

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

На правах рукописи

Евдокимов Владислав Владимирович

**ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ АРАМИДНЫХ 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 – 2026

Оглавление

	Стр.
Введение	5
 1. Обзор современных методов исследования, моделирования и цифрового прогнозирования функциональных процессов арамидных текстильных материалов.....	 11
1.1. Основные виды функциональных процессов арамидных текстильных материалов.....	11
1.2. Линейные функциональные процессы арамидных текстильных материалов.....	23
1.3. Нелинейные функциональные процессы арамидных текстильных материалов.....	28
1.4. Выводы по главе 1.....	32
 2. Исследование влияния температуры на функциональные свойства арамидных текстильных материалов.....	 34
2.1. Технические характеристики изучаемых арамидных текстильных материалов.....	35
2.2. Исследование арамидных текстильных материалов в режимах растяжения.....	37
2.3. Исследование влияния температуры на прочностные свойства арамидных текстильных материалов.....	40
2.4. Исследование влияния температуры на усадку и восстановление арамидных текстильных материалов.....	47
2.5. Выводы по главе 2.....	52

3. Математическое моделирование функциональных процессов арамидных текстильных материалов.	54
3.1. Экспериментальные исследования релаксационных процессов арамидных текстильных материалов.	54
3.2. Математическое моделирование релаксационных процессов арамидных текстильных материалов.	57
3.3. Экспериментальные исследования процессов ползучести и восстановительных процессов арамидных текстильных материалов.	59
3.4. Математическое моделирование ползучести и восстановления арамидных текстильных материалов.	62
3.5. Выводы по главе 3.	63
 4. Цифровое прогнозирование функциональных процессов арамидных текстильных материалов.	 65
4.1. Цифровое прогнозирование релаксационных процессов арамидных текстильных материалов.	66
4.2. Повышение точности цифрового прогнозирования для случая активных релаксационных процессов арамидных текстильных материалов.	72
4.3. Повышение точности цифрового прогнозирования для случая длительных релаксационных процессов арамидных текстильных материалов.	78
4.4. Цифровое прогнозирование процессов ползучести и восстановительных процессов арамидных текстильных материалов.	84

4.5. Повышение точности цифрового прогнозирования для случая активных процессов ползучести и восстановительных процессов арамидных текстильных материалов.	94
4.6. Повышение точности цифрового прогнозирования для случая длительных процессов ползучести и восстановительных процессов арамидных текстильных материалов.	100
4.7. Выводы по главе 4.	105
5. Практическое применение методов цифрового прогнозирования функциональных процессов арамидных текстильных материалов.	108
5.1. Практическое применение методов определения параметров математических моделей функциональных процессов арамидных текстильных материалов.	109
5.2. Практическое применение метода цифрового прогнозирования функциональных процессов арамидных текстильных материалов. .	114
5.3. Разработка компьютерных алгоритмов и программного обеспечения по цифровому прогнозированию функциональных процессов арамидных текстильных материалов.	116
5.4. Выводы по главе 5.	136
Заключение	138
Библиографический список использованной литературы	140
Приложение А. Свидетельства о регистрации программ.	157
Приложение Б. Акты внедрения.	166

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертационной работы обоснована необходимостью прогнозирования функциональных свойств арамидных текстильных материалов, имеющей определяющее значение при разработке и создании новых материалов. Расширение областей применения и условий эксплуатации арамидных текстильных материалов требует все более подробного исследования их функциональных свойств. Такие исследования целесообразно проводить на основе современных цифровых технологий, позволяющих моделировать и прогнозировать различные функциональные свойства.

На изучаемые функциональные свойства арамидных текстильных материалов могут оказывать влияние различные факторы, основными из которых являются: температурные воздействия, влажность, кислотность среды, уровни и длительности механических воздействий и т.д. Арамидные текстильные материалы выгодно отличаются от большинства других полимерных материалов достаточно большой деформационной жесткостью и устойчивостью к влиянию некоторых агрессивных сред.

Для проведения сравнительного анализа и исследования функциональных свойств арамидных текстильных материалов необходимы разработки математических моделей указанных свойств. Особую важность при этом имеет задача прогнозирования функциональных свойств в условиях их повседневной эксплуатации.

Создание новых перспективных арамидных текстильных материалов заданной функциональности обосновывает необходимость разработки новых математических моделей функциональных свойств этих материалов, а также применение для исследования указанных свойств цифровых технологий и современных методов обработки информации.

Работа выполнялась аспирантом в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, Проект № FSEZ-2026-0003 на тему: «Разработка научных основ и методологии математического моделирования, цифрового прогнозирования и качественной оценки функционально-эксплуатационных свойств полимерных материалов технического, двойного и медицинского назначения в условиях переменной температуры» под руководством научного руководителя аспиранта (в 2022 – 2026 гг.).

Степень разработанности темы исследования. Применение цифровых технологий при моделировании и прогнозировании функциональных свойств арамидных текстильных материалов является важной задачей. Проведение количественной и качественной оценки функциональных свойств арамидных текстильных материалов является достаточно трудоемкой задачей, так как предполагается не только исследование указанных свойств этих материалов, но и их математическое моделирование, а также последующее цифровое прогнозирование.

Исследованиями в данном направлении в настоящее время активно занимаются д.т.н., проф. Демидов А.В., д.т.н., проф. Макаров А.Г., д.т.н., проф. Переборова Н.В., к.т.н., доц. Егорова М.А., к.т.н., доц. Вагнер В.И., к.т.н., доц. Егоров И.М., к.т.н., доц. Козлов А.А., к.т.н., доц. Киселев С.В.

Цель работы состоит в разработке комплекса методов исследования и цифрового прогнозирования функциональных свойств арамидных текстильных материалов на основе математического моделирования и современных информационных технологий.

Основными задачами исследования являются:

- математическое моделирование функциональных свойств арамидных текстильных материалов;

- разработка методов цифрового прогнозирования функциональных свойств арамидных текстильных материалов;
- разработка компьютерных алгоритмов и программ для ЭВМ по цифровому прогнозированию функциональных свойств арамидных текстильных материалов;
- разработка методов системного анализа для оценки функциональных свойств арамидных текстильных материалов;
- проведение сравнительного анализа функциональных свойств арамидных текстильных материалов и выявление зависимости этих свойств от компонентного состава указанных материалов.

Методология и методы исследования. Теоретическую и методологическую основу исследования составляют современные и классические представления и положения, известные в материаловедении полимеров. Используются также закономерности и законы физики, физико-химии полимеров, механики и термодинамики. Применяются также современные информационные технологии и методы математики (численные методы, интегро-дифференциальные уравнения и др.).

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 ... структурах.

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

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

5. Установление закономерностей и критериев оценки разрушения ... неметаллических ... 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 ... материалов.

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

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

Научная новизна работы состоит:

- в разработке математической модели функциональных свойств арамидных текстильных материалов;
- в разработке цифровых методов прогнозирования функциональных свойств арамидных текстильных материалов на основе математического моделирования;
- в разработке компьютерных алгоритмов и программ для ЭВМ по цифровому прогнозированию функциональных свойств арамидных текстильных материалов;
- в разработке методов системного анализа для оценки функциональных свойств арамидных текстильных материалов на основе компьютерного цифрового прогнозирования;

- проведение сравнительного анализа функциональных свойств арамидных текстильных материалов и выявление зависимости этих свойств от компонентного состава указанных материалов.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в том, что разработаны методы, алгоритмы и программное обеспечение, позволяющие осуществлять:

- цифровое прогнозирование функциональных свойств арамидных текстильных материалов;
- системный анализ по оценке функциональных свойств арамидных текстильных материалов;
- сравнительный анализ функциональных свойств арамидных текстильных материалов и выявление зависимости этих свойств от компонентного состава указанных материалов.

Материалы диссертации использованы в учебном процессе на кафедре интеллектуальных систем и защиты информации СПбГУПТД, в научных исследованиях лаборатории информационных технологий СПбГУПТД, а также при курсовом и дипломном проектировании.

Положения, выносимые на защиту:

- разработанная математическая модель функциональных свойств арамидных текстильных материалов;
- разработанные методы цифрового прогнозирования функциональных свойств арамидных текстильных материалов на основе математического моделирования;
- разработанные на основе информационных технологий компьютерные алгоритмы и программы для ЭВМ по цифровому прогнозированию функциональных свойств арамидных текстильных материалов;

- разработанные методы системного анализа по оценке функциональных свойств арамидных текстильных материалов на основе компьютерного прогнозирования;

- разработанные методы сравнительного анализа функциональных свойств арамидных текстильных материалов и методики выявления зависимостей этих свойств от компонентного состава указанных материалов.

Степень достоверности результатов. Методы математического моделирования и цифрового прогнозирования функциональных свойств арамидных текстильных материалов были внедрены в ЗАО «САЛЮТ» и в ООО «ПКФ «Петро-Васт», где подтвердили свою полную работоспособность. По результатам применения указанных методов получены практические рекомендации по проектированию арамидных текстильных материалов с заданными функциональными свойствами.

Апробация результатов исследования. Результаты работы докладывались на всероссийских и международных научно-технических конференциях, в том числе, на Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием "Инновации молодежной науки", Санкт-Петербург, 2023 - 2026 гг., на Международной научной конференции «Инновационные направления развития науки о полимерных волокнистых и композиционных материалах» Санкт-Петербург, 2026 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 25 печатных работ, среди которых 5 статей в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ для опубликования материалов диссертаций по специальности 2.6.17 - Материаловедение, 8 свидетельств на государственную регистрацию программ для ЭВМ в Роспатенте.

1. ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ, ЦИФРОВОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ АРАМИДНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Глава содержит обзор современной научной литературы по методам исследования, математического моделирования и цифрового прогнозирования функциональных процессов арамидных текстильных материалов.

В главе приведены также основные понятия и закономерности теории вязкоупругости полимеров, на основе которой разрабатываются методы математического моделирования и цифрового прогнозирования функциональных процессов арамидных текстильных материалов.

В главе рассмотрены основные виды функциональных процессов арамидных текстильных материалов – релаксационный, деформационный (ползучесть) и восстановительный.

Приведены также различные типы функциональных процессов арамидных текстильных материалов - линейный и нелинейный, указаны их особенности, достоинства и различия.

1.1. Основные виды функциональных процессов арамидных текстильных материалов

Основными видами функциональных процессов, влияющих на их функциональность, являются релаксационные процессы, процессы ползучести и восстановительные процессы.

Процессы ползучести и восстановительные процессы можно отнести к одной группе – деформационных процессов.

Арамидные текстильные материалы, как и другие ориентированные полимерные материалы обладают свойством механической анизотропии, характеризующим ориентирование их макромолекул.

Арамидные текстильные материалы часто рассматривают как квазиодномерные, что значительно упрощает построение математических моделей их эксплуатационных процессов, в частности, деформационных и релаксационных [1-3].

Другим важным свойством, которым обладают ориентированные полимеры, имеющие цепную структуру макромолекул, является высокоэластичность [4-6], что означает возможность вращения макромолекул полимера вокруг своих внутренних узлов, позволяя макромолекуле быть гибкой и легко сворачиваемой [7].

Свойство гибкости макромолекул полимеров особо может проявляется при их интенсивном тепловом движении [8].

Если же рассматривается стеклообразное состояние полимера, то в этом случае его деформация характеризуется изменяющимися межатомными расстояниями и валентными углами макромолекулярных цепей [9-11].

В случае же высокоэластического состояния полимера, его деформация характеризуется лишь ориентацией макромолекул и перемещениями их звеньев, при которых не меняются межмолекулярные расстояния [12-14].

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 [15-17].

Вместе с тем, при физической интерпретации наблюдаемых механических свойств полимерных материалов существенную роль играют общепринятые структурные двухфазные модели, представляющие чередование кристаллических и аморфных областей [18-20].

Из принятых моделей надмолекулярного строения ориентированных полимеров качественно видно, что соотношения между напряжением и деформацией имеют температурно-временной характер [21].

Наблюдаемые корреляции между механическими свойствами и структурой также говорят в пользу представлений о решающей роли межатомных, межмолекулярных взаимодействий [22-24].

Анализ опубликованных источников 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 [25].

В зоне неразрушающих механических воздействий одновременно проявляются три деформационных явления: упругость, вязкоупругость и пластичность [26].

Первое обусловлено изменением межатомных расстояний, валентных углов, количеством этих упругих взаимодействий, их ориентацией [27-29].

Второе связано с температурно-временными перегруппировками в основном в аморфных областях [30].

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

Деформационные процессы текстильных материалов проходят под действием внешней нагрузки и сопровождаются изменением деформации [31-33].

Как правило, полную деформацию делят на три основные компоненты [34-36]: 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 [37-39] 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 [40-41].

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 [42-44].

Влияние температуры на деформационные свойства полимеров связано с изменением молекулярной подвижности и определяется их физическим состоянием [45].

Поэтому при переходе полимера из застеклованного в вязкоупругое состояние уменьшается модуль релаксации и увеличивается удлинение при разрыве [46].

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 полимера (расстекловывание с повышением температуры и механическое стеклование с ростом скорости деформирования) [47-49].

Основными механическими характеристиками полимерных текстильных материалов являются: модуль релаксации [50]:

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

и податливость [51]:

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

где:

t - время,

ε - деформация,

σ - напряжение.

Иногда, вместо напряжения σ рассматривается приложенное усилие F , которое связано с напряжением формулой [52]

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (1.3)$$

где:

S - площадь поперечного сечения изучаемой полимерной нити или другого материала.

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 [53-55].

Эти характеристики определяются строением и физическим состоянием материала, которое в свою очередь зависит от температуры и продолжительности действия внешних факторов [56].

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 [57-59].

Механическое поведение полимерных 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 [60-62].

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 [63].

При малых нагрузках отклонение атомов от положения равновесия пропорционально действующей силе и величине соответствующего силового коэффициента [64].

Изменение длин химических связей, валентных углов и небольшие угловые изменения в конфигурациях элементарных звеньев распространяются в виде волны упругой деформации со скоростью звука [64-66].

В силу сказанного, особую роль приобретает нахождение акустического значения модуля $E_{ак}$ [67].

Вязкоупругая деформация связана с изменением конформаций макромолекул и изменением степени их асимметрии [68].

Она может сопровождаться перемещением отдельных участков макромолекул друг относительно друга с перераспределением части межмолекулярных связей [69-71].

Большие величины вязкоупругих деформаций связаны с сегментальной подвижностью макромолекул в аморфных участках и характерны только для полимеров с макромолекулами линейной структуры [72-74].

Проявление вязкоупругих свойств полимеров зависит от многих структурных факторов, как на молекулярном, так и на надмолекулярном уровне [75].

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 [76].

Конформационные изменения в молекулярной структуре происходят со скоростями, на много порядков меньшими, чем распространение упругого импульса, причем их скорость постепенно убывает во времени [77].

Скорости конформационных переходов существенно зависят от температуры.

В застеклованном состоянии они сравнительно невелики, но для значений температуры выше стеклования скорости резко возрастают [78].

В пределах одного физического состояния скорости деформационного процесса достаточно хорошо описываются уравнением Аррениуса, в котором энергия активации зависит от величины приложенного напряжения [79-81]:

$$kT \cdot \ln \frac{\tau_{\sigma}}{\tau_o} \simeq U_{\sigma}, \quad (1.4)$$

где:

k - постоянная Больцмана,

T - абсолютная температура по Кельвину,

$\tau_o \simeq 10^{-13} \text{ с}$,

τ_{σ} - время запаздывания,

U_{σ} - убывающая энергия активации с начальным значением $U_{\sigma o} \simeq 100 \text{ кДж / моль}$.

Пластическое деформирование связано с необратимым перемещением больших участков и макромолекул друг относительно друга [82].

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 [83].

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 [84].

Скорость этого перемещения зависит от температуры и также определяется уравнением Аррениуса (1.4).

При растяжении полимерных текстильных материалов под действием внешней силы происходит деформация фибриллярной структуры: изменение ориентации кристаллитов и аморфных участков, деформация их в осевом направлении [85-87].

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 [88].

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 [89].

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) [90].

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 [91].

Иначе происходит деформация аморфных областей структуры.

Из-за разной длины цепей нагрузка распределяется по ним неравномерно, и деформация определяется только частью проходных макромолекул [92].

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 [93].

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 [94].

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) [95].

Чем менее упорядочена структура полимера, тем в большей степени она изменяется при нагружении [96].

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

Не полностью ориентированные полимеры в процессе их нагружения могут дополнительно ориентироваться [97].

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 разнотолщина (а, соответственно, их ориентация), определяющие число держащих нагрузку цепей [98-100].

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 [101].

Однако они являются своеобразными "физическими сшивками", фиксируя сложившуюся структуру и препятствуя проскальзыванию молекулярных цепей при нагружении [102].

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 [103].

Протекание этих структурных изменений связано с гибкостью макромолекул и величинами межмолекулярных взаимодействий, а также с температурой, определяющей уровень молекулярной сегментальной подвижности [104].

Чем больше жесткость макромолекул, межмолекулярное взаимодействие и меньше относительная температура (выше температуры стеклования), тем ниже скорость деформационных процессов [105].

Наряду с этим скорость деформационных процессов тем меньше, чем больше упорядоченность надмолекулярной структуры - величина кристалличности, ориентации [106].

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

Величины вязкоупругого восстановления полимеров также определяются их аморфно-кристаллической структурой [107].

Высокой степенью вязкоупругости обладают гибкоцепные полимеры с невысокими значениями плотности энергии межмолекулярного взаимодействия (полиамидные и др.) и температурой стеклования вблизи или ниже комнатной температуры [108].

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 [109-111].

У полимеров с сильными межмолекулярными связями и высокой температурой стеклования (поливинилспиртовых, целлюлозных) сильно выражено явление вынужденной вязкоупругости, и они обладают невысокими вязкоупругими свойствами [112].

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 [113].

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 [114].

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

1.2. Линейные функциональные процессы арамидных текстильных материалов

Феноменологическое моделирование деформированных состояний изотропных твердых тел получило интенсивное фундаментальное развитие в разделах физики и строительной механики [115].

Реология охватывает из твердых тел - тело Гука (идеально упругое тело, рассматриваемое в классической теории упругости), из жидкостей - ньютонову жидкость ("простая" вязкая жидкость, рассматриваемая в классической гидродинамике) [116].

К ним следует добавить еще тело Сен-Венана - твердое тело, обладающее пределом текучести [117].

Тело Сен-Венана изучает идеальная пластичность.

Все другие "реологические тела" могут рассматриваться как комбинации этих трех основных тел [118].

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) [119].

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 [120].

Изложенные исходные положения, вместе с математическим аппаратом для анализа механических свойств такого анизотропного материала как полимерная нить представляет лишь качественный интерес.

В физике твердых полимерных тел общим признанием пользуется теория наследственности.

Эта теория базируется на принципе суперпозиции Больцмана, который для случая релаксации предполагает, что напряжение материала зависит от предыстории его деформирования, когда каждая ступень деформирования дает независимый вклад в конечное напряжение, так что полное напряжение может быть получено простым суммированием всех деформационных вкладов [121].

Аналитически это может быть представлено интегральным уравнением наследственного типа Больцмана-Вольтерра:

$$\sigma(t) = \varepsilon(t) \cdot E_0 + \int_0^t \phi(t - \tau) \cdot \varepsilon(\tau) \cdot d\tau, \quad (1.5)$$

где:

σ - напряжение;

ε - деформация;

t - конечный момент времени;

E_0 - модуль упругости (начальное значение модуля релаксации E_t);

функцию $\phi(t - \tau)$ называют функцией памяти или интегральным ядром уравнения Больцмана-Вольтерра.

Функция $\phi(t - \tau)$ учитывает всю предысторию деформирования материала, т. е. влияние предыдущих деформаций [122].

Для реальных полимеров она может принимать различный вид и находится либо из экспериментальных данных, либо подбором.

Уравнение (1.5), построенное на основе принципа суперпозиции Больцмана, отражает наследственно-упругие свойства материала [123].

Полезно увидеть, что при $t \ll \tau$, где τ - время релаксации, материал ведет себя упруго:

$$\sigma_{t \ll \tau} \rightarrow E_0 \cdot \varepsilon_t, \quad (1.6)$$

а при $t \gg \tau$ вязкоупруго:

$$\sigma_{t \gg \tau} \rightarrow E_\infty \cdot \varepsilon_t, \quad (1.7)$$

где асимптотические значения модуля релаксации E_t :

E_0 - модуль упругости и

E_∞ - модуль вязкоупругости.

Аналогичным образом, согласно принципу суперпозиции Больцмана, ползучесть материала зависит от предыстории его нагружения, а каждая ступень нагружения дает независимый вклад в конечную деформацию, так что полная деформация может быть получена простым суммированием всех вкладов [124].

Для обратимых деформаций при малых напряжениях уравнение Больцмана-Вольтерра имеет вид:

$$\varepsilon(t) = \sigma(t) \cdot D_0 + \int_0^t \phi(t - \tau) \cdot \sigma(\tau) \cdot d\tau, \quad (1.8)$$

где

D_0 - упругая податливость (начальное значение податливости D_t);

$$D_0 = \frac{1}{E_0},$$

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

Интеграл в уравнении (1.8) показывает, что происходит сложение бесконечно малых деформационных вкладов.

Для процесса ползучести, когда напряжение σ приложено квазимгновенно в момент времени $\theta \cong 0$, из уравнения (1.8) получается формула

$$\varepsilon(t) = \sigma(t) \cdot D_0. \quad (1.9)$$

Таким же образом из (1.5) получается формула для релаксации напряжения при квазимгновенно приложенной деформации

$$\sigma(t) = \varepsilon(t) \cdot E_0. \quad (1.10)$$

Из экспериментов в режимах ползучести и релаксации легко выявляется независимость модуля релаксации и податливости от уровня механического воздействия.

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 [125].

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

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

Несмотря на указанные отклонения синтетических нитей от требований линейной вязкоупругости, уравнения (1.5) и (1.8) являются отправным пунктом при аналитическом описании уже нелинейной вязкоупругости синтетических нитей.

