Математические методы анализа физико-механических свойств материалов легкой промышленности. 2002, СПГУТД, 248 с.
86. Макаров А.Г. Прогнозирование деформационных процессов в текстильных материалах. СПГУТД, 2002, 220 с.

87. Сталевич А.М., Роот Л.Е. Заторможенность восстановительного деформационного процесса высокоориентированных полимеров // Проблемы прочности. 1984, №1, с.43-45.
88. Сталевич А.М., Коровин В.А., Роот Л.Е. и др. Обратная механическая релаксация синтетических нитей // Химические волокна. - 1988, №3, с. 39-41.
89. Сталевич А.М., Гиниятуллин А.Г. Вязкоупругость синтетических нитей в динамических режимах // Известия высших учебных заведений. Технология лёгкой промышленности. 1988, №5, С. 54-56.
90. Сталевич А.М., Громова Е.С., Каминский В.Н. Диаграммы растяжения нити ПАН//Химические волокна. 1990, №2, С.43-44.
91. Переборова Н.В., Климова Н.С., Чистякова Е.С., Зурахов В.С., Зурахова Т.А. Моделирование сложных режимов эксплуатации полимерных текстильных материалов // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2017. Т. 37. № 3. С. 26-33.
92. Переборова Н.В., Максимова Н.А., Чистякова Е.С. Вариант логистической модели склада изделий текстильной и легкой промышленности // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2018, № 1, с. 113-116.
93. A.V. Demidov, N.V. Pereborova, A.A. Makarova, E.S. Chistyakova. Development of a Method for Taking into Account the Influence of Temperature in Predicting Complex Deformation Processes of Polymeric Textile Materials // Fibre Chemistry, 2020, v. 52, № 4, pp. 279-282.
- русский вариант: Демидов А.В., Переборова Н.В., Макарова А.А., Чистякова Е.С. Разработка метода учета влияния температуры при прогнозировании сложных деформационных процессов полимерных текстильных материалов // Химические волокна. 2020. № 4. С. 47 - 49.
94. Переборова Н.В., Макаров А.Г., Коробовцева А.А., Макарова А.А., Чистякова Е.С. Математическое моделирование и качественный анализ

деформационных и восстановительных процессов полимерных текстильных эластомеров, применяемых в хирургической имплантологии // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2020. № 6 (390). С. 196-201.

95. Вагнер В.И., Чистякова Е.С., Томашевич Я.С., Колодин А.А. Вариант оценки эксплуатационных и функциональных свойств полимерных текстильных нитей // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2023. № 2. С. 44-47.

96. Переборова Н.В., Томашевич Я.С., Чистякова Е.С. Вопросы проектирования текстильных материалов медицинского назначения // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2023. № 3. С. 20-24.

97. Вагнер В.И., Переборова Н.В., Томашевич Я.С., Чистякова Е.С. Компьютерное моделирование вязкоупругости ориентированных полимерных текстильных материалов// Дизайн. Материалы. Технология, 2023 - 3, С. 118-123.

98. Вагнер В.И., Чистякова Е.С., Климова Н.С., Томашевич Я.С. Определение степени достоверности цифрового прогнозирования эксплуатационных режимов полимерных текстильных материалов // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2023. Т. 64. № 6. С. 35-38.

99. Переборова Н.В., Макаров А.Г., Чистякова Е.С., Вагнер В.И. Варианты компьютерного прогнозирования деформационных процессов технического текстиля//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2018, № 1, с. 109-119.

100. Козлов А.А., Овсянников Д.А., Терушкина О.Б., Бусыгин К.Н., Чистякова Е.С. Разработка методов системного анализа для исследования функциональных свойств полиамидных тканей для

парашютостроения//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2018, № 1, с. 39-49.

101. Переборова Н.В., Егорова М.А., Абрамова И.В., Чистякова Е.С. Методы проведения качественной оценки деформационных и восстановительных свойств медицинских текстильных эластомеров на стадии их производства// Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2019, № 2, с. 17-27.