К аналитическому обобщению уравнений (1.5) и (1.8) на случай нелинейной вязкоупругости синтетической нити ближе следующая форма записи этих уравнений [126]

$$\sigma_t = E_0 \cdot \varepsilon_t + \int_0^t \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{\partial E_s}{\partial s} \cdot ds, \quad (1.11)$$

$$\varepsilon_t = D_0 \cdot \sigma_t + \int_0^t \sigma_{t-s} \cdot \frac{\partial D_s}{\partial s} \cdot ds, \quad (1.12)$$

где

$$s = t - \theta;$$

в интервале текущего времени $(-\infty, 0]$ механических воздействий на исследуемый материал не было.

Если релаксирующий модуль задается в виде:

$$E_t = E_0 - (E_0 - E_\infty) \cdot \varphi_t, \quad (1.13)$$

где

φ_t - нормированная релаксационная функция, изменяющаяся от нуля до единицы.

Учитывая сказанное, уравнение (1.11) можно записать в виде:

$$\sigma_t = E_0 \cdot \varepsilon_t - (E_0 - E_\infty) \cdot \int_0^t \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{\partial \varphi_s}{\partial s} \cdot ds \quad (1.14)$$

Тогда податливость - "запаздывающая упругость" - задается аналогичным образом:

$$D_t = D_0 + (D_\infty - D_0) \cdot \psi_t \quad (1.15)$$

где

ψ_t - нормированная функция запаздывания.

В этом случае уравнение (1.12) запишется в виде:

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E_0} \cdot \sigma_t + \left(\frac{1}{E_\infty} - \frac{1}{E_0} \right) \cdot \int_0^t \sigma_{t-s} \cdot \frac{\partial \psi_s}{\partial s} \cdot ds. \quad (1.16)$$

Производные нормированных функций релаксации и ползучести, содержащиеся в уравнениях (1.15) и (1.16), называются ядром релаксации и ядром запаздывания (ползучести) соответственно.

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

1.3. Нелинейные функциональные процессы арамидных текстильных материалов

В основном, полимерные материалы вида нитей, тканей, лент, трикотажных полотен, кожи, композитных материалов обладают нелинейными вязкоупругими свойствами [127-129].

На интенсивность протекания процессов запаздывания или релаксации помимо времени оказывают влияние также и уровни механического воздействия [130].

Теория вязкоупругости указанных материалов строится посредством обобщения уравнений линейной вязкоупругости (1.13) - (1.16) [131].

При таком обобщении используются 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 [132-134].

Состоявшееся построение уравнений нелинейной вязкоупругости опирается на современные представления об активирующем действии механической нагрузки и накопленный опыт экспериментальных исследований [135].

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 [136].

Деформационные свойства изучаемых в работе арамидных нитей и текстильных материалов на их основе рассматривались преимущественно с позиций нелинейно-наследственной теории вязкоупругости полимерных материалов, когда в ядра релаксации включена параметрическая зависимость от деформации, а в ядра запаздывания (ползучести) включена параметрическая зависимость от напряжения [137].

Для выявления наиболее вероятного микромеханизма релаксации и ползучести текстильных материалов необходимо проанализировать сложившиеся представления о надмолекулярной структуре высокоориентированных полимеров [138].

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 [139].

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 [140].

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 прогнозируемых, зависимость измеряемого модуля релаксации от скорости деформации, возможность учета релаксационных вкладов при высоких скоростях деформирования - все эти особенности деформационного поведения ориентированных аморфно-кристаллических полимеров, по крайней мере, не противоречат специфической роли тяжей [141].

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 [142], 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.

Можно провести оценку размеров элементарных "носителей" релаксационных процессов [143] и показать, что величина больших периодов в высокоориентированных образцах гибкоцепных аморфно-кристаллических полимеров обычно колеблется в пределах 10-20 нм, сравнительно редко достигая 30-50 нм при достаточно высоких температурах обработки.

Элементарным носителем релаксационных процессов [144] является сегмент макромолекулы длиной 5 - 8 нм, 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 времен релаксации и времен запаздывания.

1.4. Выводы по главе 1

Математическое моделирование функциональных процессов арамидных текстильных материалов 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 одноосноориентированного состояния аморфно-кристаллического полимера, а также фактор снижения набора конформационных перегруппировок по мере деформирования полимерного текстильного материала.

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.

Предполагаемые объяснения этих отклонений в рамках вязкоупругих свойств полимерных текстильных материалов способствовали решению задачи об уточнении расчета деформационно-восстановительных процессов и других сложных режимов деформирования.

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 полимерных текстильных материалов, описанные известные способы прогнозирования их эксплуатационных процессов показывают актуальность задачи, решение которой, применительно к арамидным текстильным материалам на их основе, предлагается в данной работе.

Исследования в области цифрового прогнозирования функциональных свойств арамидных текстильных материалов были продолжены с участием соискателя в работах [145-169].

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА АРАМИДНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В главе приводятся технические характеристики исследуемых арамидных текстильных материалов.

Приводятся исследования арамидных текстильных материалов в режимах растяжения при различных температурах.

Исследуется влияние температуры на прочностные и деформационные свойства арамидных текстильных материалов.

Исследуемые арамидные текстильные материалы представляют собой сверхвысокомодульные ориентированные полимеры.

Компонентный состав арамидных текстильных материалов во многом определяет и их эксплуатационные свойства.

Арамидные текстильные материалы являются неплавкими и имеют высокую температуру разрушения, варьируемую в диапазоне от 450°C до 600°C, что, в свою очередь, определяет одно из направлений их применимости.

Арамидные текстильные материалы применяются там, где преобладают огнезащитные свойства.

Другой важнейшей характеристикой арамидных текстильных материалов является их повышенная деформационная жесткость.

Это свойство арамидных текстильных материалов используется, например, при проектировании бронежилетов.

2.1. Технические характеристики изучаемых арамидных текстильных материалов

Объектами исследования являются следующие разновидности арамидных текстильных материалов:

- арамидные текстильные нити;
- арамидные бронезащитные ткани;
- арамидные огнезащитные ткани;
- арамидные шнуры.

Технические характеристики изучаемых арамидных текстильных нитей приведены в табл.2.1.

Таблица 2.1 - Технические характеристики арамидных текстильных нитей

Материал	Линейная плотность, Текс	Разрывная нагрузка, Н	Удлине- ние при разрыве, %	Разрывное напряже- ние, ГПа	Модуль упругости, ГПа
Терлон	58,5	87	2,7	2,1	98
Русар	58,8	134	3,1	3,3	115
СВМ	29,5	65	2,6	3,2	105
Арселон	79,1	137	4,0	2,7	81
Армос	67,3	129	2,2	2,2	92

Технические характеристики арамидных бронезащитных тканей, изготовленных из арамидных нитей СВМ, приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2 - Технические характеристики арамидных бронезащитных тканей

Название	Ширина, см	Поверхн. плотность, г/м ²	Разрывная нагрузка, кН		Удлинение при разрыве, %		Состав
			основа	уток	основа	уток	
ТБ-130	105	130	2,6	2,6	2,0	2,0	СВМ
ТБ-190	105	190	2,8	2,8	2,0	2,0	СВМ
ТБ-220	100	220	2,9	2,9	2,1	2,1	СВМ

Технические характеристики арамидных огнезащитных тканей приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3 - Технические характеристики огнезащитных тканей

Название	Ширина, см	Поверхн. плотность, г/м ²	Разрывная нагрузка, кН		Удлинение при разрыве, %		Состав
			основа	уток	основа	уток	
ТО-265	96	265,0	3,1	2,5	20,0	20,0	терлон
ТО-240	96	240,0	2,5	1,7	7,0	4,0	арселон
ТО-125	104	125,0	1,0	0,8	4,0	4,0	армос

Технические характеристики арамидных шнуров приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4 - Технические характеристики арамидных шнуров

Название	Диаметр, мм	Линейная плотность, кТекс	Разрывная нагрузка, кН	Удлинение при разрыве, %	Состав
ШТ-4	5	34,2	15,1	4,0	терон
ШР-3	3	19,6	5,8	3,9	русар
ШС-6	6	41,3	21,4	4,1	СВМ

2.2. Исследование арамидных текстильных материалов в режимах растяжения

Экспериментальное исследование процессов растяжения арамидных текстильных материалов наиболее широко применяется при исследовании их эксплуатационных свойств.

Исследования на растяжение арамидных текстильных материалов проводились на универсальной измерительной установке "Instron 1122" со скоростью деформирования $\dot{\varepsilon} = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ при температурных значениях $T = 20, 100, 150, 200, 250, 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Экспериментальный процесс растяжения арамидных текстильных материалов соответствует закону деформирования с постоянной скоростью деформации $\dot{\varepsilon}$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_0 + \dot{\varepsilon} \cdot t, \quad (2.1)$$

где:

ε_t - деформация в момент времени t ,

ε_0 - начальная деформация (обычно она полагается равной нулю).

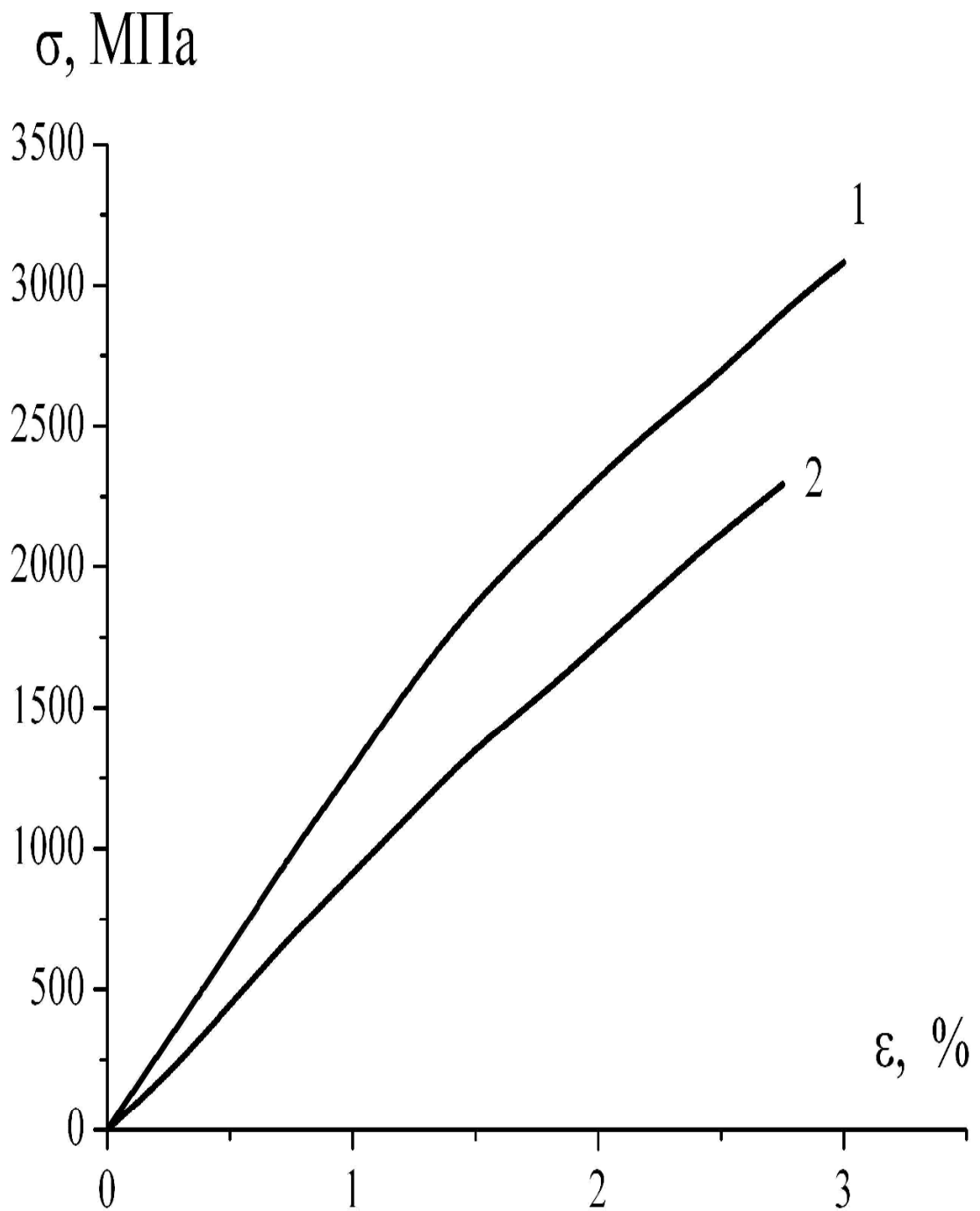


Рисунок 2.1 - Диаграмма растяжения нити русар (1) и нити терлон (2),
 $\dot{\epsilon} = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$, $T = 20^\circ \text{C}$

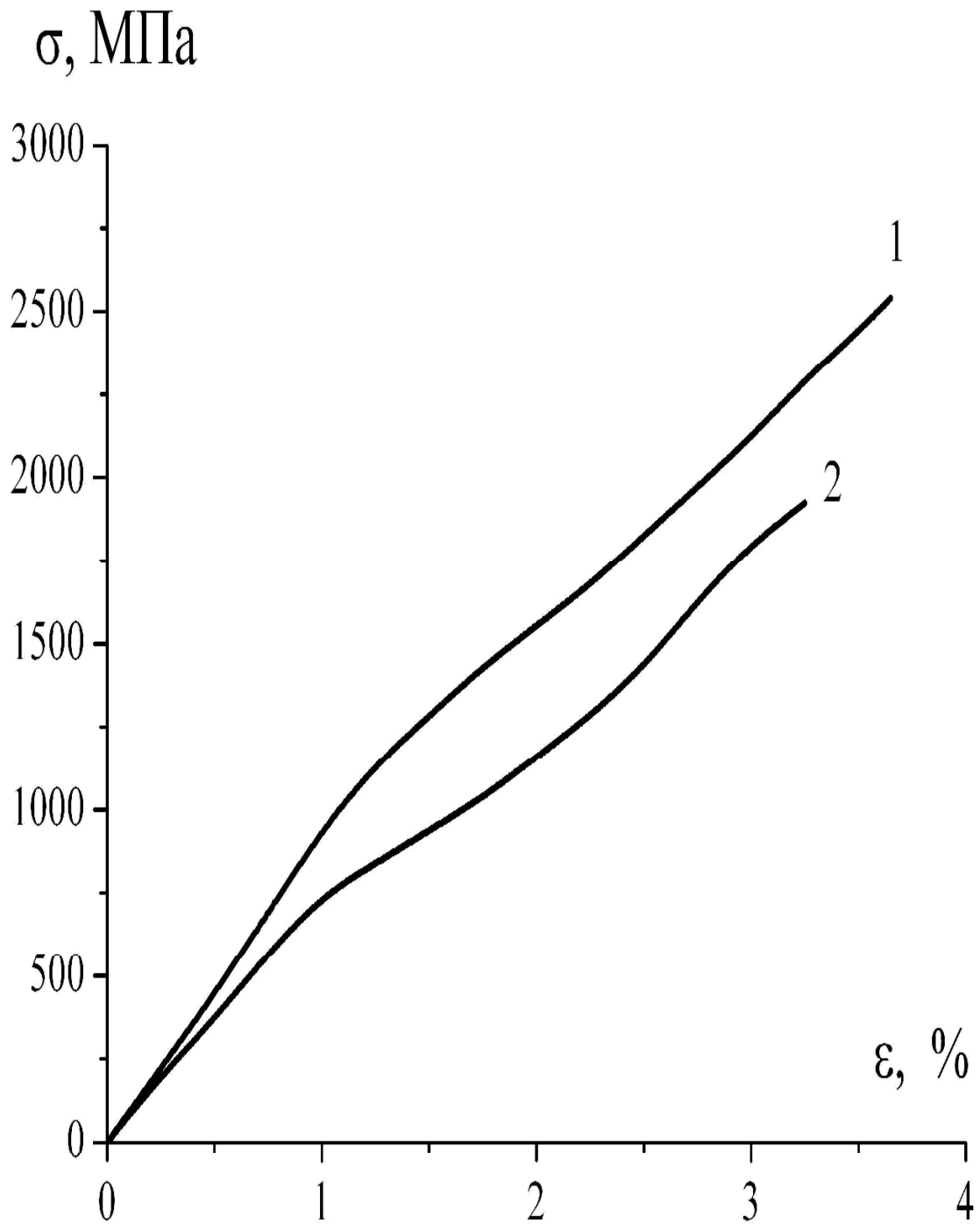


Рисунок 2.2 - Диаграмма растяжения нити арселон (1) и нити армос (2),
 $\dot{\epsilon} = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, $T = 20^\circ \text{C}$

Заметим, что процесс растяжения арамидных текстильных материалов является частным случаем режима нелинейно-наследственной релаксации.

Экспериментальные диаграммы растяжения арамидных нитей, полученные на приборе "Instron - 1122" со скоростью деформирования $\dot{\varepsilon} = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ приведены на рис.2.1. - рис.2.3.

Как видно, на приведенных диаграммах растяжения арамидных нитей, всех их объединяет достаточно большие значения разрывного напряжения (2,1 - 3,3 ГПа) и достаточно малые значения деформации при разрыве (2,2 - 4,0 %).

Это качество всех арамидных нитей обусловлено большой деформационной жесткостью.

Значения модуля упругости лежит в пределах 81 - 122 ГПа.

2.3. Исследование влияния температуры на прочностные свойства арамидных текстильных материалов

При нагревании у арамидных материалов снижаются значения разрывных напряжений и разрывных деформаций, что отчетливо видно на примере диаграмм растяжения арамидной текстильной нити СВМ при разных температурных значениях $T = 20, 100, 150, 200, 250, 300 \text{ } ^\circ\text{C}$ (рис.2.3).

Графики зависимостей разрывных напряжений и модулей упругости от температуры для арамидных текстильных нитей приведены на рис. 2.4-рис. 2.8.

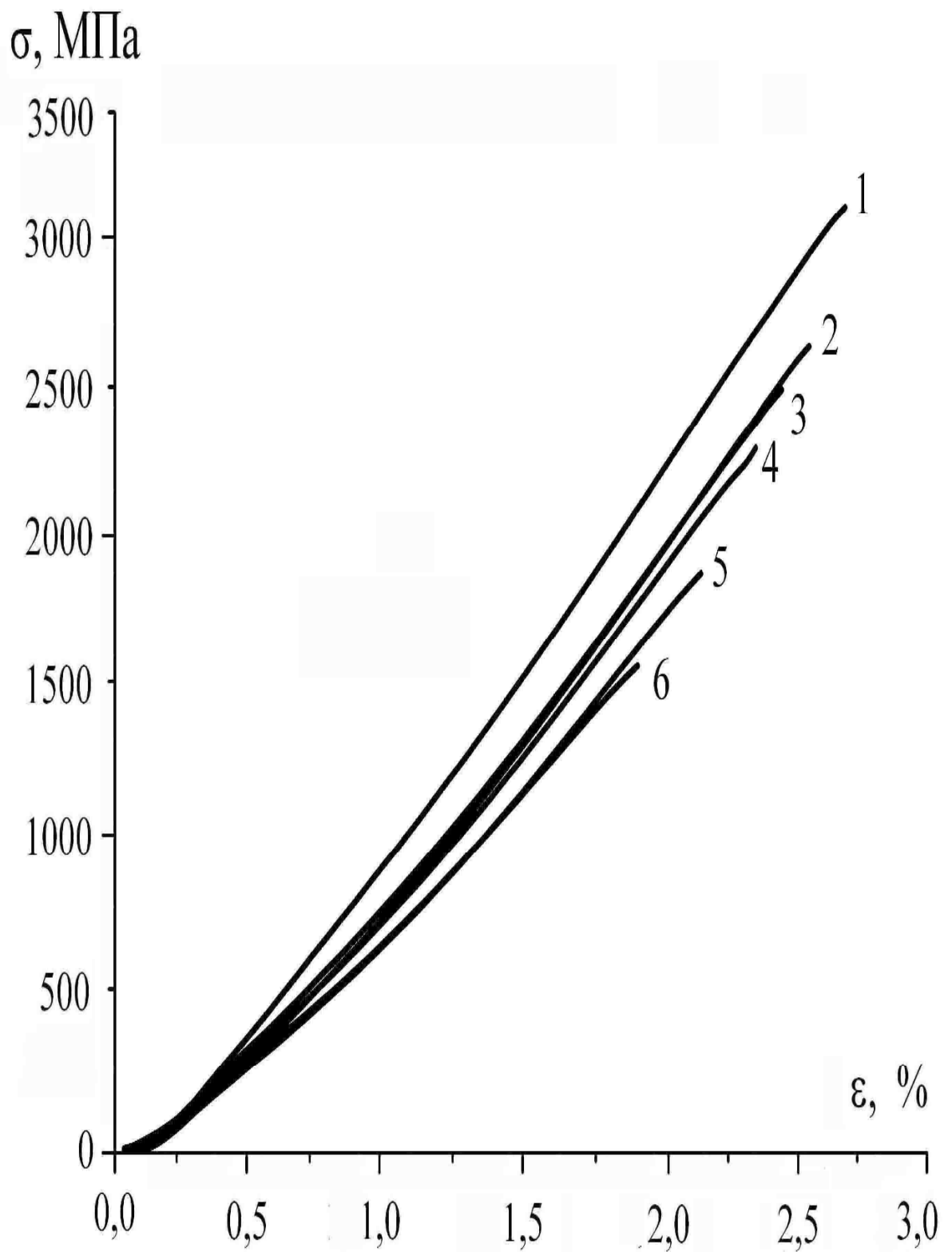


Рисунок 2.3 - Диаграмма растяжения нити СВМ, $\dot{\epsilon} = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$,
 $T = 20 (1), 100 (2), 150 (3), 200 (4), 250 (5), 300 (6) ^\circ\text{C}$

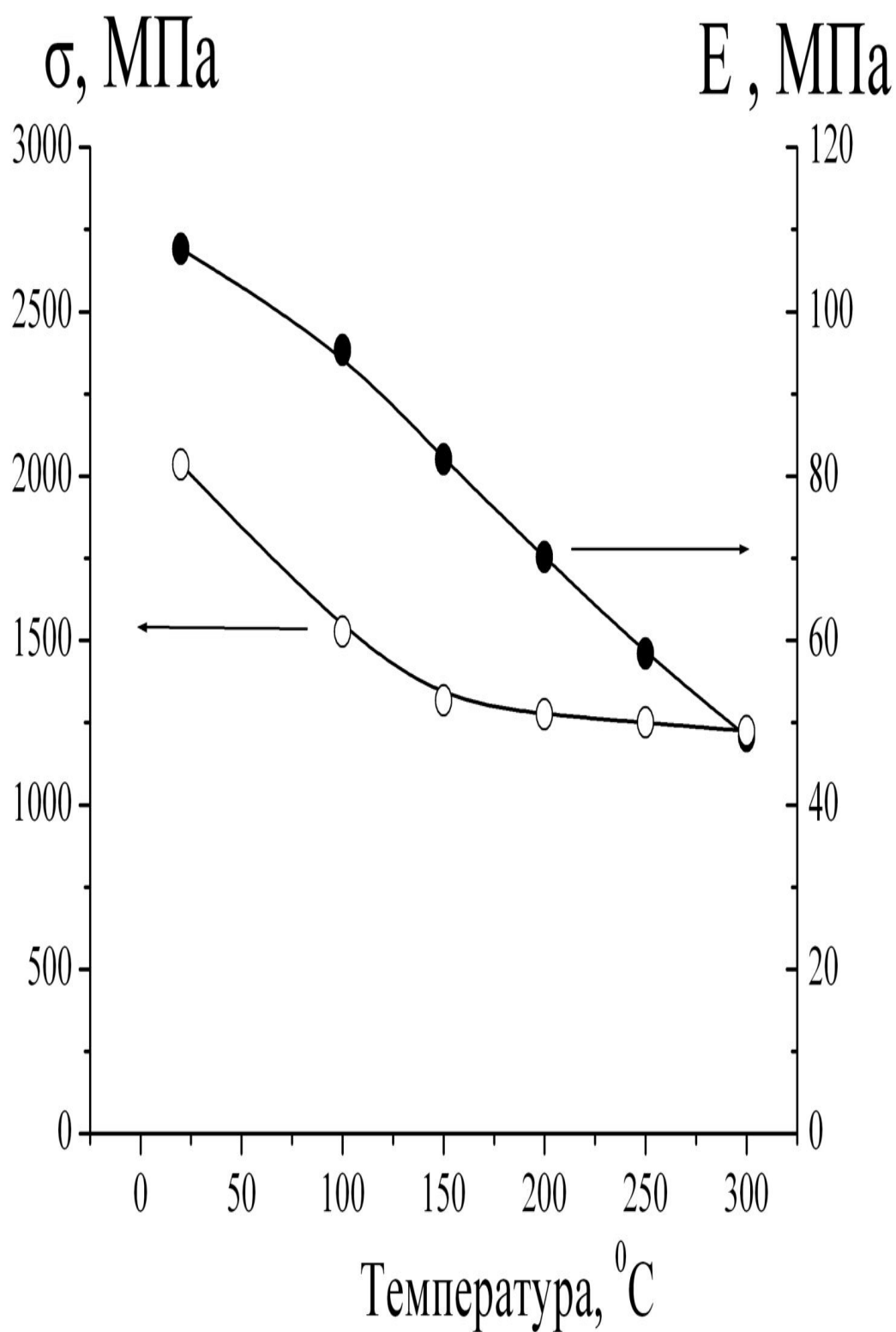


Рисунок 2.4 - Зависимость прочности (левая шкала) и модуля упругости (правая шкала) нити арселон от температуры

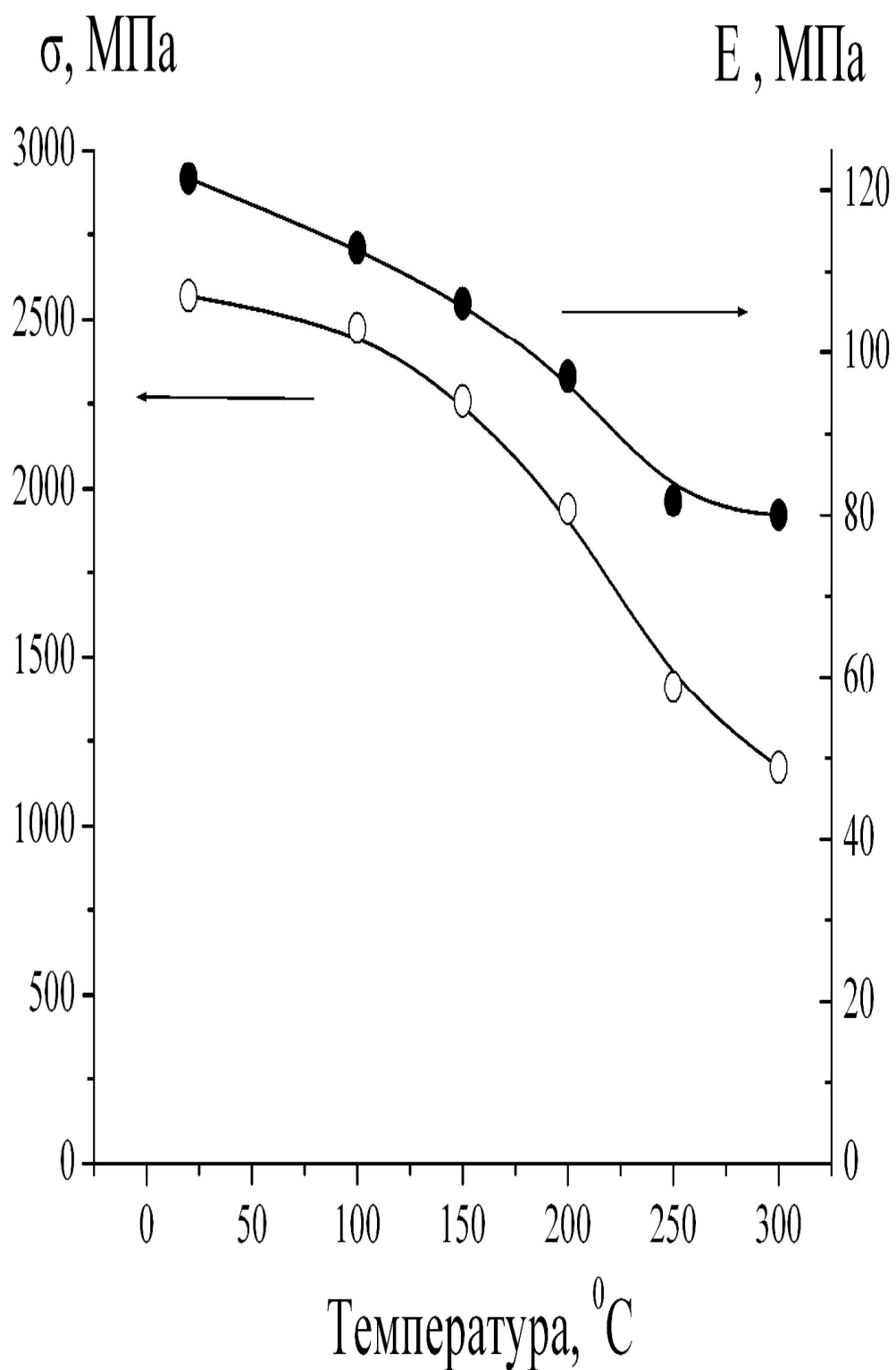


Рисунок 2.5 - Зависимость прочности (левая шкала) и модуля упругости (правая шкала) нити СВМ от температуры

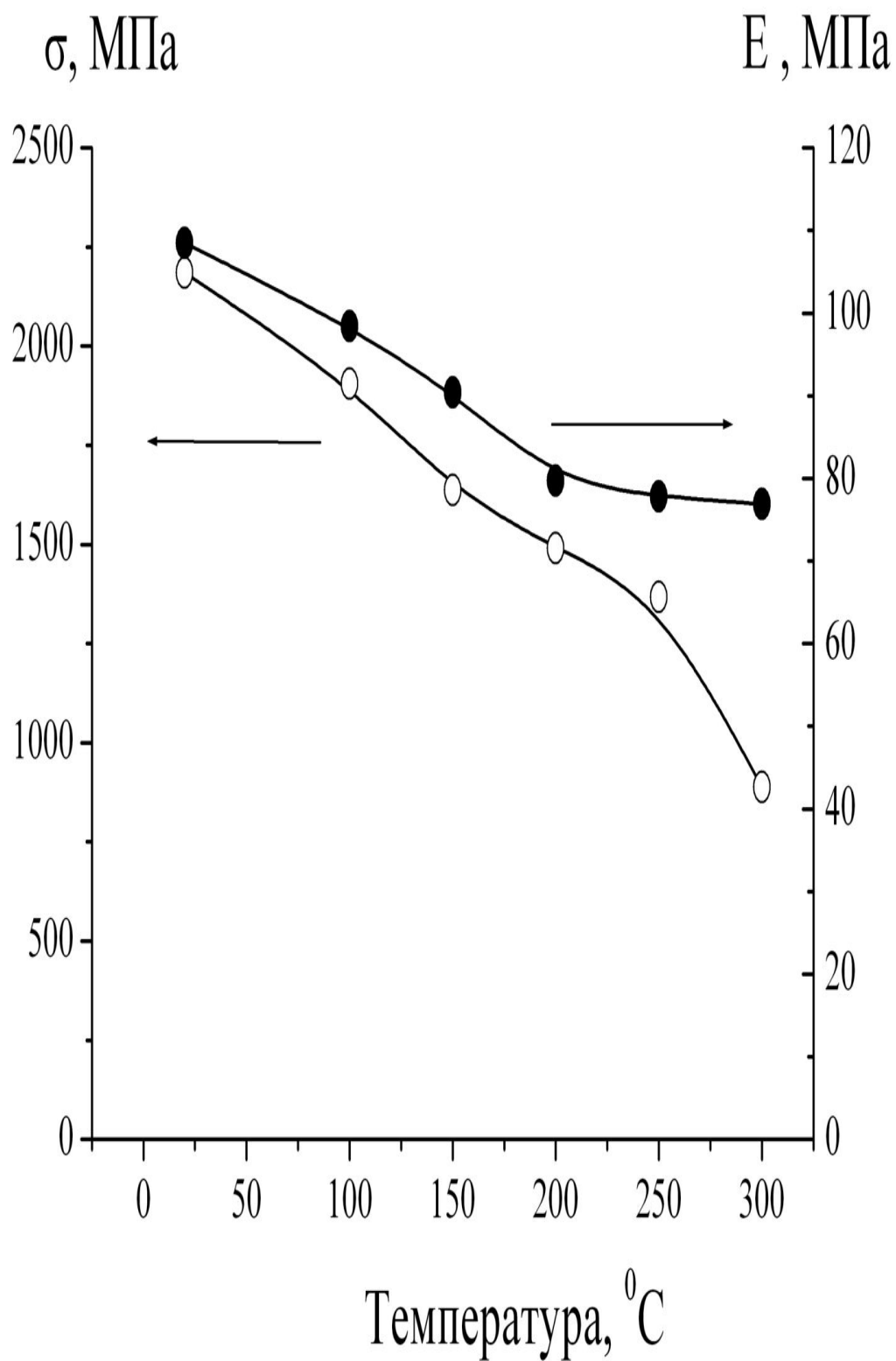


Рисунок 2.6 - Зависимость прочности (левая шкала) и модуля упругости (правая шкала) нити армос от температуры

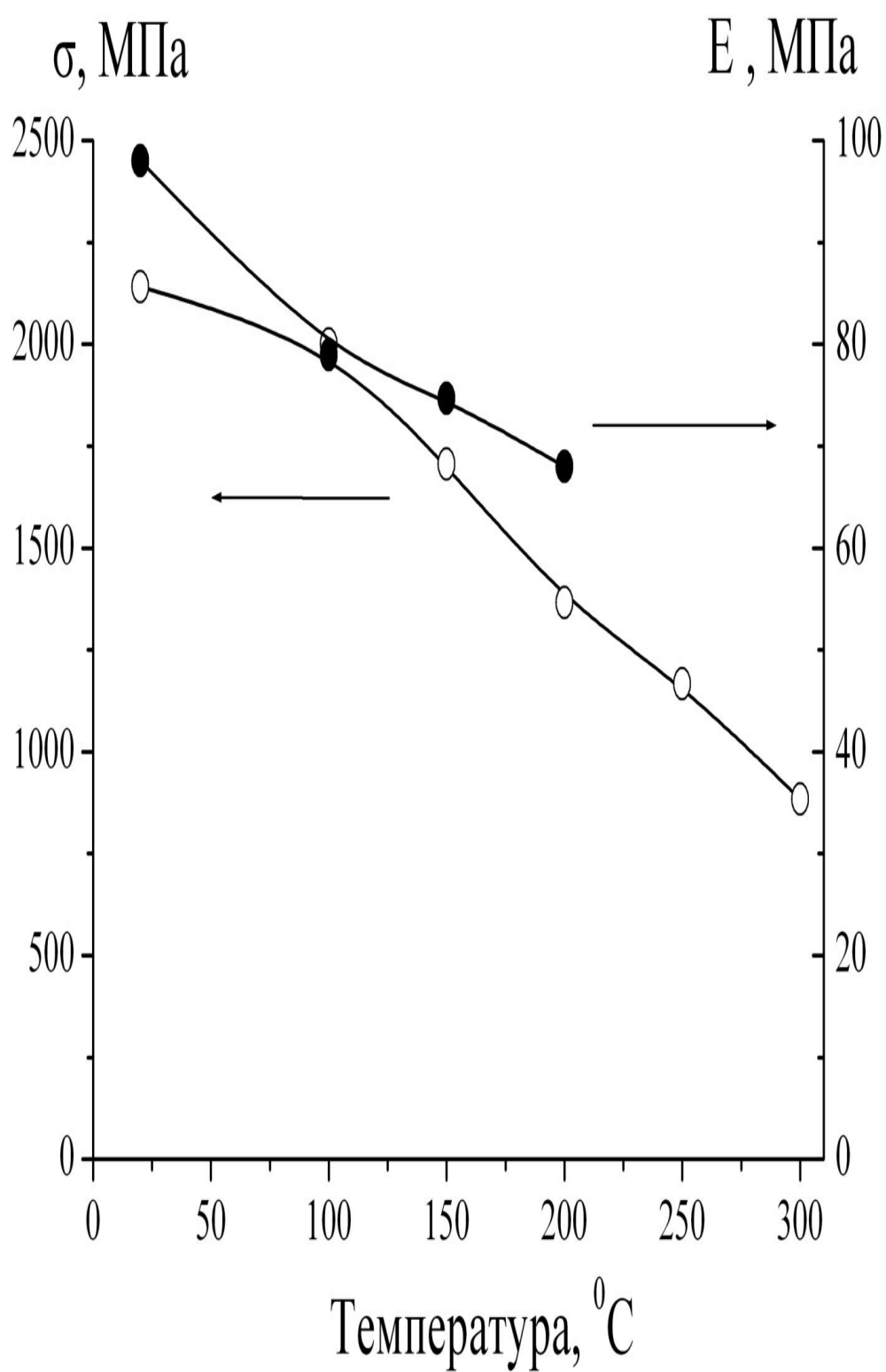


Рисунок 2.7 - Зависимость прочности (левая шкала) и модуля упругости (правая шкала) нити терлон от температуры

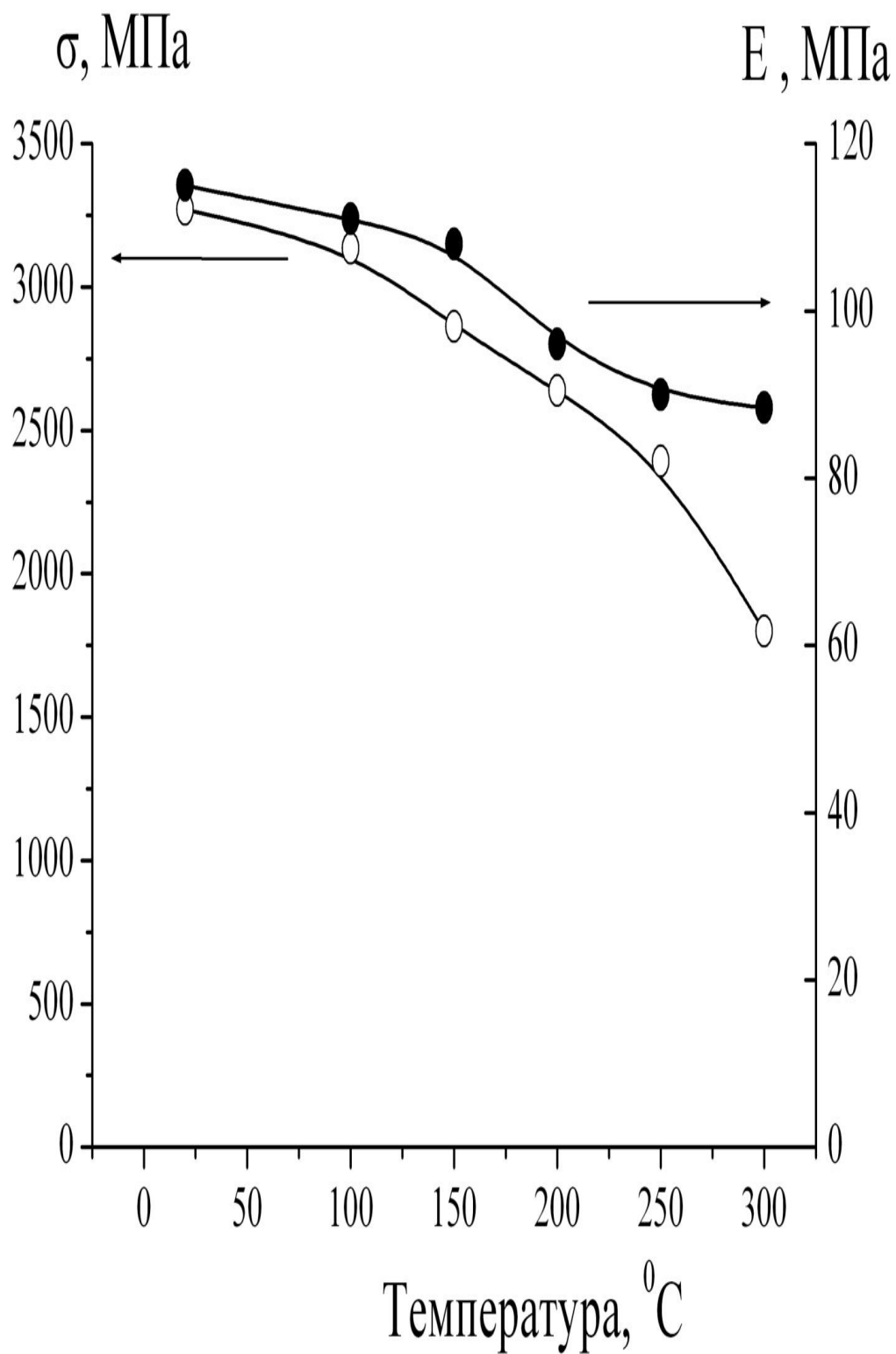


Рисунок 2.8 - Зависимость прочности (левая шкала) и модуля упругости (правая шкала) нити русар от температуры

По экспериментально полученным диаграммам растяжения арамидных текстильных материалов могут быть определены не только такие деформационные характеристики, как разрывное напряжение (прочность) и разрывная деформация, но и модуль упругости (деформационная жесткость).

Для определения модуля упругости достаточно найти тангенс угла наклона касательной к диаграмме растяжения в начальной области деформирования, в которой материал демонстрирует преимущественно упругие свойства:

$$E_0 \approx \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)}. \quad (2.2)$$

Применение экспериментальных диаграмм растяжения текстильных материалов является удобным средством качественного анализа деформационных свойств материалов.

Однако их использование в научных исследованиях весьма ограничено в силу, как большой погрешности получаемых качественных оценок деформационных характеристик, так и невозможностью нахождения некоторых вязкоупругих параметров, например, времен релаксации и запаздывания, являющихся основополагающими при прогнозировании деформационных процессов.

2.4. Исследование влияния температуры на усадку и восстановление арамидных текстильных материалов

Арамидные текстильные материалы обладают таким свойством, как усадка с ростом температуры и последующим восстановлением при остывании.