102. Переборова Н.В., Егорова М.А., Егоров И.М., Чистякова Е.С. Методы системного анализа деформационных свойств геотекстильных нетканых полотен для оценки их функционально-эксплуатационных свойств// Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2019, № 2, с. 54-65.

103. Переборова Н.В., Киселев С.В., Чистякова Е.С. Вариант моделирования спектра релаксации аморфного полимерного материала//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2019. № 5. С. 79-91.

104. Переборова Н.В., Киселев С.В., Чистякова Е.С., Чалова Е.И. Компьютерное прогнозирование эксплуатационных процессов текстильных материалов при организации их производства//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2019. № 5. С. 27-37.

105. Буряк Е.А., Козлов А.А., Макарова А.А., Чистякова Е.С. Прогнозирование процесса восстановления формы текстильных материалов на стадии организации производства//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна.

Серия 4: Промышленные технологии, 2020, № 3, с. 33-45.

106. Чистякова Е.С. Математическое моделирование эластических и восстановительных свойств полиэфирных нитей //Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна.

Серия 1. Естественные и технические науки, 2023, № 4, с. 14-18.

107. Чистякова Е.С. Методы математического моделирование и численного прогнозирования деформационных процессов арамидных материалов//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки, 2023, № 4, с. 95-99.

108. Вагнер В.И., Разумеев К.Э., Коновалов А.С., Чистякова Е.С. Математическое моделирование и цифровое прогнозирование механических процессов текстильных полимеров//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии, 2023 - 3, с. 10-15.

109. Вагнер В.И., Чистякова Е.С., Литвинов А.М., Пушкарь Д.В. Исследование сложных релаксационно-деформационных процессов полиамидных тканей для парашютостроения//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2024. № 2. С. 134-140.

110. Чистякова Е.С. математическое моделирование вязкоупругости морских полимерных канатов//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2024. № 2. С. 146-151.

111. Переборова Н.В., Чистякова Е.С. Моделирование, прогнозирование и системный анализ деформационных свойств арамидных текстильных материалов сложного строения// Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2024. № 3. С. 17-21.

112. Литвинов А.М., Вагнер В.И., Чистякова Е.С., Пушкарь Д.В. Цифровое прогнозирование вязкоупругости полимерных морских канатов//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2024. № 4. С. 5-11.
113. Переборова Н.В., Киселев С.В., Чистякова Е.С., Климова Н.С. Прогнозирование релаксационно-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018612848 от 01.03.2018.
114. Переборова Н.В., Киселев С.В., Чистякова Е.С., Климова Н.С. Проведение сравнительного анализа релаксационно-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018612704 от 22.02.2018.
115. Егорова М.А., Егоров И.М., Чистякова Е.С., Чистяков А.С. Расчет параметров математических моделей деформационных процессов технических тканей. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663557 от 26.06.2023.
116. Егорова М.А., Егоров И.М., Чистякова Е.С., Чистяков А.С. Расчет параметров математических моделей вязкоупругих процессов технических тканей. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663584 от 26.06.2023.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Свидетельства на государственную регистрацию программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018612704

**"Проведение сравнительного анализа
релаксационно-эксплуатационных свойств полимерных
текстильных материалов технического назначения"**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна» (RU)*

Авторы: *Переборова Нина Викторовна (RU), Киселев Сергей
Владимирович (RU), Чистякова Елена Сергеевна (RU), Климова
Наталья Сергеевна (RU)*



Заявка № **2018610156**

Дата поступления **09 января 2018 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **22 февраля 2018 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

Копия свидетельства о государственной регистрации программы для
ЭВМ № 2018612704 от 22.02.2018

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018612848

**"Прогнозирование релаксационно-эксплуатационных
свойств полимерных текстильных материалов технического
назначения"**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна» (RU)*

Авторы: *Переборова Нина Викторовна (RU), Киселев Сергей
Владимирович (RU), Чистякова Елена Сергеевна (RU), Климова
Наталья Сергеевна (RU)*



Заявка № 2018610166

Дата поступления 09 января 2018 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 01 марта 2018 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

Копия свидетельства о государственной регистрации программы для
ЭВМ № 2018612848 от 01.03.2018