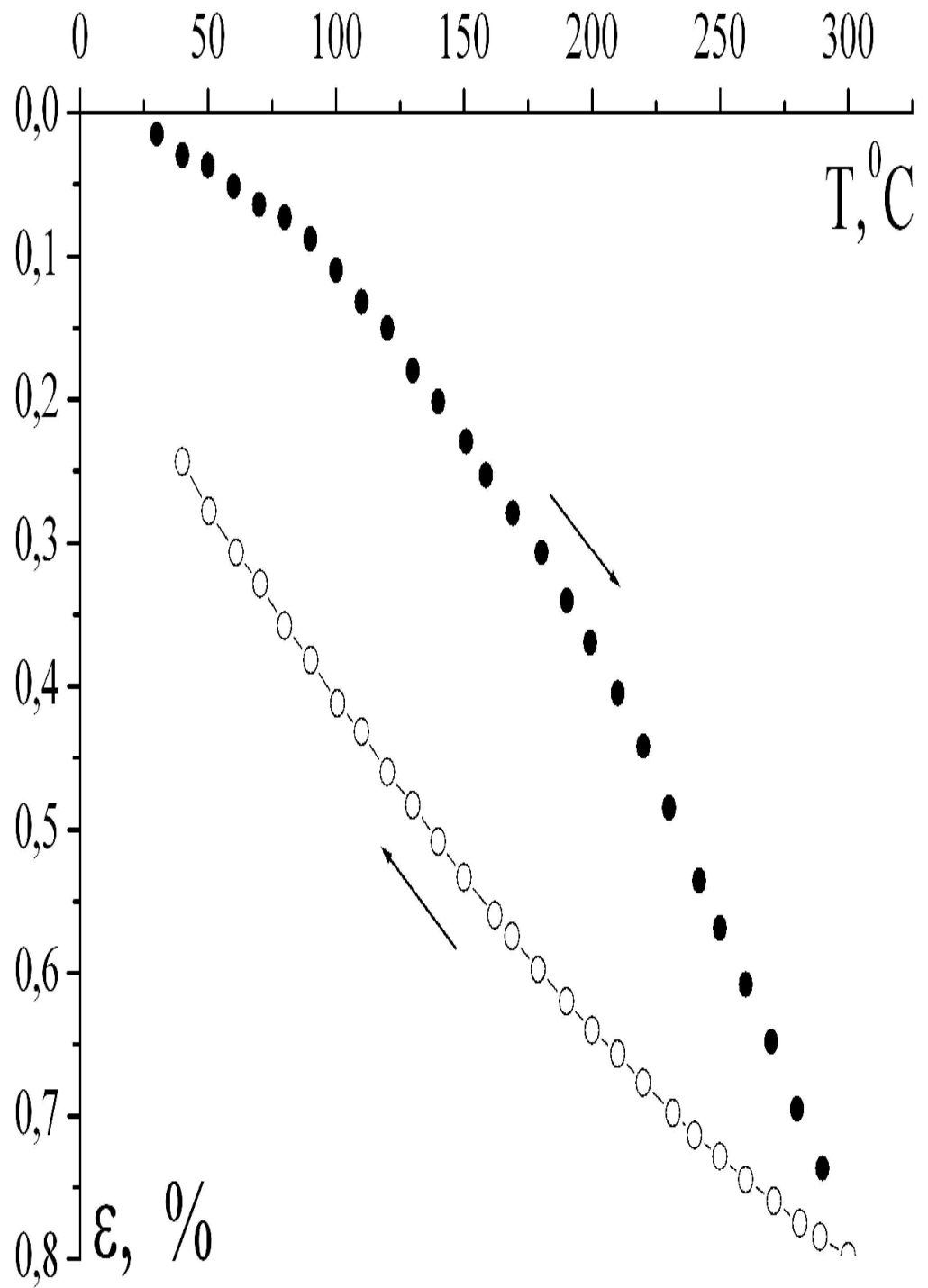


Рисунок 2.9 - Экспериментальные кривые усадки и последующего восстановления арамидной нити СВМ

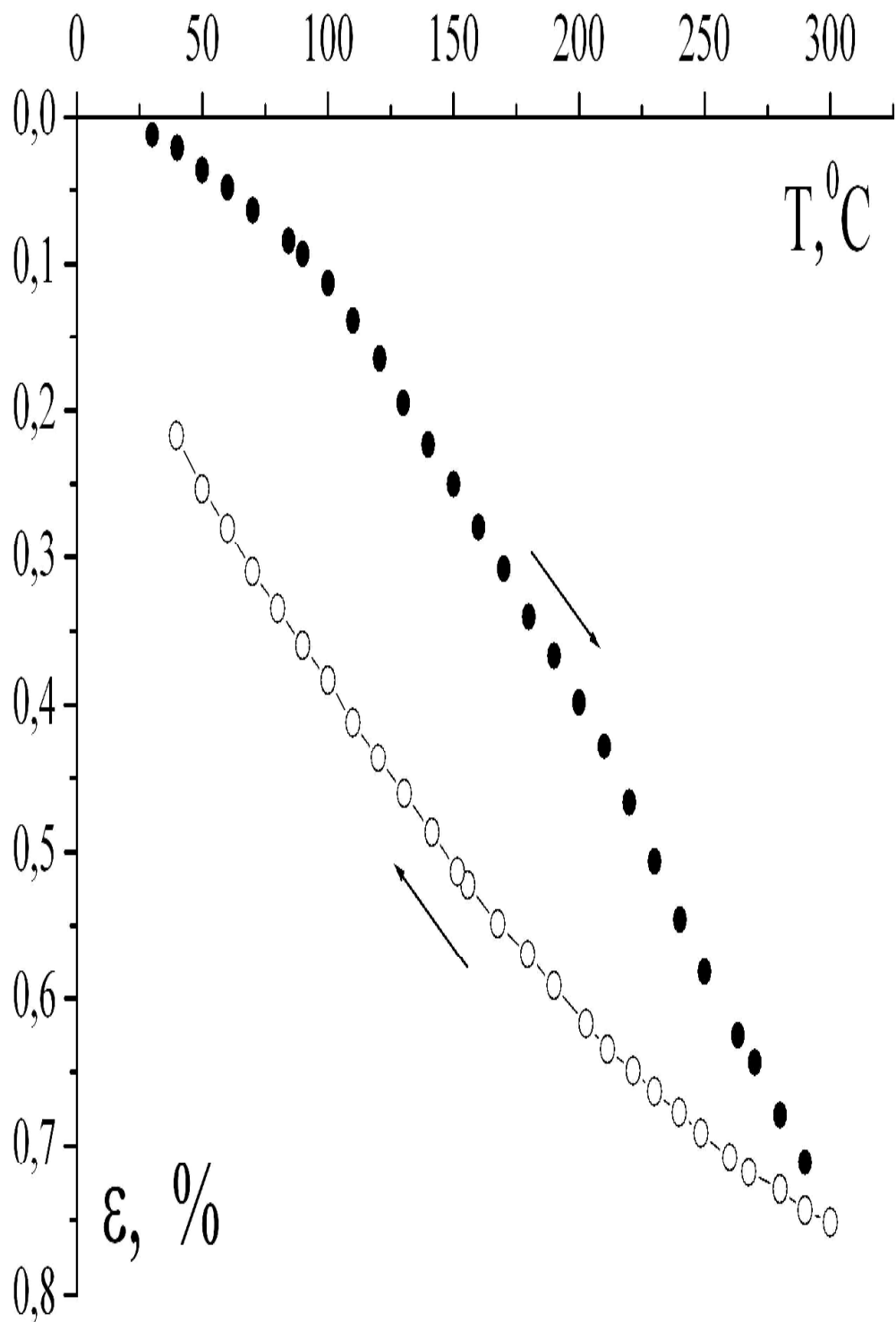


Рисунок 2.10 - Экспериментальные кривые усадки и последующего восстановления нити арамидной русар

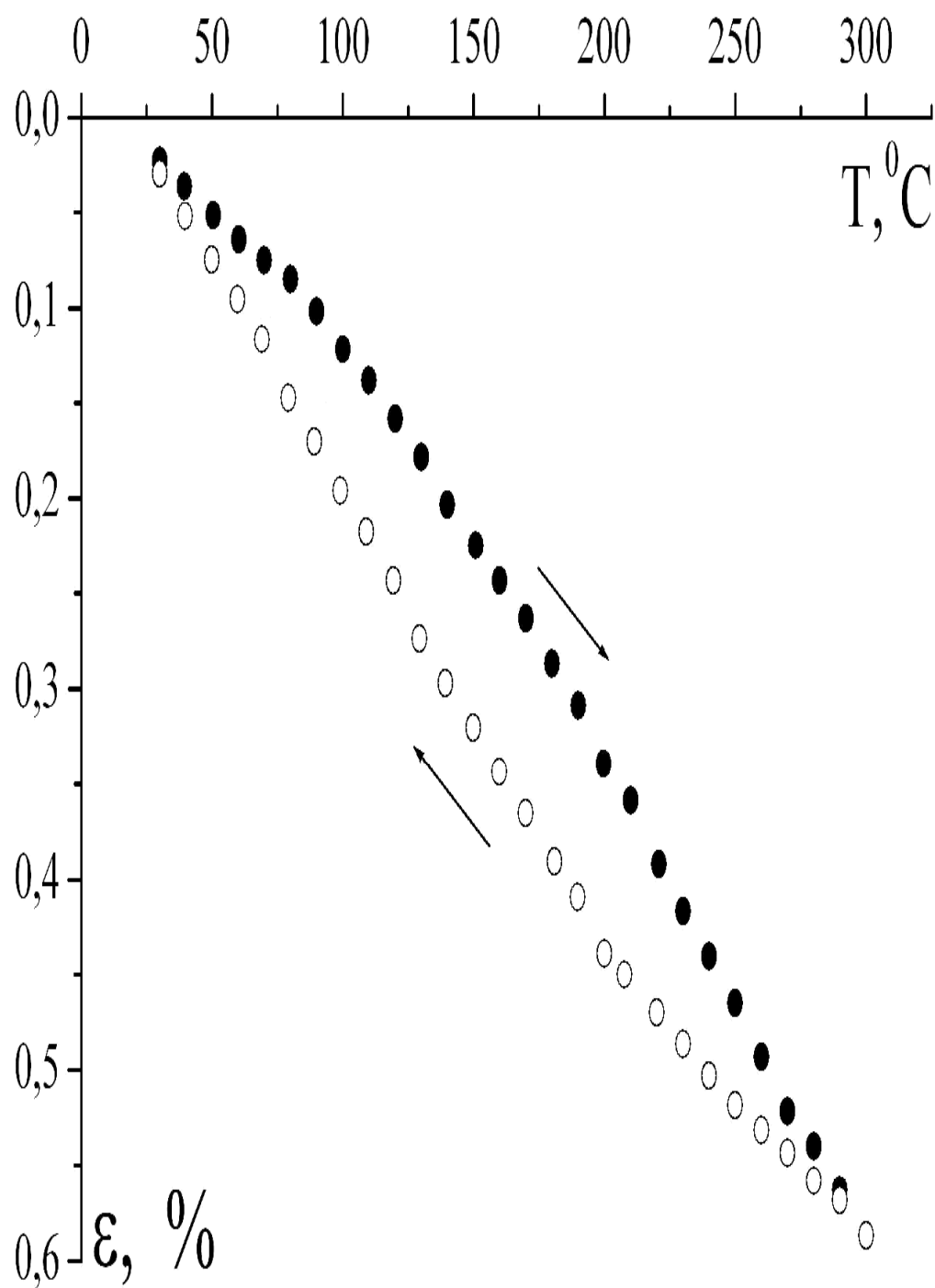


Рисунок 2.11 - Экспериментальные кривые усадки и последующего восстановления арамидной нити терлон

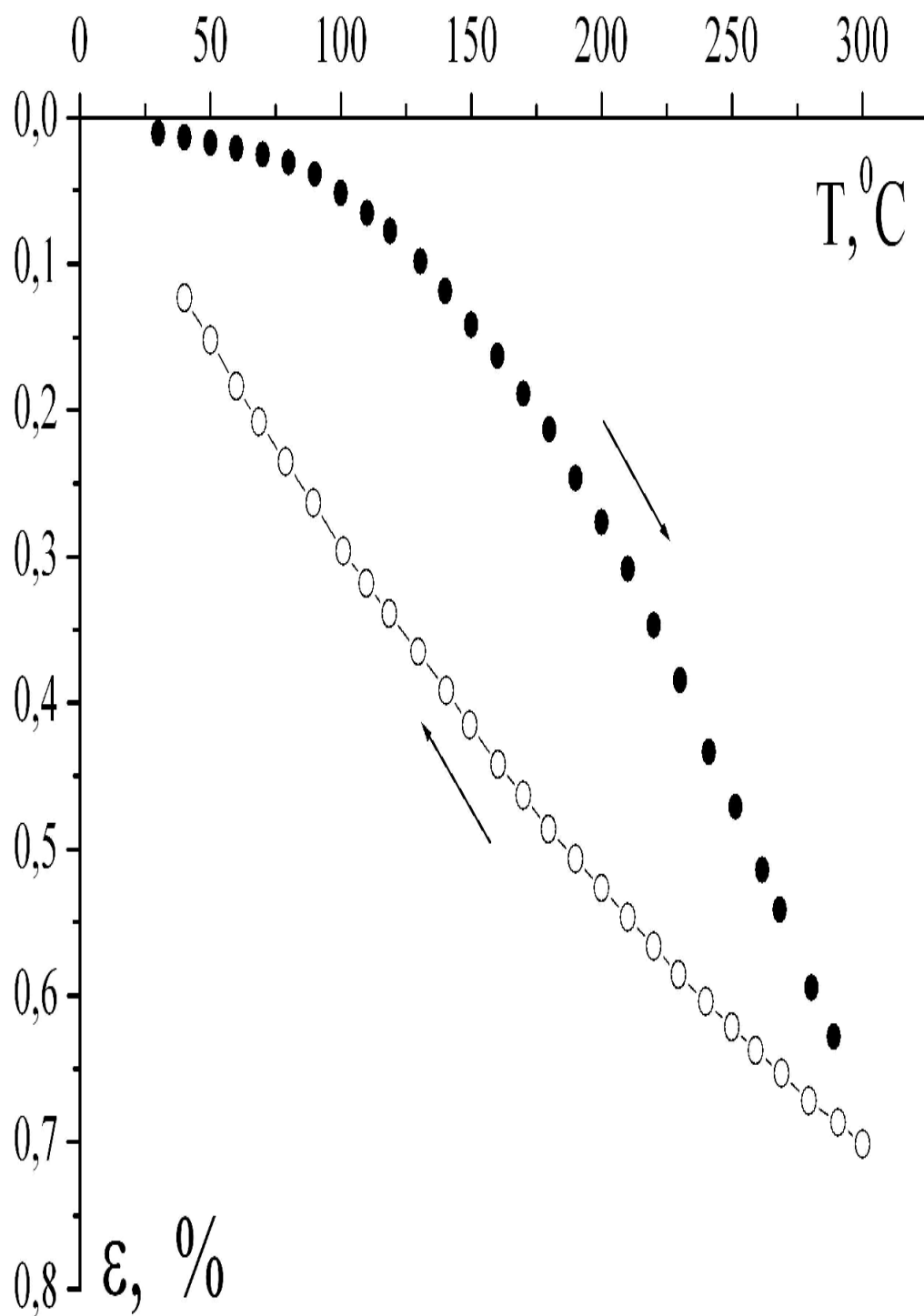


Рисунок 2.12 - Экспериментальные кривые усадки и последующего восстановления нити арселон

Если, например, металлы расширяются при нагревании, то арамидные материалы ведут себя противоположным образом - они усаживаются.

Физическая суть этого интересного явления заключается в том, что в нормальных условиях (при комнатной температуре) макромолекулы арамидных нитей находятся в транс-конформации, то есть геометрически представляют собой более или менее распрямленные отрезки.

С увеличением температуры эти макромолекулы постепенно меняют свою геометрическую структуру, переходя к цис-конформации, которая представляет собой уже не прямые отрезки, а волнообразную структуру.

Явление усадки, как показали эксперименты (рис.2.9 - рис.2.12) является обратимым, то есть при остывании материала его макромолекулы снова стремятся полностью или частично перейти к транс-конформации.

Как видно из рис.2.9 - рис.2.12, полной обратимостью усадки из представленных материалов обладает только нить терлон, остальные же арамидные нити восстанавливаются не полностью.

Таким образом, проведенные температурно-деформационные исследования, позволяют определить степень усадки и степень восстановления после нее арамидных текстильных материалов.

2.5. Выводы по главе 2

Таким образом, в главе были приведены исследования процессов растяжения арамидных нитей различного компонентного состава в широком температурном диапазоне – от 20⁰С до 300⁰С.

Кроме этого было исследовано влияние температуры на прочностные свойства арамидных текстильных материалов.

Исследованы также такие функциональные процессы, как усадка арамидных текстильных материалов с ростом температуры и их восстановление при остывании.

Проведенные исследования имеют важное значение для определения функциональных свойств изучаемых арамидных текстильных материалов и для получения информации о функциональности указанных материалов.

3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ АРАМИДНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В главе рассмотрено математическое моделирование основных функциональных процессов арамидных текстильных материалов – релаксационных процессов, процессов ползучести и процессов восстановления.

3.1. Экспериментальные исследования релаксационных процессов арамидных текстильных материалов

Экспериментальные исследования процессов релаксации арамидных текстильных материалов проводились на приборе - релаксометре напряжений.

После закрепления образца арамидного 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 .

По результатам проведенного эксперимента строились графики зависимости величины напряжения σ_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 деформации ε , образуют в совокупности "семейства" кривых релаксации напряжений.

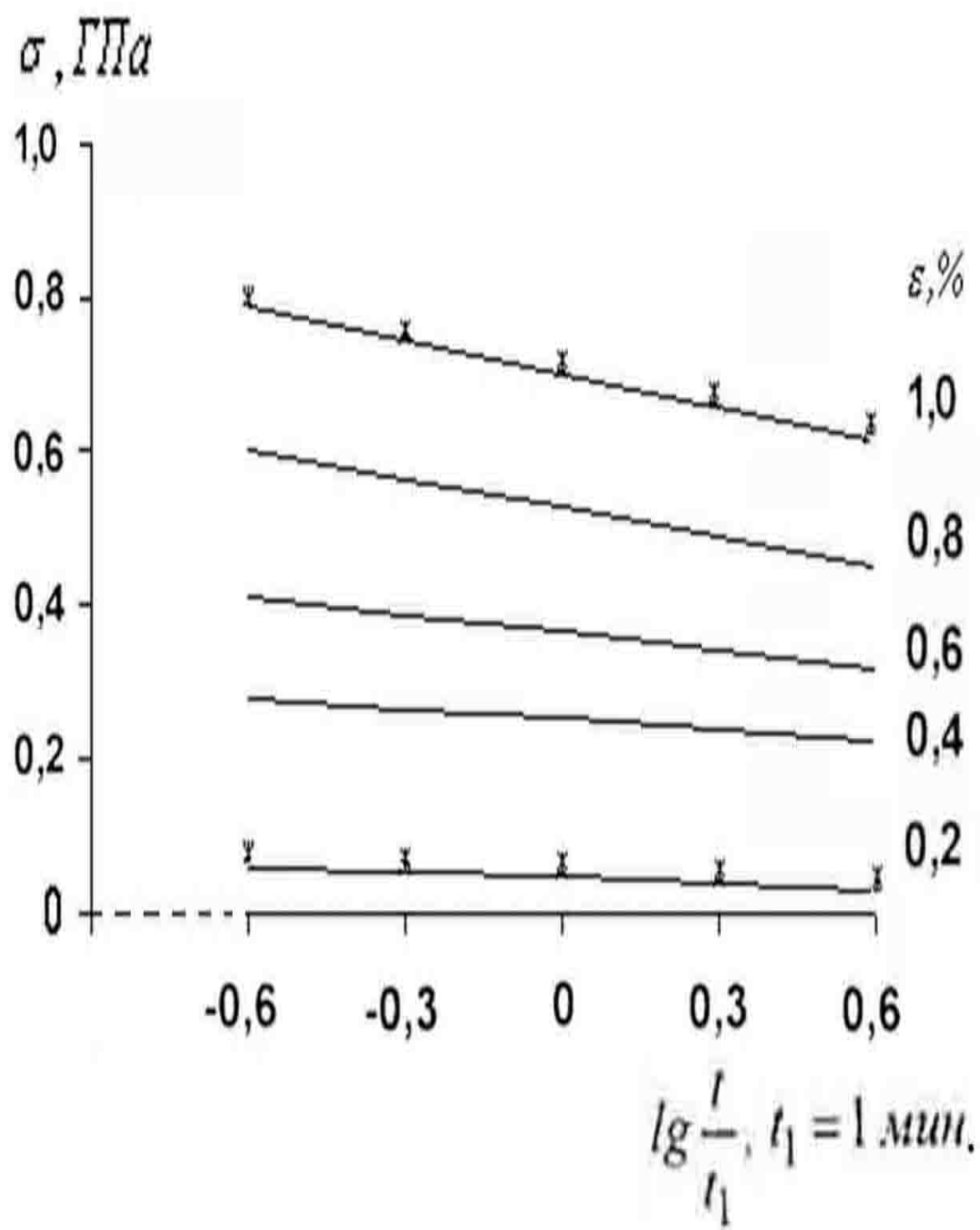


Рисунок 3.1 - "Семейство" кривых релаксации напряжений нити СВМ при температуре 20°C (сплошные линии - эксперимент, звездочки - расчет)

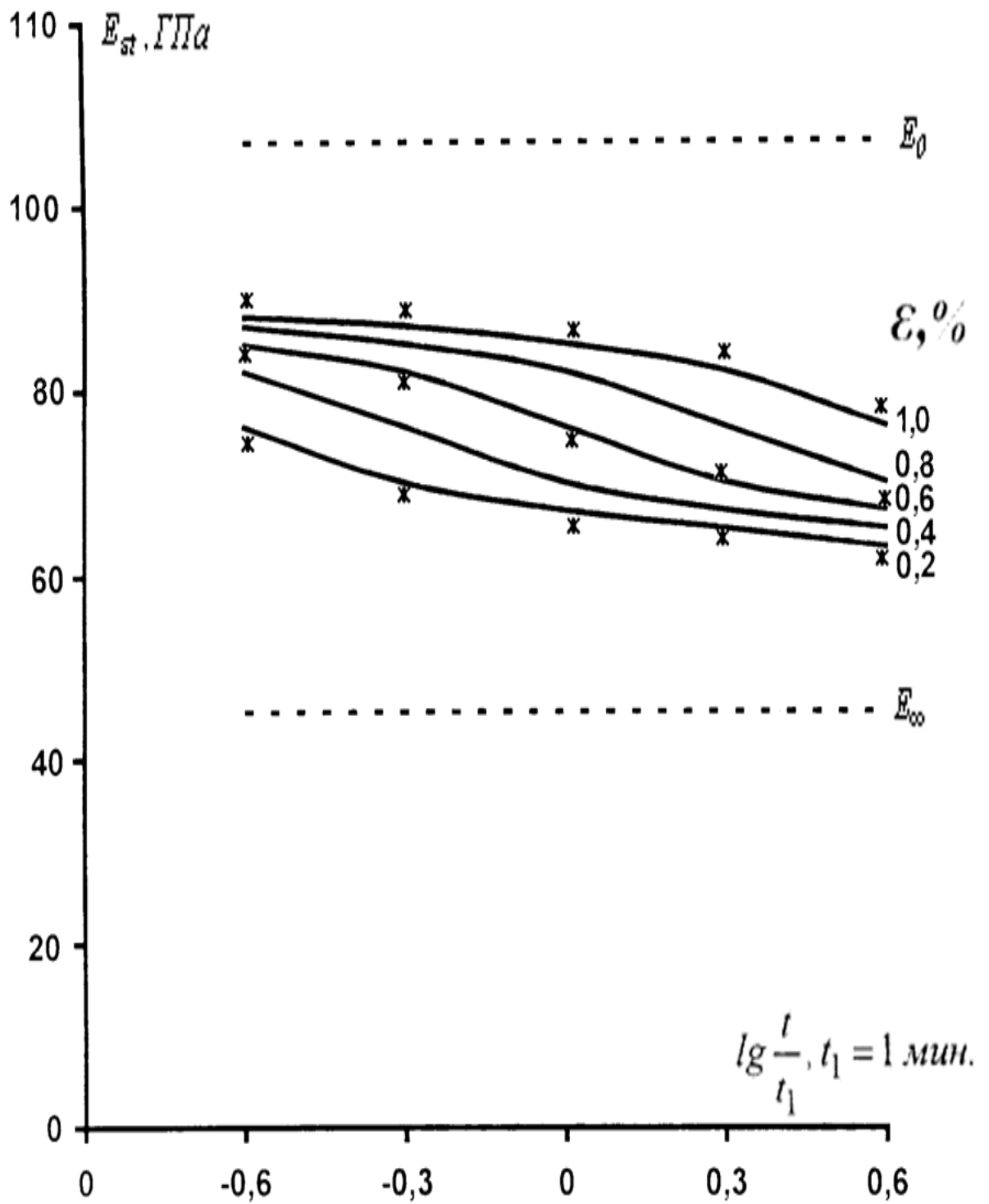


Рисунок 3.2 - "Семейство" кривых модуля релаксации нити СВМ при температуре 20 °С (сплошные линии - эксперимент, звездочки - расчет)

Пример экспериментального "семейства" кривых релаксации арамидной текстильной нити СВМ приведен на рис. 3.1.

Экспериментальные "семейства" кривых релаксации, в последующем, после деления на соответствующие значения деформаций ε перестраивались в "семейства" кривых модуля релаксации $E_{\varepsilon t}$ по формуле:

$$E_{\varepsilon t} = \frac{\sigma_t}{\varepsilon} \quad (3.1)$$

Пример экспериментального "семейства" кривых модуля релаксации арамидной текстильной нити СВМ приведен на рис. 3.2.

3.2. Математическое моделирование релаксационных процессов арамидных текстильных материалов

Математическое моделирование релаксационных процессов арамидных текстильных материалов, изучаемых в работе, проводилось на основе аппроксимации "семейства" кривых модуля релаксации нормированной функции арктангенс логарифма приведенного времени (НАЛ), которая положительно себя зарекомендовала при моделировании релаксации текстильных материалов сложной макроструктуры:

$$\varphi_{\varepsilon t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \ln \frac{t}{\tau_{\varepsilon}} \right). \quad (3.2)$$

Обоснованность выбора функции НАЛ заключается в том, что она характеризует вероятностное распределение Коши, обладающее тем важным свойством, что распределение суммы случайных величин, подчиняющихся закону Коши, также подчинено этому закону.

Текстильные же объекты сложной макроструктуры типа тканей и шнуров можно считать условно состоящими из "суммы" объектов простой макроструктуры - нитей, моделирования релаксации которых проводится также на основе функции НАЛ.

С учетом сказанного, математическая модель для модуля релаксации имеет вид:

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

где

t - время,

$1/b_{n\varepsilon}$ - параметр интенсивности процесса релаксации,

τ_{ε} - время релаксации (время, за которое "отрелаксирует" половина всех "релаксирующих" частиц при величине деформации ε),

$E_{\varepsilon t} = \sigma/\varepsilon$ - модуль релаксации,

E_0 - модуль упругости,

E_{∞} - модуль вязкоупругости.

Правильность выбора математической модели релаксационного процесса арамидных текстильных материалов с релаксационной функцией в виде функции НАЛ подтверждает близость расчетных значений напряжений и модуля релаксации к соответствующим экспериментальным кривым.

Расчетные значения напряжений (рис.3.1) и модуля релаксации (рис.3.2) арамидных текстильных материалов, вычисленные по математической модели (3.2), (3.3) нанесены на соответствующие экспериментальные графики.

3.3. Экспериментальные исследования процессов ползучести и восстановительных процессов арамидных текстильных материалов

Следует заметить, что процессы ползучести и восстановительные процессы арамидных текстильных материалов являются частными случаями деформационных процессов указанных материалов.

Поэтому, все ниже сказанное о процессах ползучести арамидных текстильных материалов справедливо и для восстановительных процессов этих материалов.

Экспериментальные исследования процессов ползучести арамидных текстильных материалов проводились на релаксометре деформаций.

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

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

По результатам проведенного 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 арамидных текстильных материалов, образуют в совокупности "семейства" кривых ползучести.

Пример экспериментального "семейства" кривых ползучести арамидной текстильной нити СВМ приведен на рис. 3.3.

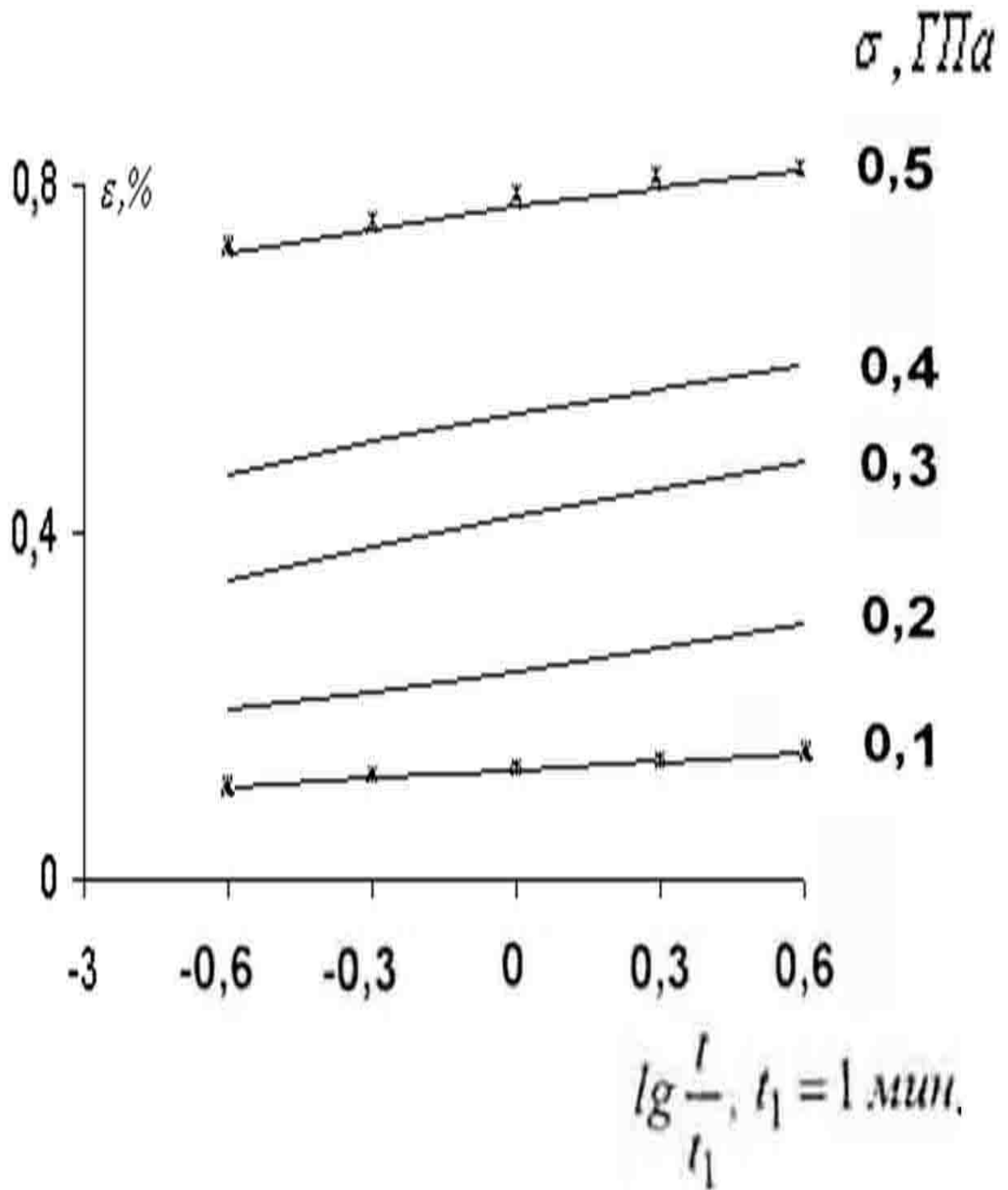


Рисунок 3.3 - "Семейство" кривых ползучести арамидной текстильной нити СВМ при температуре 20 °С (сплошные линии - эксперимент, звездочки - расчет)

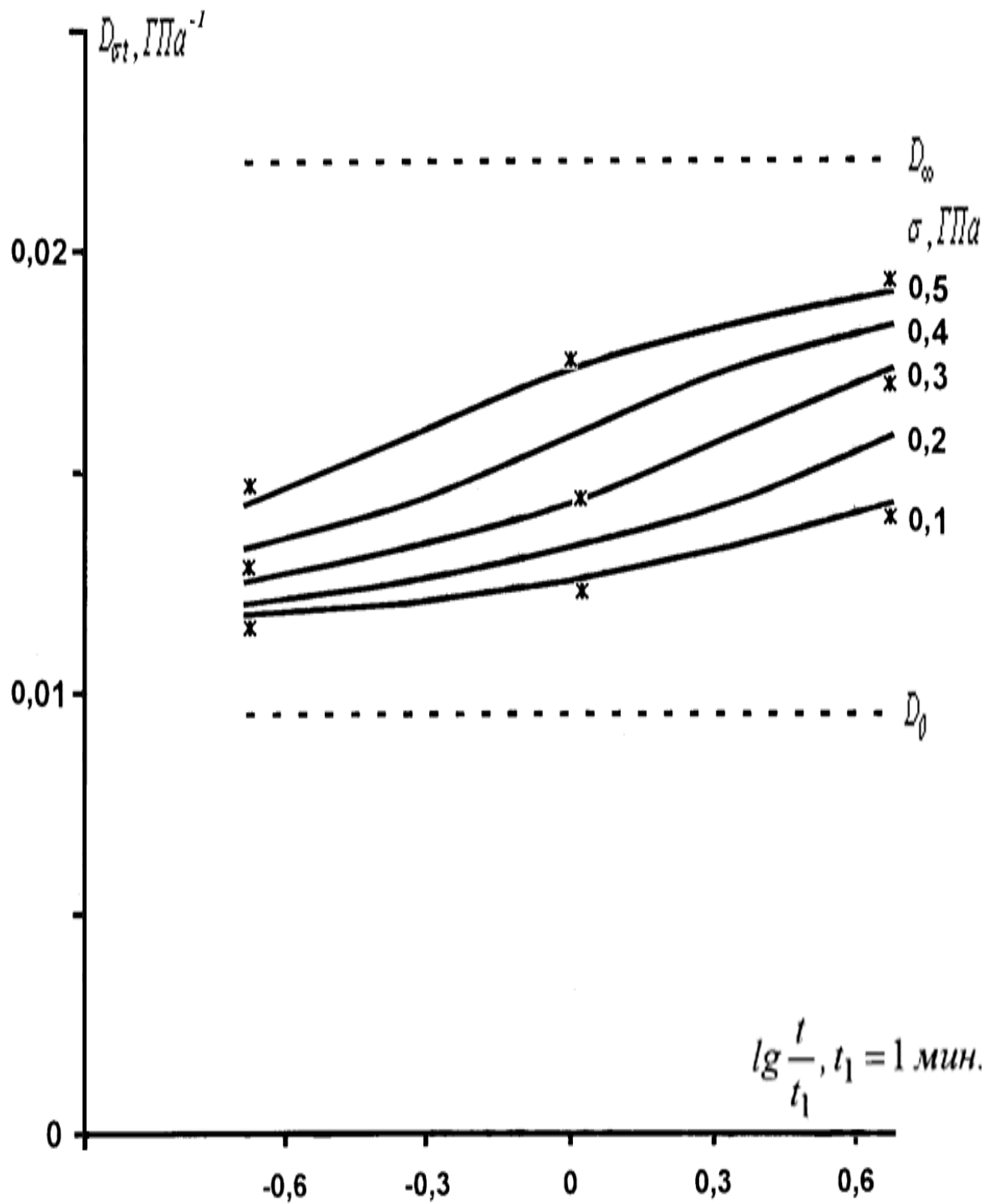


Рисунок 3.4 - "Семейство" кривых податливости арамидной текстильной нити СВМ при температуре 20 °С (сплошные линии - эксперимент, звездочки - расчет)

Экспериментальные "семейства" кривых ползучести, в последующем, после деления на соответствующие значения напряжений σ перестраивались в "семейства" кривых податливостей $D_{\sigma t}$ по формуле:

$$D_{\sigma t} = \frac{\varepsilon_t}{\sigma} \quad (3.4)$$

Пример экспериментального "семейства" кривых податливости арамидной текстильной нити СВМ приведен на рис. 3.4.

3.4. Математическое моделирование ползучести и восстановления арамидных текстильных материалов

Учитывая, что моделирование процессов ползучести и восстановительных процессов проводится по одним и тем же формулам, рассмотрим ниже только один из этих процессов – процесс ползучести.

Математическое моделирование процесса ползучести арамидных текстильных материалов, изучаемых в работе, проводилось на основе нормированной функции арктангенс логарифма приведенного времени (НАЛ), которая положительно себя зарекомендовала при моделировании ползучести текстильных материалов сложной макроструктуры:

$$\varphi_{\sigma t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctg \left(\frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \ln \frac{t}{\tau_{\sigma}} \right). \quad (3.5)$$

Обоснованность выбора функции НАЛ заключается в том, что она характеризует вероятностное распределение Коши, обладающее тем важным свойством, что распределение суммы случайных величин, подчиняющихся закону Коши, также подчинено этому закону. Текстильные же объекты сложной макроструктуры типа тканей и шнуров можно считать условно состоящими из "суммы" объектов простой макроструктуры - нитей, моделирования ползучести которых проводится

также на основе функции НАЛ.

С учетом сказанного, математическая модель для податливости имеет вид:

$$D_{\sigma t} = D_0 + (D_{\infty} - D_0) \cdot \varphi_{\sigma t}, \quad (3.6)$$

где

t - время,

$1/b_{n\sigma}$ - параметр интенсивности процесса ползучести,

τ_{σ} - время запаздывания (время, за которое осуществится половина конформационных переходов "запаздывающих" частиц при величине напряжения σ),

$D_{\sigma t} = \varepsilon/\sigma$ - податливость,

D_0 - начальная податливость,

D_{∞} - предельная равновесная податливость.

Правильность выбора математической модели ползучести в виде функции НАЛ подтверждает близость расчетных значений деформации и податливости к соответствующим экспериментальным кривым.

Расчетные значения деформации (рис.3.3) и податливости (рис.3.4), вычисленные по математической модели (3.5), (3.6), нанесены на соответствующие экспериментальные графики.

3.5. Выводы по главе 3

Современная экспериментальная база Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна позволяет проводить различные экспериментальные исследования

широкого спектра полимерных текстильных материалов, в том числе, и арамидных текстильных материалов.

Было показано, что, использование нормированной функции НАЛ в качестве основы математических моделей эксплуатационных процессов (релаксационных процессов, процессов ползучести и процессов восстановления) позволяет с достаточной степенью точности моделировать указанные процессы арамидных текстильных материалов.

На рис.3.1 - рис.3.4 отчетливо видно, что расчетные значения напряжений, деформаций, модуля релаксации и податливости арамидных текстильных материалов незначительно отличаются от соответствующих экспериментальных значений, что подтверждает адекватность разработанных математических моделей эксплуатационных процессов (релаксационных процессов, процессов ползучести и процессов восстановления) указанных материалов

4. ЦИФРОВОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ АРАМИДНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В главе рассмотрено цифровое прогнозирование релаксационных, деформационных и восстановительных и процессов арамидных текстильных материалов на основе известных интегральных соотношений Больцмана-Вольтерра.

Для повышения точности прогнозирования применялись методы вычисления несобственных нелинейно-наследственных интегралов, основанные на неравномерном разбиении временной шкалы с учетом специфики рассматриваемого процесса.

При прогнозировании активных (быстропротекающих) деформационных, восстановительных или релаксационных процессов, характеризующихся ростом скорости деформирования или нагружения, временная шкала разбивалась в возрастающей геометрической прогрессии - с целью наилучшего учета влияния квазимгновенного фактора деформирования или нагружения в начале процесса.

При прогнозировании длительных деформационных, восстановительных или релаксационных процессов, характеризующихся снижением скорости деформирования или нагружения, временная шкала разбивалась в убывающей геометрической прогрессии - с целью наилучшего учета длительных воздействий деформации или нагрузки.

4.1. Цифровое прогнозирование релаксационных процессов арамидных текстильных материалов

Уравнение Больцмана-Вольтерра для прогнозирования релаксационного процесса арамидных текстильных материалов имеет вид:

$$\sigma_t = E_0 \varepsilon_t - (E_0 - E_\infty) \cdot \int_0^t \varepsilon_\theta \cdot \varphi'_{\varepsilon, t-\theta} d\theta. \quad (4.1)$$

Указанное уравнение является основополагающим для прогнозирования различных релаксационных процессов, включая процессы растяжения и процессы обратной релаксации.

Нелинейность этого уравнения в виде параметра ε содержится в интегральном ядре $\varphi'_{\varepsilon, t}$, представляющем из себя временную производную функции релаксации (3.2).

Для различных функций релаксации $\varphi_{\varepsilon, t}$ получаются различные интегральные уравнения (4.1).

Преимущество использования функции НАЛ в качестве основы для моделирования релаксационного процесса арамидных текстильных материалов состоит в возможности расширения области доверительного прогнозирования в сторону "больших" (длительные процессы) и в сторону "малых" времен (кратковременные процессы) с уменьшением погрешности прогноза за счет снижения влияния квазимгновенного фактора деформирования в начале процесса, что обусловлено замедленной сходимостью функции НАЛ к своим асимптотическим значениям.

Расчетное прогнозирование релаксационного процесса арамидных текстильных материалов будем производить по уравнению (4.1).

Делая под интегралом замену переменной $s = t - \theta$, получим уравнение, равносильное (4.1)

$$\sigma_t = E_o \varepsilon_t - (E_o - E_\infty) \cdot \int_0^t \varepsilon_{t-s} \cdot \varphi'_{\varepsilon s} ds, \quad (4.2)$$

Так как в качестве релаксационной функции $\varphi_{\varepsilon t}$ выбрана функция НАЛ (3.2), то ее аргумент будет иметь вид:

$$W_{\varepsilon t} = \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} = \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \left(\ln \frac{t}{t_1} + \ln \frac{t_1}{\tau_\varepsilon} \right). \quad (4.3)$$

Дифференцируя (3.2) по времени, получим выражение для ядра релаксации

$$\varphi'_{\varepsilon t} = \frac{\partial \varphi_{\varepsilon t}}{\partial t} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \frac{1}{1 + W_{\varepsilon t}^2} \cdot \frac{1}{t}. \quad (4.4)$$

Уравнение (4.2) с учётом (4.4) принимает вид

$$\sigma_t = E_o \varepsilon_t - (E_o - E_\infty) \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \int_0^t \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{1}{1 + W_{\varepsilon s}^2} \cdot \frac{ds}{s}. \quad (4.5)$$

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

$$\sigma_t = E_o \varepsilon_t - (E_o - E_\infty) \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \int_0^t \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{1}{1 + W_{\varepsilon s}^2} \cdot d(\ln s). \quad (4.6)$$

Займёмся вычислением интеграла, входящего в формулу (4.6), для чего введём следующие обозначения

$$I = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \int_0^t \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{1}{1 + W_{\varepsilon s}^2} \cdot d(\ln s). \quad (4.7)$$

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

$$I = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \int_0^{t_1} \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon s}^2} \cdot d(\ln s) + \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \int_{t_1}^t \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon s}^2} \cdot d(\ln s) \quad (4.8)$$

или

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

где

$$I^* = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \int_0^{t_1} \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon s}^2} \cdot d(\ln s), \quad (4.9)$$

$$\tilde{I} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \int_{t_1}^t \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon s}^2} \cdot d(\ln s). \quad (4.10)$$

Вычислим интеграл (4.9).

В предположении непрерывности деформации ε_t по t можно записать

$$I^* \approx \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \varepsilon_{t-\xi} \cdot \int_0^{t_1} \frac{1}{1+W_{\varepsilon s}^2} \cdot d(\ln s), \quad (4.11)$$

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 (4.11) становится точным.

Далее получаем

$$I^* \approx \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \varepsilon_{t-\xi} \cdot \varphi_{\varepsilon s} \Big|_0^{t_1}, \quad (4.12)$$

откуда, учитывая, что $\varphi_{\varepsilon s} \rightarrow 0$ при $s \rightarrow 0$, следует

$$I^* \approx \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \varepsilon_{t-\xi} \cdot \varphi_{\varepsilon t_1}. \quad (4.13)$$

Займёмся вычислением интеграла (4.10).