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023663557

**"Расчет параметров математических моделей
деформационных процессов технических тканей"**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна" (RU)*

Авторы: *Егорова Марина Авинировна (RU), Егоров Иван
Михайлович (RU), Чистякова Елена Сергеевна (RU),
Чистяков Александр Сергеевич (RU)*



Заявка № 2023662890

Дата поступления 19 июня 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 26 июня 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Копия свидетельства о государственной регистрации программы для
ЭВМ № 2023663557 от 26.06.2023

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023663584

**"Расчет параметров математических моделей
вязкоупругих процессов технических тканей"**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна" (RU)*

Авторы: *Егорова Марина Авинировна (RU), Егоров Иван
Михайлович (RU), Чистякова Елена Сергеевна (RU),
Чистяков Александр Сергеевич (RU)*



Заявка № 2023662887

Дата поступления 19 июня 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 26 июня 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Копия свидетельства о государственной регистрации программы для
ЭВМ № 2023663584 от 26.06.2023

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
Акты внедрения разработанных методов



Общество с ограниченной ответственностью "ЭКОВАСТ"
(ООО «ЭКОВАСТ»)
ОГРН 1177847199012, ИНН 7811651260, КПП 781101001.
Юр. адрес: 192177, Санкт-Петербург г,
3-й Рыбацкий проезд, д. 3, литера А, пом. 10-Н-4.

Утверждаю
Исполнительный директор
ООО «Эковаст»


Куликов М.А.
24 марта 2025 года
г. Санкт-Петербург

АКТ
о внедрении результатов
диссертационной работы Чистяковой Елены Сергеевны, представленной на
соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности
2.6.17. «Материаловедение»

Настоящий составлен в том, что результаты диссертационного исследования «Разработка методов математического моделирования и численного прогнозирования эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов», использовались в производственно-хозяйственной деятельности ООО «Эковаст» в процессе реализации концепции ESG (Environment, Social, Governance) при разработке бизнес-процессов и управлении организацией в период использования переработанного пластика и прочих отходов для получения химических волокон с улучшенными потребительскими свойствами в 2023-2024 гг.

Внедрение предложенных автором методов математического моделирования и численного прогнозирования деформационных и релаксационных процессов полимерных текстильных материалов позволяет повысить качество и надёжность продукции, сократить сроки разработки новых изделий, а также снизить себестоимость продукции на 8-10 %.

Заместитель генерального директора
по производству

Палей С.М.

Акт о внедрении результатов работы от ООО «ЭКОВАСТ»

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО



Кронверкская ул., 23
Санкт-Петербург, 197101
Тел: (812) 232-90-02
Факс: (812) 233-28-98

ИНН 7813045522 КПП 781301001
Р/с 40702810903260001955
К/с 30101810145250000411
ФИЛИАЛ «ЦЕНТРАЛЬНЫЙ»
ВТБ (ПАО) Г. МОСКВА

Утверждаю
Генеральный директор
АО «САЛЮТ»

С.А. Тихомирова
01 сентября 2025 г.

АКТ
О внедрении результатов
диссертационной работы Чистяковой Елены Сергеевны

Настоящий составлен в том, что материалы и научные результаты диссертационного исследования Чистяковой Е.С. на тему: «Разработка методов математического моделирования и численного прогнозирования эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов», представленного на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. «Материаловедение» применялись в качестве практических рекомендаций по повышению эффективности производственно-хозяйственной деятельности АО «Салют» с 2023 г. и по настоящее время.

Разработанное программное обеспечение по расчету параметров математических моделей процессов релаксационных и деформационных процессов полимерных текстильных материалов и по численному прогнозированию указанных процессов, объединенное общим интерфейсом в единый комплекс программ, позволяет проводить качественную оценку эксплуатационных свойств изучаемых материалов, что сокращает время производства отдельных изделий на 9-11 %, улучшает качество и эффективность производственных процессов.

Начальник производства

Л. Н. Андреева

Акт о внедрении результатов работы от АО «САЛЮТ»