Выберем, для определённости, равномерное разбиение интервала $(0; t]$ на n частей точками $t_0 = 0$, $t_1 = \frac{t}{n}$, ..., $t_k = \frac{kt}{n}$, ..., $t_n = t$, 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 (4.10) 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

$$\tilde{I}_1 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon\xi_k}^2} \cdot \Delta_k, \quad (4.14)$$

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

Следовательно,

$$\tilde{I}_1 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \frac{t}{n} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon\xi_k}^2} \cdot \frac{1}{\xi_k}, \quad (4.15)$$

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

$$\tilde{I}_1 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot 2 \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon\xi_k}^2} \cdot \frac{1}{2k-1}. \quad (4.16)$$

Таким образом,

$$I_1 = \varepsilon_{t-\xi_1} \cdot \varphi_{\varepsilon_1} + \frac{2}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon\xi_k}^2} \cdot \frac{1}{2k-1}. \quad (4.17)$$

Найденная интегральная сумма представляет собой приближённое значение интеграла (4.8), найденное по средним точкам ξ_k интервалов разбиения области $(0; t]$.

Для правой интегральной суммы имеем

$$\tilde{I}_2 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon t_k}^2} \cdot \Delta_k, \quad (4.18)$$

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

Следовательно,

$$\tilde{I}_2 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \frac{t}{n} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon t_k}^2} \cdot \frac{1}{t_k}, \quad (4.19)$$

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

Таким образом,

$$\tilde{I}_2 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon t_k}^2} \cdot \frac{1}{k}. \quad (4.20)$$

Окончательно получаем

$$I_2 = \varepsilon_{t-t_1} \cdot \varphi_{\varepsilon_1} + \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon t_k}^2} \cdot \frac{1}{k}. \quad (4.21)$$

Найденная интегральная сумма представляет собой приближённое значение интеграла (4.8), найденное по правым точкам t_k интервалов разбиения области $(0; t]$.

Для левой интегральной суммы имеем

$$\tilde{I}_3 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \frac{t}{n} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon_{t_{k-1}}}^2} \cdot \frac{1}{t_{k-1}}, \quad (4.22)$$

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,

$$\tilde{I}_3 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon_{t_{k-1}}}^2} \cdot \frac{1}{k-1}, \quad (4.23)$$

откуда окончательно получим

$$I_3 = \varepsilon_t \cdot \varphi_{\varepsilon_1} + \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon_{t_{k-1}}}^2} \cdot \frac{1}{k-1}. \quad (4.24)$$

Найденная интегральная сумма представляет собой приближённое значение интеграла (4.8), найденное по левым точкам t_{k-1} интервалов разбиения области $(0; t]$.

Оценим точность полученных интегральных сумм. Для этого можно взять усреднённое значение интеграла (4.8)

$$I = \frac{I_2 + I_3}{2} \pm \frac{I_2 - I_3}{2}. \quad (4.25)$$

Здесь первое слагаемое

$$\alpha = \frac{I_2 + I_3}{2} \quad (4.26)$$

даёт величину интеграла, а второе

$$\beta = \pm \frac{I_2 - I_3}{2} - \quad (4.27)$$

доверительный интеграл.

Заметим, что наиболее точным из приближённых значений интеграла (4.8), как правило, является значение I_1 , найденное по формуле (4.17).

Однако предпочтительнее находить интегралы I_2 и I_3 по формулам (4.21) и (4.24) с дальнейшим применением (4.25), так как формула (4.25) содержит как значение интеграла (4.26), так и доверительный интервал (4.27).

В самом общем случае расчетного прогнозирования релаксационного процессов арамидного текстильного материала посредством вычисления нелинейно-наследственного интеграла путем равномерного разбиения отрезка интегрирования получены результаты, имеющие относительную погрешность не более 10 %, что является вполне технически допустимой погрешностью (рис. 3.1, рис. 3.2).

4.2. Повышение точности цифрового прогнозирования для случая активных релаксационных процессов арамидных текстильных материалов

Повысить точность расчетного прогнозирования релаксационного процесса арамидного текстильного материала можно увеличивая число отрезков разбиения, что становится возможным благодаря разработанным компьютерным методам вычисления нелинейно-наследственных интегралов.

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

Другим способом повышения точности расчетного прогнозирования релаксационного процесса арамидного текстильного материала является неравномерное разбиение временной шкалы с целью наилучшего учета временной специфики релаксационного процесса.

При прогнозировании активных (быстропротекающих) релаксационных процессов, характеризующихся ростом скорости деформирования, временную шкалу следует разбивать в возрастающей геометрической прогрессии - чтобы оптимально учесть влияния квазимгновенного фактора деформирования в начале процесса.

Рассмотрим указанный случай.

Для вычисления интеграла (4.10) разобьем полуинтервал $(0;t]$ на части (рис. 4.1): $t_0 = 0, t_1, \dots, t_k, \dots, t_n = t$, таким образом, чтобы их длины составляли возрастающую геометрическую прогрессию со знаменателем $q > 1$:

$$t_0 = 0, t_1 = x, t_2 = x \cdot (1 + q), \dots, t_k = x \cdot (1 + q + \dots + q^{k-1}), \dots, t_n = t.$$

Или:

$$t_0 = 0, t_1 = x, t_2 = x \cdot \frac{q^2 - 1}{q - 1}, \dots, t_k = x \cdot \frac{q^k - 1}{q - 1}, \dots, t_n = t.$$

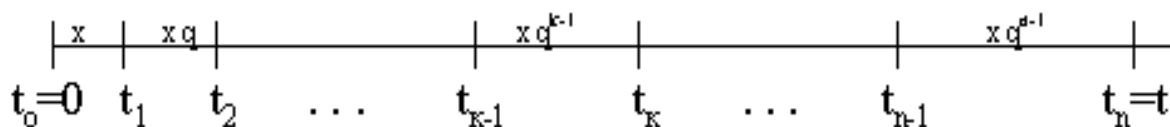


Рисунок 4.1 - Разбиение полуинтервала интегрирования $(0;t]$ в возрастающей геометрической прогрессии

Временное значение x можно найти, учитывая:

$$t = x \cdot \frac{q^n - 1}{q - 1}. \quad (4.28)$$

Или:

$$x = t \cdot \frac{q - 1}{q^n - 1}. \quad (4.29)$$

Зафиксируем в центре каждого интервала $(t_{k-1}; t_k)$ точку

$$\xi_k = \frac{t_k + t_{k-1}}{2} \text{ (рис. 4.2).}$$

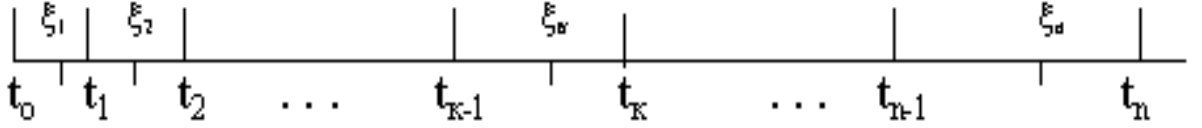


Рисунок 4.2 - Выбор точек ξ_k

Приближенное значение для (4.10) можно записать тремя разными способами:

$\tilde{I}_1$ - через интегральную сумму по серединам ξ_k интервалов $(t_{k-1}; t_k)$;

$\tilde{I}_2$ - через интегральную сумму по правым точкам t_k интервалов $(t_{k-1}; t_k)$;

$\tilde{I}_3$ - через интегральную сумму по левым точкам t_{k-1} интервалов $(t_{k-1}; t_k)$.

Для $\tilde{I}_1$ имеем:

$$\tilde{I}_1 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1 + W_{\varepsilon\xi_k}^2} \cdot \Delta_k, \quad (4.30)$$

где

$$\Delta_k = \frac{x \cdot q^{k-1}}{\xi_k} = \frac{t \cdot q^{k-1}}{\xi_k} \cdot \frac{q-1}{q^n-1}.$$

То есть:

$$\tilde{I}_1 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot t \cdot \frac{q-1}{q^n-1} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon\xi_k}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{\xi_k}, \quad (4.31)$$

где

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

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

$$= t \cdot q^{k-1} \cdot \frac{2q^{n-k+1} - q - 1}{2(q^n - 1)},$$

$$\ln \xi_k = \ln t + \ln(q^k + q^{k-1} - 2) - \ln(2(q^n - 1)).$$

Тогда:

$$\tilde{I}_1 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \frac{q-1}{2} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon\xi_k}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{q^k + q^{k-1} - 2}. \quad (4.32)$$

Следовательно:

$$I_1 = \varepsilon_{t-\xi_1} \cdot \varphi_{\mathcal{A}_1} + \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \frac{q-1}{2} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon\xi_k}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{q^k + q^{k-1} - 2}. \quad (4.33)$$

Найденное значение интегральной суммы I_1 - это приближение интеграла (4.8), вычисленное по серединам ξ_k интервалов $(t_{k-1}; t_k)$.

Для $\tilde{I}_2$ имеем

$$\tilde{I}_2 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon t_k}^2} \cdot \Delta_k, \quad (4.34)$$

где

$$\Delta_k = \frac{x \cdot q^{k-1}}{t_k} = \frac{t \cdot q^{k-1}}{t_k} \cdot \frac{q-1}{q^n-1}. \quad (4.35)$$

То есть:

$$\tilde{I}_2 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot t \cdot \frac{q-1}{q^n-1} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon t_k}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{t_k}, \quad (4.36)$$

где

$$t_k = x \cdot \frac{q^k-1}{q-1} = t \cdot \frac{q^k-1}{q^n-1}, \quad (4.37)$$

$$t-t_k = t-t \cdot \frac{q^k-1}{q^n-1} = t \cdot q^k \cdot \frac{q^{n-k}-1}{q^n-1},$$

$$\ln t_k = \ln t + \ln(q^k-1) - \ln(q^n-1).$$

Тогда:

$$\tilde{I}_2 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot (q-1) \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon t_k}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{q^k-1}. \quad (4.38)$$

Следовательно:

$$I_2 = \varepsilon_{t-t_1} \cdot \varphi_{\varepsilon t_1} + \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot (q-1) \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon t_k}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{q^k-1}. \quad (4.39)$$

Найденное значение интегральной суммы I_2 - это приближение интеграла (4.8), вычисленное по правым точкам t_k интервалов $(t_{k-1}; t_k)$.

Для $\tilde{I}_3$ имеем

$$\tilde{I}_3 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \frac{t}{n} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon_{k-1}}^2} \cdot \frac{1}{t_{k-1}}, \quad (4.40)$$

где

$$\Delta_k = \frac{x \cdot q^{k-1}}{t_{k-1}} = \frac{t \cdot q^{k-1}}{t_{k-1}} \cdot \frac{q-1}{q^n-1}. \quad (4.41)$$

То есть

$$\tilde{I}_3 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot t \cdot \frac{q-1}{q^n-1} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon_{k-1}}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{t_{k-1}}, \quad (4.42)$$

где

$$t_{k-1} = x \cdot \frac{q^{k-1}-1}{q-1} = t \cdot \frac{q^{k-1}-1}{q^n-1}, \quad (4.43)$$

$$t - t_{k-1} = t - t \cdot \frac{q^{k-1}-1}{q^n-1} = t \cdot q^{k-1} \cdot \frac{q^{n-k+1}-1}{q^n-1},$$

$$\ln t_{k-1} = \ln t + \ln(q^{k-1}-1) - \ln(q^n-1).$$

То есть:

$$\tilde{I}_3 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot (q-1) \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon_{k-1}}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{q^{k-1}-1}. \quad (4.44)$$

Следовательно:

$$I_3 = \varepsilon_t \cdot \varphi_{\varepsilon_1} + \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot (q-1) \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon_{k-1}}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{q^{k-1}-1}. \quad (4.45)$$

Найденное значение интегральной суммы I_3 - это приближение интеграла (4.8), вычисленное по левым точкам t_{k-1} интервалов $(t_{k-1}; t_k)$.

Для оценки точности вычисленных интегральных сумм возьмем усреднение интеграла (4.8):

$$I = \frac{I_2 + I_3}{2} \pm \frac{I_2 - I_3}{2}. \quad (4.46)$$

Тогда

$$\alpha = \frac{I_2 + I_3}{2} - \quad (4.47)$$

есть величина самого интеграла;

$$\beta = \pm \frac{I_2 - I_3}{2} - \quad (4.48)$$

величина доверительного интервала.

Наиболее точным из вычисленных значений для (4.8) является I_1 , которое вычислялось по (4.33).

В то же самое время, целесообразнее вычислять I_2 и I_3 по (4.39) и (4.45), используя также (4.46), учитывая, что (4.47) - есть значение самого интеграла (4.8), а (4.48) - есть доверительный интервал.

Полученный расчет быстротекущего или краткосрочного релаксационного процесса арамидных текстильных материалов на основе разбиения интервала интегрирования в виде возрастающей геометрической прогрессии дал результаты с относительной погрешностью менее 6 %, то есть на треть лучше, чем при равномерном разбиении интервала интегрирования.

4.3. Повышение точности цифрового прогнозирования для случая длительных релаксационных процессов арамидных текстильных материалов

При прогнозировании длительных релаксационных процессов, характеризующихся снижением скорости деформирования, временную шкалу следует разбивать в убывающей геометрической прогрессии - чтобы

оптимально учесть влияния длительных деформационных воздействий.

Для вычисления интеграла (4.10) разобьем полуинтервал $(0;t]$ на части (рис. 4.3): $t_0 = 0, t_1, \dots, t_k, \dots, t_n = t$, таким образом, чтобы их длины составляли убывающую геометрическую прогрессию, знаменатель которой $0 < q < 1$:

$$t_0 = 0, t_1 = x, t_2 = x \cdot (1 + q), \dots, t_k = x \cdot (1 + q + \dots + q^{k-1}), \dots, t_n = t.$$

Или:

$$t_0 = 0, t_1 = x, t_2 = x \cdot \frac{q^2 - 1}{q - 1}, \dots, t_k = x \cdot \frac{q^k - 1}{q - 1}, \dots, t_n = t.$$

Временное значение x можно найти, учитывая:

$$t = x \cdot \frac{1 - q^n}{1 - q}. \quad (4.49)$$

Или:

$$x = t \cdot \frac{1 - q}{1 - q^n}. \quad (4.50)$$

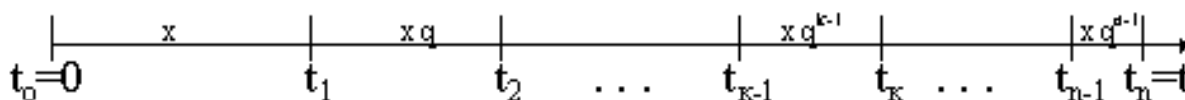


Рисунок 4.3 - Разбиение полуинтервала интегрирования $(0;t]$ в убывающей геометрической прогрессии

Зафиксируем в центре каждого интервала $(t_{k-1}; t_k)$ точку

$$\xi_k = \frac{t_k + t_{k-1}}{2} \text{ (рис. 4.4).}$$

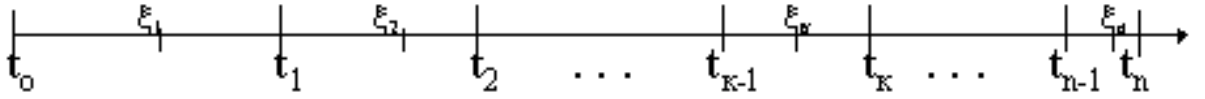


Рисунок 4.4 - Выбор точек ξ_k

Приближенное значение для (4.10) можно записать тремя разными способами:

$\tilde{I}_1$ - через интегральную сумму по серединам ξ_k интервалов $(t_{k-1}; t_k)$;

$\tilde{I}_2$ - через интегральную сумму по правым точкам t_k интервалов $(t_{k-1}; t_k)$;

$\tilde{I}_3$ - через интегральную сумму по левым точкам t_{k-1} интервалов $(t_{k-1}; t_k)$.

Для $\tilde{I}_1$ имеем:

$$\tilde{I}_1 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1 + W_{\varepsilon\xi_k}^2} \cdot \Delta_k, \quad (4.51)$$

где

$$\Delta_k = \frac{x \cdot q^{k-1}}{\xi_k} = \frac{t \cdot q^{k-1}}{\xi_k} \cdot \frac{1-q}{1-q^n}. \quad (4.52)$$

То есть:

$$\tilde{I}_1 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot t \cdot \frac{1-q}{1-q^n} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1 + W_{\varepsilon\xi_k}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{\xi_k}, \quad (4.53)$$

где

$$\xi_k = \frac{t_k + t_{k-1}}{2} = \frac{x}{2(1-q)} \cdot (2 - q^k - q^{k-1}) = t \cdot \frac{2 - q^k - q^{k-1}}{2(1-q^n)}, \quad (4.54)$$

$$\begin{aligned}
t - \xi_k &= t - \frac{t_k + t_{k-1}}{2} = t - \frac{t}{2(1 - q^n)} \cdot (2 - q^k - q^{k-1}) = \\
&= t \cdot q^{k-1} \cdot \frac{1 + q - 2q^{n-k+1}}{2(1 - q^n)}, \\
\ln \xi_k &= \ln t + \ln(2 - q^k - q^{k-1}) - \ln(2(1 - q^n)).
\end{aligned}$$

Тогда:

$$\tilde{I}_1 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \frac{1 - q}{2} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1 + W_{\varepsilon \xi_k}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{2 - q^k - q^{k-1}}. \quad (4.55)$$

Следовательно:

$$I_1 = \varepsilon_{t-\xi_1} \cdot \varphi_{\varepsilon_1} + \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \frac{1 - q}{2} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1 + W_{\varepsilon \xi_k}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{2 - q^k - q^{k-1}}. \quad (4.56)$$

Найденное значение интегральной суммы I_1 - это приближение интеграла (4.8), вычисленное по серединам ξ_k интервалов $(t_{k-1}; t_k)$.

Для $\tilde{I}_2$ имеем

$$\tilde{I}_2 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_k} \cdot \frac{1}{1 + W_{\varepsilon t_k}^2} \cdot \Delta_k, \quad (4.57)$$

где

$$\Delta_k = \frac{x \cdot q^{k-1}}{t_k} = \frac{t \cdot q^{k-1}}{t_k} \cdot \frac{1 - q}{1 - q^n}. \quad (4.58)$$

То есть:

$$\tilde{I}_2 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot t \cdot \frac{1 - q}{1 - q^n} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_k} \cdot \frac{1}{1 + W_{\varepsilon t_k}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{t_k}, \quad (4.59)$$

где

$$t_k = x \cdot \frac{1-q^k}{1-q} = t \cdot \frac{1-q^k}{1-q^n}, \quad (4.60)$$

$$t - t_k = t - t \cdot \frac{1-q^k}{1-q^n} = t \cdot q^k \cdot \frac{1-q^{n-k}}{1-q^n},$$

$$\ln t_k = \ln t + \ln(1-q^k) - \ln(1-q^n).$$

Тогда:

$$\tilde{I}_2 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot (1-q) \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon t_k}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{1-q^k}. \quad (4.61)$$

Следовательно:

$$I_2 = \varepsilon_{t-t_1} \cdot \varphi_{\varepsilon t_1} + \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot (1-q) \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon t_k}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{1-q^k}. \quad (4.62)$$

Найденное значение интегральной суммы I_2 - это приближение интеграла (4.8), вычисленное по правым точкам t_k интервалов $(t_{k-1}; t_k)$.

Для $\tilde{I}_3$ имеем

$$\tilde{I}_3 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \frac{t}{n} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon t_{k-1}}^2} \cdot \frac{1}{t_{k-1}}, \quad (4.63)$$

где

$$\Delta_k = \frac{x \cdot q^{k-1}}{t_{k-1}} = \frac{t \cdot q^{k-1}}{t_{k-1}} \cdot \frac{1-q}{1-q^n}. \quad (4.64)$$

То есть

$$\tilde{I}_3 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot t \cdot \frac{1-q}{1-q^n} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon t_{k-1}}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{t_{k-1}}, \quad (4.65)$$

где

$$t_{k-1} = x \cdot \frac{1-q^{k-1}}{1-q} = t \cdot \frac{1-q^{k-1}}{1-q^n}, \quad (4.66)$$

$$t - t_{k-1} = t - t \cdot \frac{1-q^{k-1}}{1-q^n} = t \cdot q^{k-1} \cdot \frac{1-q^{n-k+1}}{1-q^n},$$

$$\ln t_{k-1} = \ln t + \ln(1-q^{k-1}) - \ln(1-q^n).$$

То есть:

$$\tilde{I}_3 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot (1-q) \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon t_{k-1}}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{1-q^{k-1}}. \quad (4.67)$$

Следовательно:

$$I_3 = \varepsilon_t \cdot \varphi_{\varepsilon t_1} + \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot (1-q) \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon t_{k-1}}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{1-q^{k-1}}. \quad (4.68)$$

Найденное значение интегральной суммы I_3 - это приближение интеграла (4.8), вычисленное по левым точкам t_{k-1} интервалов $(t_{k-1}; t_k)$.

Для оценки точности вычисленных интегральных сумм возьмем усреднение интеграла (4.8):

$$I = \frac{I_2 + I_3}{2} \pm \frac{I_2 - I_3}{2}. \quad (4.69)$$

Тогда

$$\alpha = \frac{I_2 + I_3}{2} - \quad (4.70)$$

есть величина самого интеграла;

$$\beta = \pm \frac{I_2 - I_3}{2} - \quad (4.71)$$

величина доверительного интервала.

Наиболее точным из вычисленных значений для (4.8) является I_1 , которое вычислялось по (4.56).

В то же самое время, целесообразнее вычислять I_2 и I_3 по (4.62) и (4.68), используя также (4.69), учитывая, что (4.70) - есть значение самого интеграла (4.8), а (4.71) - есть доверительный интервал.

Полученный расчет длительного или затяжного процесса релаксации текстильных канатов на основе разбиения интервала интегрирования в виде убывающей геометрической прогрессии дал результаты с относительной погрешностью менее 6 %, то есть на треть лучше, чем при равномерном разбиении интервала интегрирования.

4.4. Цифровое прогнозирование процессов ползучести и восстановительных процессов арамидных текстильных материалов

Расчетное прогнозирование процессов ползучести и восстановительных процессов арамидных текстильных материалов будем производить по уравнению (4.72):

$$\varepsilon_t = D_o \sigma_t + (D_\infty - D_o) \cdot \int_0^t \sigma_\theta \cdot \phi'_{s,t-\theta} d\theta, \quad (4.72)$$

Делая под интегралом замену переменной $s = t - \theta$, получим уравнение, равносильное (4.72)

$$\varepsilon_t = D_o \sigma_t + (D_\infty - D_o) \cdot \int_0^t \sigma_{t-s} \cdot \phi'_{\sigma;s} ds, \quad (4.73)$$

Так как в качестве функции запаздывания ϕ_{σ} выбрана функция НАЛ (3.5), то обозначим ее аргумент:

$$W_{\sigma t} = \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \ln \frac{t}{\tau_\sigma} = \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \left(\ln \frac{t}{t_1} + \ln \frac{t_1}{\tau_\sigma} \right). \quad (4.74)$$

Дифференцируя (3.5) по времени, получим выражение для ядра запаздывания

$$\varphi'_{\sigma t} = \frac{\partial \varphi_{\sigma t}}{\partial t} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \frac{1}{1 + W_{\sigma t}^2} \cdot \frac{1}{t}. \quad (4.75)$$

Уравнение (4.73) с учётом (4.75) принимает вид

$$\varepsilon_t = D_o \sigma_t + (D_\infty - D_o) \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \int_0^t \sigma_{t-s} \cdot \frac{1}{1 + W_{\sigma t}^2} \cdot \frac{ds}{s}. \quad (4.76)$$

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

$$\varepsilon_t = D_o \sigma_t + (D_\infty - D_o) \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \int_0^t \sigma_{t-s} \cdot \frac{1}{1 + W_{\sigma t}^2} \cdot d(\ln s). \quad (4.77)$$

Займёмся вычислением интеграла, входящего в формулу (4.77), для чего введём следующие обозначения

$$I = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \int_0^t \sigma_{t-s} \cdot \frac{1}{1 + W_{\sigma t}^2} \cdot d(\ln s). \quad (4.78)$$

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

$$I = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \int_0^{t_1} \sigma_{t-s} \cdot \frac{1}{1 + W_{\sigma t}^2} \cdot d(\ln s) + \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \int_{t_1}^t \sigma_{t-s} \cdot \frac{1}{1 + W_{\sigma t}^2} \cdot d(\ln s) \quad (4.79)$$

или

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

где

$$I^* = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \int_0^{t_1} \sigma_{t-s} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma t}^2} \cdot d(\ln s), \quad (4.80)$$

$$\tilde{I} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \int_{t_1}^t \sigma_{t-s} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma t}^2} \cdot d(\ln s). \quad (4.81)$$

Вычислим интеграл (4.80). В предположении непрерывности нагрузки σ_t по t можно записать

$$I^* \approx \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \sigma_{t-\xi} \cdot \int_0^{t_1} \frac{1}{1+W_{\sigma t}^2} \cdot d(\ln s), \quad (4.82)$$

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 (4.82) становится точным.

Далее получаем

$$I^* \approx \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \sigma_{t-\xi} \cdot \varphi_{\sigma s} \Big|_0^{t_1}, \quad (4.83)$$

откуда, учитывая, что $\varphi_{\sigma s} \rightarrow 0$ при $s \rightarrow 0$, следует

$$I^* \approx \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \sigma_{t-\xi} \cdot \varphi_{\sigma t_1}. \quad (4.84)$$

Займёмся вычислением интеграла (4.81).

Выберем аналогично пункту 4.1, для определённости, равномерное разбиение интервала $(0; t]$ на n частей точками $t_0 = 0$, $t_1 = \frac{t}{n}$, ..., $t_k = \frac{kt}{n}$, ..., $t_n = t$, 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 (4.81) 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

$$\tilde{I}_1 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma\xi_k}^2} \cdot \Delta_k, \quad (4.85)$$

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

Следовательно,

$$\tilde{I}_1 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \frac{t}{n} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma\xi_k}^2} \cdot \frac{1}{\xi_k}, \quad (4.86)$$

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

$$\tilde{I}_1 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot 2 \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma\xi_k}^2} \cdot \frac{1}{2k-1}. \quad (4.87)$$

Таким образом,

$$I_1 = \sigma_{t-\xi_1} \cdot \varphi_{\sigma t_1} + \frac{2}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma\xi_k}^2} \cdot \frac{1}{2k-1}. \quad (4.88)$$

Найденная интегральная сумма представляет собой приближённое значение интеграла (4.79), найденное по средним точкам ξ_k интервалов разбиения области $(0; t]$.

Для правой интегральной суммы имеем

$$\tilde{I}_2 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_k} \cdot \frac{1}{1 + W_{\sigma t_k}^2} \cdot \Delta_k, \quad (4.89)$$

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

Следовательно,

$$\tilde{I}_2 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \frac{t}{n} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_k} \cdot \frac{1}{1 + W_{\sigma t_k}^2} \cdot \frac{1}{t_k}, \quad (4.90)$$

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

Таким образом,

$$\tilde{I}_2 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_k} \cdot \frac{1}{1 + W_{\sigma t_k}^2} \cdot \frac{1}{k}. \quad (4.91)$$

Окончательно получаем

$$I_2 = \sigma_{t-t_1} \cdot \varphi_{\sigma t_1} + \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_k} \cdot \frac{1}{1 + W_{\sigma t_k}^2} \cdot \frac{1}{k}. \quad (4.92)$$

Найденная интегральная сумма представляет собой приближённое значение интеграла (4.79), найденное по правым точкам t_k интервалов разбиения области $(0; t]$.

Для левой интегральной суммы имеем

$$\tilde{I}_3 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \frac{t}{n} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{1 + W_{\sigma t_{k-1}}^2} \cdot \frac{1}{t_{k-1}}, \quad (4.93)$$

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,

$$\tilde{I}_3 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{1 + W_{\sigma_{t_{k-1}}}^2} \cdot \frac{1}{k-1}, \quad (4.94)$$

откуда окончательно получим

$$I_3 = \sigma_t \cdot \varphi_{\sigma_1} + \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{1 + W_{\sigma_{t_{k-1}}}^2} \cdot \frac{1}{k-1}. \quad (4.95)$$

Найденная интегральная сумма представляет собой приближённое значение интеграла (4.79), найденное по левым точкам t_{k-1} интервалов разбиения области $(0; t]$.

Оценим точность полученных интегральных сумм. Для этого можно взять усреднённое значение интеграла (4.79)

$$I = \frac{I_2 + I_3}{2} \pm \frac{I_2 - I_3}{2}. \quad (4.96)$$

Здесь первое слагаемое

$$\alpha = \frac{I_2 + I_3}{2} \quad (4.97)$$

даёт величину интеграла, а второе

$$\beta = \pm \frac{I_2 - I_3}{2} - \quad (4.98)$$

доверительный интеграл.

Заметим, что наиболее точным из приближённых значений интеграла (4.79), как правило, является значение I_1 , найденное по формуле (4.88).

Однако предпочтительнее находить интегралы I_2 и I_3 по формулам (4.92) и (4.93) с дальнейшим применением (4.94), так как формула (4.96) содержит как значение интеграла (4.97), так и доверительный интервал (4.98).

В самом общем случае расчёта процессов ползучести для арамидных текстильных материалов посредством вычисления нелинейно-наследственного интеграла путём равномерного разбиения отрезка интегрирования получены результаты, имеющие относительную погрешность менее 10 %, что является вполне технически допустимой погрешностью.

Указанную относительную погрешность можно уменьшить увеличивая число отрезков разбиения, что становится возможным благодаря разработанным компьютерным методикам вычисления нелинейно-наследственных интегралов. Следует также отметить, что сложность вычисления рассмотренных несобственных интегралов состоит в наличии у них особенности при $t = 0$.

Частным случаем процессов ползучести (4.72) являются деформационно-восстановительные процессы, графики которых приведены на рис. 4.5, рис. 4.6.

Согласно графику деформационно-восстановительного процесса с полной разгрузкой (рис. 4.5), на материал действует нагрузка σ , задаваемая условием

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_o, t \in [0; t_n] \\ 0, t \in [t_n; t] \end{cases} \quad (\text{ГПа}). \quad (4.99)$$

Согласно графику деформационно-восстановительного процесса с частичной разгрузкой (рис. 4.6), на материал действует нагрузка σ , задаваемая условием

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_o, t \in [0; t_n] \\ \sigma_1, t \in [t_n; t] \end{cases} \quad (\text{ГПа}). \quad (4.100)$$

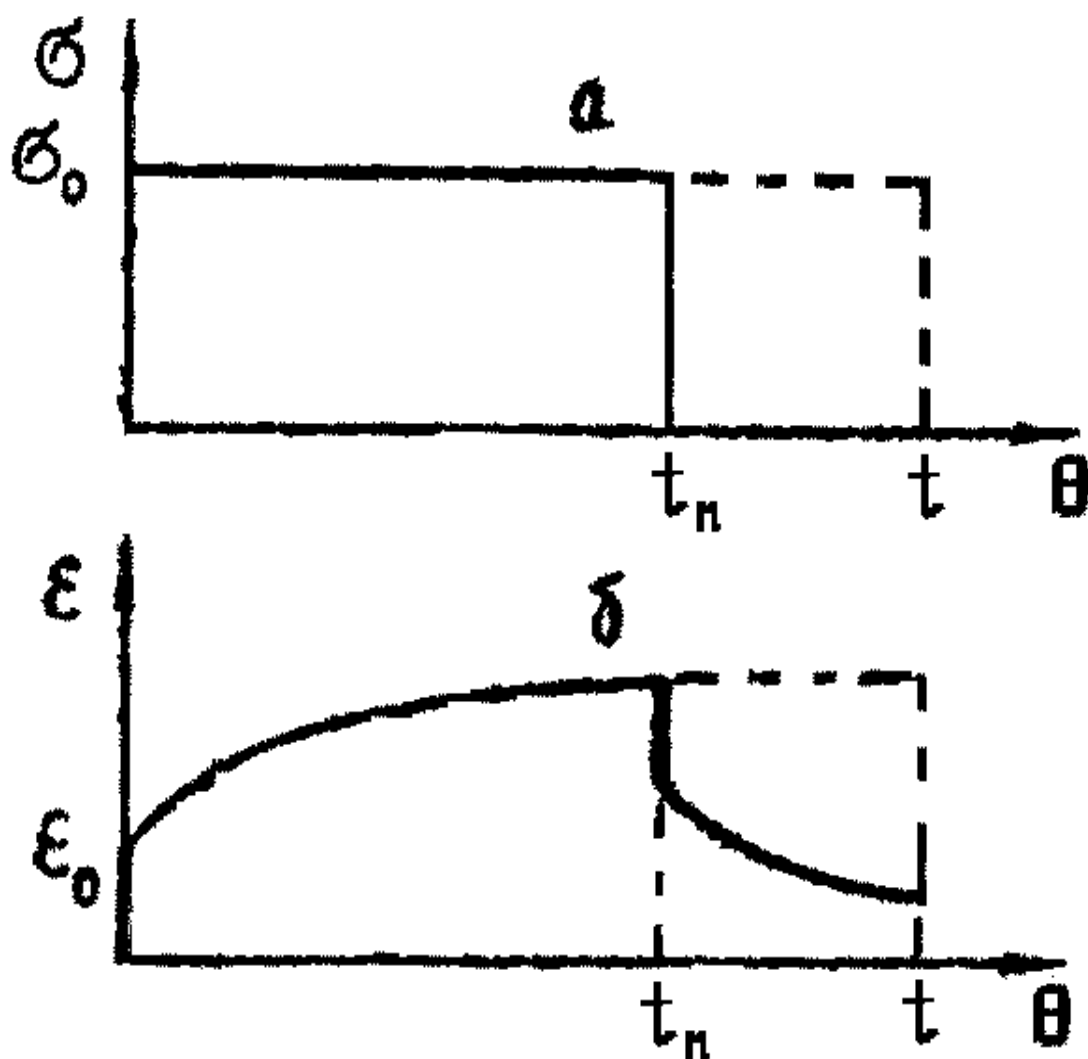


Рисунок 4.5 - График деформационно-восстановительного процесса с полной разгрузкой.

Закон изменения деформации получается, как решение уравнения (4.72) при заданном условии нагружения (4.99) или (4.100).

Пример расчёта деформационно-восстановительного процесса нити СВМ с половинной разгрузкой и последующей полной разгрузкой приведен на рис. 4.7.

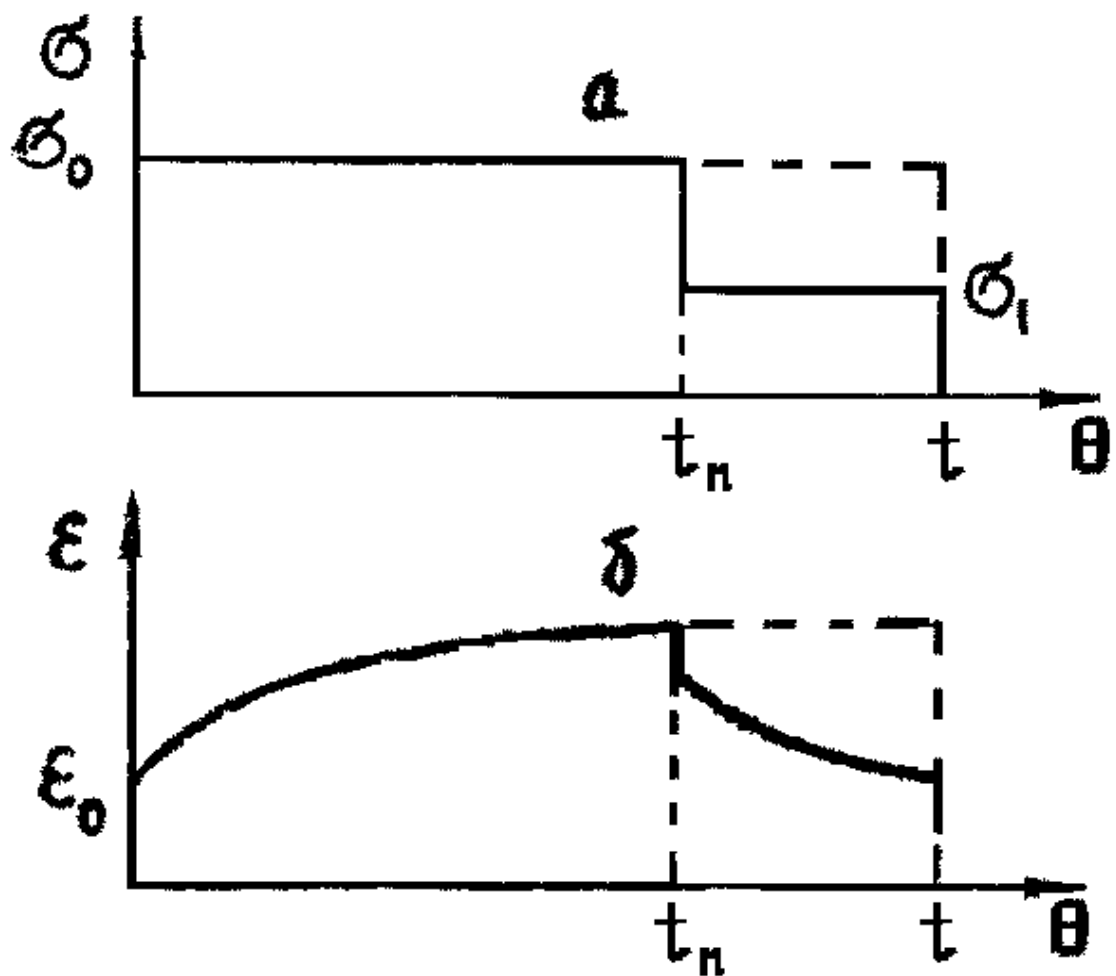


Рисунок 4.6 - График деформационно-восстановительного процесса с частичной разгрузкой

Из графика, приведенного на рис.4.7, видно, что деформирование образцов материала производилось первые 10 минут, затем последовала половинная разгрузка в течении 90 минут (в результате чего начался процесс восстановления) и последующая полная разгрузка.

Расчетные точки, вычисленные по уравнению (4.72), на рис.4.7 показаны "звездочками". По близости отклонений расчетных значений деформации от экспериментальных можно судить об адекватности выбранной математической модели прогнозирования ползучести.

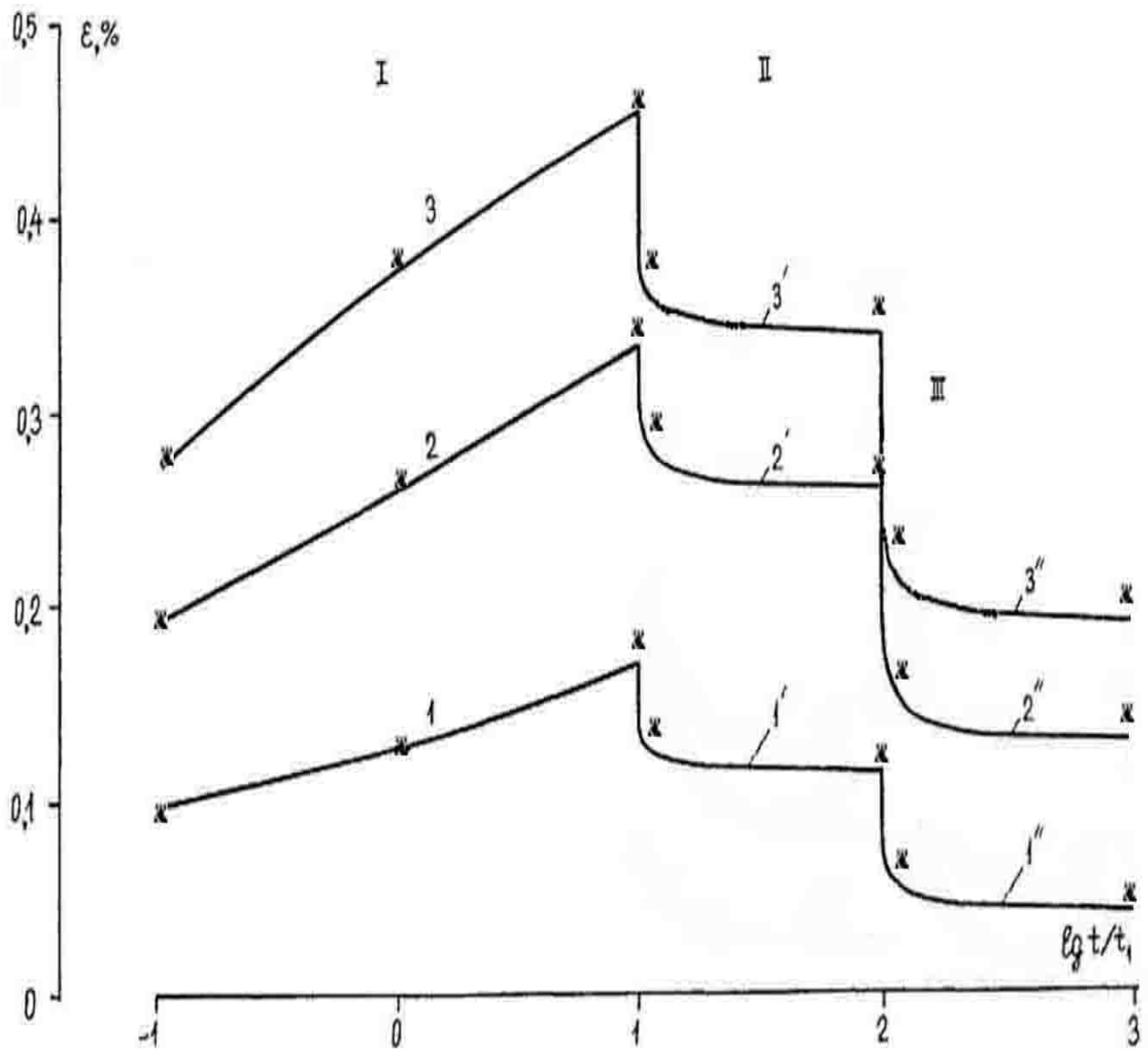


Рисунок 4.7 - Деформационно-восстановительный процесс арамидной текстильной нити СВМ

I - деформационный процесс,

II - восстановительный процесс после снятия половинной нагрузки,

III - восстановительный процесс после снятия полной нагрузки

(напряжения: 100 МПа (1), 200 МПа (2), 300 МПа (3);

50 МПа (1'), 100 МПа (2'); 150 МПа (3');

0 МПа (1''), 0 МПа (2''), 0 МПа (3'');

$t_1 = 1 \text{ мин.}$, "звездочки" - расчетные значения).

4.5. Повышение точности цифрового прогнозирования для случая активных процессов ползучести и восстановительных процессов арамидных текстильных материалов

Одним из способов уменьшения погрешности цифрового прогнозирования процессов ползучести и восстановительных процессов арамидных текстильных материалов является неравномерное разбиение временной шкалы с целью наилучшего учета временной специфики указанных процессов.

При прогнозировании активных (быстропротекающих) процессов ползучести и восстановительных процессов арамидных текстильных материалов, характеризующихся ростом скорости нагружения, временная шкала разбивалась в возрастающей геометрической прогрессии - чтобы оптимально учесть влияния квазимгновенного фактора нагружения в начале процесса.

В силу того, что основные силовые вклады в быстroteкущих и краткосрочных процессах ползучести и восстановительных процессах арамидных текстильных материалов происходят в самом начале этих процессов, предполагается при численном интегрировании определяющего интегрального соотношения ползучести использовать разбиение временной шкалы в виде возрастающей геометрической прогрессии.

Тогда силовые вклады в быстroteкущие и краткосрочные процессы ползучести и восстановительные процессы арамидных текстильных материалов в начале этих процессов получают больший вес, чем силовые вклады в конце процессов.

Специфичность быстroteкущих и краткосрочных процессов ползучести и восстановительных процессов арамидных текстильных материалов заключается в их особо значимой активности в начале этих процессов, которая, кроме того, сопровождается значительным увеличением скорости изменения нагрузки.

Для вычисления интеграла (4.81) разобьем полуинтервал $(0; t]$ на части (рис. 4.1): $t_0 = 0, t_1, \dots, t_k, \dots, t_n = t$, таким образом, чтобы их длины составляли возрастающую геометрическую прогрессию, знаменатель которой $q > 1$:

$$t_0 = 0, t_1 = x, t_2 = x \cdot (1 + q), \dots, t_k = x \cdot (1 + q + \dots + q^{k-1}), \dots, t_n = t.$$

Или:

$$t_0 = 0, t_1 = x, t_2 = x \cdot \frac{q^2 - 1}{q - 1}, \dots, t_k = x \cdot \frac{q^k - 1}{q - 1}, \dots, t_n = t.$$

Временное значение x можно найти, учитывая:

$$t = x \cdot \frac{q^n - 1}{q - 1}. \quad (4.101)$$

Или:

$$x = t \cdot \frac{q - 1}{q^n - 1}. \quad (4.102)$$

Зафиксируем в центре каждого интервала $(t_{k-1}; t_k)$ точку

$$\xi_k = \frac{t_k + t_{k-1}}{2} \text{ (рис. 4.2).}$$

Приближенное значение для (4.81) можно записать тремя разными способами:

$\tilde{I}_1$ - через интегральную сумму по серединам ξ_k интервалов $(t_{k-1}; t_k)$;

$\tilde{I}_2$ - через интегральную сумму по правым точкам t_k интервалов $(t_{k-1}; t_k)$;

$\tilde{I}_3$ - через интегральную сумму по левым точкам t_{k-1} интервалов $(t_{k-1}; t_k)$.

Для $\tilde{I}_1$ имеем:

$$\tilde{I}_1 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1 + W_{\sigma\xi_k}^2} \cdot \Delta_k, \quad (4.103)$$

где

$$\Delta_k = \frac{x \cdot q^{k-1}}{\xi_k} = \frac{t \cdot q^{k-1}}{\xi_k} \cdot \frac{q-1}{q^n - 1}.$$

То есть:

$$\tilde{I}_1 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot t \cdot \frac{q-1}{q^n - 1} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1 + W_{\sigma\xi_k}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{\xi_k}, \quad (4.104)$$

где

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

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

$$= t \cdot q^{k-1} \cdot \frac{2q^{n-k+1} - q - 1}{2(q^n - 1)},$$

$$\ln \xi_k = \ln t + \ln(q^k + q^{k-1} - 2) - \ln(2(q^n - 1)).$$

Тогда:

$$\tilde{I}_1 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \frac{q-1}{2} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1 + W_{\sigma\xi_k}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{q^k + q^{k-1} - 2}. \quad (4.105)$$

Следовательно:

$$I_1 = \sigma_{t-\xi_1} \cdot \varphi_{\sigma_1} + \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \frac{q-1}{2} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma_{\xi_k}}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{q^k + q^{k-1} - 2}. \quad (4.106)$$

Найденное значение интегральной суммы I_1 - это приближение интеграла (4.118), вычисленное по серединам ξ_k интервалов $(t_{k-1}; t_k)$.

Для $\tilde{I}_2$ имеем

$$\tilde{I}_2 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma_{t_k}}^2} \cdot \Delta_k, \quad (4.107)$$

где

$$\Delta_k = \frac{x \cdot q^{k-1}}{t_k} = \frac{t \cdot q^{k-1}}{t_k} \cdot \frac{q-1}{q^n - 1}. \quad (4.108)$$

То есть:

$$\tilde{I}_2 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot t \cdot \frac{q-1}{q^n - 1} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma_{t_k}}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{t_k}, \quad (4.109)$$

где

$$t_k = x \cdot \frac{q^k - 1}{q - 1} = t \cdot \frac{q^k - 1}{q^n - 1}, \quad (4.110)$$

$$t - t_k = t - t \cdot \frac{q^k - 1}{q^n - 1} = t \cdot q^k \cdot \frac{q^{n-k} - 1}{q^n - 1},$$

$$\ln t_k = \ln t + \ln(q^k - 1) - \ln(q^n - 1).$$

Тогда:

$$\tilde{I}_2 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot (q-1) \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma_{t_k}}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{q^k - 1}. \quad (4.111)$$

Следовательно:

$$I_2 = \sigma_{t-t_1} \cdot \varphi_{\sigma_1} + \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot (q-1) \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma_k}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{q^k-1}. \quad (4.112)$$

Найденное значение интегральной суммы I_2 - это приближение интеграла (4.81), вычисленное по правым точкам t_k интервалов $(t_{k-1}; t_k)$.

Для $\tilde{I}_3$ имеем

$$\tilde{I}_3 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \frac{t}{n} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma_{k-1}}^2} \cdot \frac{1}{t_{k-1}}, \quad (4.113)$$

где

$$\Delta_k = \frac{x \cdot q^{k-1}}{t_{k-1}} = \frac{t \cdot q^{k-1}}{t_{k-1}} \cdot \frac{q-1}{q^n-1}. \quad (4.114)$$

То есть

$$\tilde{I}_3 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot t \cdot \frac{q-1}{q^n-1} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma_{k-1}}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{t_{k-1}}, \quad (4.115)$$

где

$$t_{k-1} = x \cdot \frac{q^{k-1}-1}{q-1} = t \cdot \frac{q^{k-1}-1}{q^n-1}, \quad (4.116)$$

$$t - t_{k-1} = t - t \cdot \frac{q^{k-1}-1}{q^n-1} = t \cdot q^{k-1} \cdot \frac{q^{n-k+1}-1}{q^n-1},$$

$$\ln t_{k-1} = \ln t + \ln(q^{k-1}-1) - \ln(q^n-1).$$

То есть:

$$\tilde{I}_3 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot (q-1) \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma_{k-1}}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{q^{k-1}-1}. \quad (4.117)$$

Следовательно:

$$I_3 = \sigma_t \cdot \varphi_{\varepsilon t_1} + \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot (q-1) \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma_{k-1}}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{q^{k-1}-1}. \quad (4.118)$$

Найденное значение интегральной суммы I_3 - это приближение интеграла (4.81), вычисленное по левым точкам t_{k-1} интервалов $(t_{k-1}; t_k)$.

Для оценки точности вычисленных интегральных сумм возьмем усреднение интеграла (4.81):

$$I = \frac{I_2 + I_3}{2} \pm \frac{I_2 - I_3}{2}. \quad (4.119)$$

Тогда

$$\alpha = \frac{I_2 + I_3}{2} - \quad (4.120)$$

есть величина самого интеграла;

$$\beta = \pm \frac{I_2 - I_3}{2} - \quad (4.121)$$

величина доверительного интервала.

Наиболее точным из вычисленных значений для (4.81) является I_1 , которое вычислялось по (4.106).

В то же самое время, целесообразнее вычислять I_2 и I_3 по (4.112) и (4.118), используя также (4.117), учитывая, что (4.119) - есть значение самого интеграла (4.120), а (4.121) - есть доверительный интервал.

Полученный расчет быстротекущего или краткосрочного деформационного процесса текстильных канатов на основе разбиения интервала интегрирования в виде возрастающей геометрической прогрессии дал результаты с относительной погрешностью менее 6 %, то есть на треть лучше, чем при равномерном разбиении интервала интегрирования.

4.6. Повышение точности цифрового прогнозирования для случая длительных процессов ползучести и восстановительных процессов арамидных текстильных материалов

При прогнозировании затяжных и длительных процессов ползучести и восстановительных процессов арамидных текстильных материалов, основные силовые вклады в них рассредоточены на достаточно большие промежутки времени.

В силу этого, предлагается при численном интегрировании определяющего интегрального соотношения, соответствующего процессам ползучести и восстановительным процессам арамидных текстильных материалов использовать разбиение временной шкалы в виде убывающей геометрической прогрессии.

Тогда силовые вклады в затяжные и длительные процессы ползучести и восстановительные процессы в конце этих процессов получают больший вес, чем силовые вклады в начале процессов.

Специфичность затяжных и длительных процессов ползучести и восстановительных процессов арамидных текстильных материалов заключается в их особо значимой длительности, которая, кроме того, сопровождается уменьшением скорости изменения нагружения.

Для вычисления интеграла (4.81) разобьем полуинтервал $(0; t]$ на части (рис. 4.3): $t_0 = 0, t_1, \dots, t_k, \dots, t_n = t$, таким образом, чтобы их длины составляли убывающую геометрическую прогрессию, знаменатель которой $0 < q < 1$:

$$t_0 = 0, t_1 = x, t_2 = x \cdot (1 + q), \dots, t_k = x \cdot (1 + q + \dots + q^{k-1}), \dots, t_n = t.$$

Или:

$$t_0 = 0, t_1 = x, t_2 = x \cdot \frac{q^2 - 1}{q - 1}, \dots, t_k = x \cdot \frac{q^k - 1}{q - 1}, \dots, t_n = t.$$

Временное значение x можно найти, учитывая:

$$t = x \cdot \frac{1 - q^n}{1 - q}. \quad (4.122)$$

Или:

$$x = t \cdot \frac{1 - q}{1 - q^n}. \quad (4.123)$$

Зафиксируем в центре каждого интервала $(t_{k-1}; t_k)$ точку

$$\xi_k = \frac{t_k + t_{k-1}}{2} \text{ (рис. 4.4).}$$

Приближенное значение для (4.81) можно записать тремя разными способами:

$\tilde{I}_1$ - через интегральную сумму по серединам ξ_k интервалов $(t_{k-1}; t_k)$;

$\tilde{I}_2$ - через интегральную сумму по правым точкам t_k интервалов $(t_{k-1}; t_k)$;

$\tilde{I}_3$ - через интегральную сумму по левым точкам t_{k-1} интервалов $(t_{k-1}; t_k)$.

Для $\tilde{I}_1$ имеем:

$$\tilde{I}_1 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1 + W_{\sigma\xi_k}^2} \cdot \Delta_k, \quad (4.124)$$

где

$$\Delta_k = \frac{x \cdot q^{k-1}}{\xi_k} = \frac{t \cdot q^{k-1}}{\xi_k} \cdot \frac{1 - q}{1 - q^n}. \quad (4.125)$$

То есть:

$$\tilde{I}_1 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot t \cdot \frac{1-q}{1-q^n} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma\xi_k}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{\xi_k}, \quad (4.126)$$

где

$$\xi_k = \frac{t_k + t_{k-1}}{2} = \frac{x}{2(1-q)} \cdot (2 - q^k - q^{k-1}) = t \cdot \frac{2 - q^k - q^{k-1}}{2(1-q^n)}, \quad (4.127)$$

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

$$= t \cdot q^{k-1} \cdot \frac{1+q-2q^{n-k+1}}{2(1-q^n)},$$

$$\ln \xi_k = \ln t + \ln(2 - q^k - q^{k-1}) - \ln(2(1-q^n)).$$

Тогда:

$$\tilde{I}_1 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \frac{1-q}{2} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma\xi_k}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{2 - q^k - q^{k-1}}. \quad (4.128)$$

Следовательно:

$$I_1 = \sigma_{t-\xi_1} \cdot \varphi_{\sigma_1} + \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \frac{1-q}{2} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma\xi_k}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{2 - q^k - q^{k-1}}. \quad (4.129)$$

Найденное значение интегральной суммы I_1 - это приближение интеграла (4.118), вычисленное по серединам ξ_k интервалов $(t_{k-1}; t_k)$.

Для $\tilde{I}_2$ имеем

$$\tilde{I}_2 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma t_k}^2} \cdot \Delta_k, \quad (4.130)$$

где

$$\Delta_k = \frac{x \cdot q^{k-1}}{t_k} = \frac{t \cdot q^{k-1}}{t_k} \cdot \frac{1-q}{1-q^n}. \quad (4.131)$$

То есть:

$$\tilde{I}_2 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot t \cdot \frac{1-q}{1-q^n} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma_k}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{t_k}, \quad (4.132)$$

где

$$t_k = x \cdot \frac{1-q^k}{1-q} = t \cdot \frac{1-q^k}{1-q^n}, \quad (4.133)$$

$$t - t_k = t - t \cdot \frac{1-q^k}{1-q^n} = t \cdot q^k \cdot \frac{1-q^{n-k}}{1-q^n},$$

$$\ln t_k = \ln t + \ln(1-q^k) - \ln(1-q^n).$$

Тогда:

$$\tilde{I}_2 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot (1-q) \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma_k}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{1-q^k}. \quad (4.134)$$

Следовательно:

$$I_2 = \sigma_{t-t_1} \cdot \varphi_{\sigma_1} + \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot (1-q) \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma_k}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{1-q^k}. \quad (4.135)$$

Найденное значение интегральной суммы I_2 - это приближение интеграла (4.118), вычисленное по правым точкам t_k интервалов $(t_{k-1}; t_k)$.

Для $\tilde{I}_3$ имеем

$$\tilde{I}_3 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \frac{t}{n} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma_{k-1}}^2} \cdot \frac{1}{t_{k-1}}, \quad (4.136)$$

где

$$\Delta_k = \frac{x \cdot q^{k-1}}{t_{k-1}} = \frac{t \cdot q^{k-1}}{t_{k-1}} \cdot \frac{1-q}{1-q^n}. \quad (4.137)$$

То есть

$$\tilde{I}_3 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot t \cdot \frac{1-q}{1-q^n} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma_{k-1}}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{t_{k-1}}, \quad (4.138)$$

где

$$t_{k-1} = x \cdot \frac{1-q^{k-1}}{1-q} = t \cdot \frac{1-q^{k-1}}{1-q^n}, \quad (4.139)$$

$$t - t_{k-1} = t - t \cdot \frac{1-q^{k-1}}{1-q^n} = t \cdot q^{k-1} \cdot \frac{1-q^{n-k+1}}{1-q^n},$$

$$\ln t_{k-1} = \ln t + \ln(1-q^{k-1}) - \ln(1-q^n).$$

То есть:

$$\tilde{I}_3 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot (1-q) \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma_{k-1}}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{1-q^{k-1}}. \quad (4.140)$$

Следовательно:

$$I_3 = \sigma_t \cdot \varphi_{\sigma_1} + \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot (1-q) \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma_{k-1}}^2} \cdot \frac{q^{k-1}}{1-q^{k-1}}. \quad (4.141)$$

Найденное значение интегральной суммы I_3 - это приближение интеграла (4.81), вычисленное по левым точкам t_{k-1} интервалов $(t_{k-1}; t_k)$.

Для оценки точности вычисленных интегральных сумм возьмем усреднение интеграла (4.116):

$$I = \frac{I_2 + I_3}{2} \pm \frac{I_2 - I_3}{2}. \quad (4.142)$$

Тогда

$$\alpha = \frac{I_2 + I_3}{2} - \quad (4.143)$$

есть величина самого интеграла;

$$\beta = \pm \frac{I_2 - I_3}{2} - \quad (4.144)$$

величина доверительного интервала.

Наиболее точным из вычисленных значений для (4.81) является I_1 , которое вычислялось по (4.129).

В то же самое время, целесообразнее вычислять I_2 и I_3 по (4.135) и (4.141), используя также (4.140), учитывая, что (4.142) - есть значение самого интеграла (4.143), а (4.144) - есть доверительный интервал.

Полученный расчет затяжного или длительного деформационного процесса текстильных канатов на основе разбиения интервала интегрирования в виде убывающей геометрической прогрессии дал результаты с относительной погрешностью менее 6 %, то есть на треть лучше, чем при равномерном разбиении интервала интегрирования.

4.7 Выводы по главе 4

Таким образом, в настоящей главе рассмотрены методы цифрового прогнозирования процессов ползучести и восстановительных процессов арамидных текстильных материалов, основанные на вычислениях интегралов нелинейно-наследственной вязкоупругости.

Предлагаемые методы позволяют прогнозировать различные виды релаксационных процессов, процессов ползучести и восстановительных процессов арамидных текстильных материалов.

Разработанные методы и их комбинации применимы для расчёта любых, сколь угодно сложных релаксационных процессов, процессов ползучести и восстановительных процессов арамидных текстильных материалов, включая процессы с чередующимися разгрузками и нагрузками.

Для повышения точности цифрового прогнозирования релаксационных процессов, процессов ползучести и восстановительных процессов арамидных текстильных материалов был предложен метод неравномерного деления временной шкалы - в соответствии с временной спецификой указанных процессов.

При прогнозировании активных (быстропротекающих) релаксационных процессов, процессов ползучести и восстановительных процессов арамидных текстильных материалов, характеризующихся ростом скорости деформирования или нагружения, временная шкала должна разбиваться в возрастающей геометрической прогрессии - с целью наилучшего учета влияния квазамгновенного фактора деформирования или нагружения в начале процесса.

При прогнозировании длительных релаксационных процессов, процессов ползучести и восстановительных процессов арамидных текстильных материалов, характеризующихся снижением скорости деформирования или нагружения, временная шкала должна разбиваться в убывающей геометрической прогрессии - с целью наилучшего учета длительных воздействий деформации или нагрузки.

Методы, разработанные в данной главе, получили дальнейшее развитие при компьютеризации прогнозирования релаксационных процессов, процессов ползучести и восстановительных процессов арамидных текстильных материалов - созданы и официально зарегистрированы вычислительные программы. Автоматизация вычислений нелинейно-наследственных интегралов релаксации и ползучести повышает точность и достоверность прогнозирования релаксационных процессов, процессов ползучести и восстановительных процессов арамидных текстильных материалов.

Учитывая временные специфики релаксационных процессов, процессов ползучести и восстановительных процессов арамидных текстильных материалов удалось добиться повышения точности их численного прогнозирования с 90% до 94 %.

5. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЦИФРОВОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ АРАМИДНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Глава посвящена применению методов, разработанных в диссертационной работе для решения задач по сравнительному анализу функциональных свойств арамидных текстильных материалов, для исследования взаимосвязи указанных свойств со структурой и их целенаправленного технологического регулирования, а также для цифрового прогнозирования кратковременных и длительных механических воздействий.

Проведенный анализ функциональных свойств арамидных текстильных материалов выявил роль влияния геометрических размеров, линейной плотности, способа переплетения нитей и компонентного состава на их деформационные свойства.

Выявлены также существенные отличия в протекании процессов релаксации и ползучести у арамидных тканей и шнуров в отличие от арамидных нитей.

Процессы релаксации и ползучести тканей и шнуров протекают заметно более активно, чем у образующих их нитей.

Это связано с макростроением материалов.

В начале процессов релаксации и ползучести происходит перестройка макроструктуры геометрического характера за счет изменения расстояний между образующими материал нитями.

На этом этапе ткани и шнуры имеют меньшую деформационную жесткость, чем нити.

На втором этапе деформирования, когда изменения макроструктуры геометрического характера будут исчерпаны, включается механизм релаксации и ползучести самих арамидных нитей.

Начиная с этого момента деформационное поведение тканей и шнуров аналогично нитям.

Методы цифрового прогнозирования релаксационных процессов, процессов ползучести и восстановительных процессов арамидных текстильных материалов находят применение как в научных исследованиях при изучении их деформационных свойств, так и в учебных целях: теоретические результаты включены в лекционные курсы, а методы и разработанное программное обеспечение - в лабораторные практикумы для студентов и аспирантов.

5.1. Практическое применение методов определения параметров математических моделей функциональных процессов арамидных текстильных материалов

Методы определения параметров математических моделей функциональных процессов арамидных текстильных материалов не только позволяют проанализировать их эксплуатационные свойства, но и имеют важное прикладное значение для решения задач по сравнительному анализу и целенаправленному технологическому регулированию указанных свойств изучаемых материалов.

Методы определения параметров математических моделей функциональных процессов арамидных текстильных материалов, разработанные в работе, выгодно отличаются от аналогичных методов, предлагаемых другими научными школами.

Преимущество перед другими методами состоит, прежде всего, в том, что они содержат минимальное число физически обусловленных вязкоупругих параметров-характеристик.

Для процессов релаксации это: два асимптотических значения модуля релаксации (начальный - модуль упругости E_0 и конечный - модуль вязкоупругости E_∞), параметр интенсивности процесса релаксации $b_{n\varepsilon}$, показывающий насколько интенсивно проходит этот процесс, и функция времен релаксации $f_{\varepsilon_1\varepsilon}$, определяющая эти времена.

Для процессов ползучести и восстановительных процессов это: два асимптотических значения податливости (начальная податливость D_0 и квазиравновесная податливость D_∞), параметр интенсивности процесса ползучести $b_{n\sigma}$, показывающий насколько интенсивно проходит этот процесс, и функция времен запаздывания $f_{\sigma_1\sigma}$, определяющая эти времена.

При разработке методов определения вязкоупругих параметров-характеристик учитывалось, что 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 путем, времена релаксации и запаздывания не подлежат экспериментальному определению в силу своей природы.

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

Таблица 5.1 - Расчетные характеристики интенсивности процессов релаксации ($b_{n\varepsilon}$) и ползучести ($b_{n\sigma}$) арамидных текстильных материалов

Материал	Интенсивность релаксации	Интенсивность ползучести
арамидные нити		
Арселон	9,74	6,72
Армос	10,2	7,39
Терлон	8,14	5,91
Русар	11,4	7,92
СВМ	9,32	6,74
бронезащитные ткани		
ТБ-130	3,38	2,29
ТБ-190	2,91	1,93
ТБ-220	2,76	1,86
огнезащитные ткани		
ТО-265	2,31	1,59
ТО-240	3,17	2,09
ТО-125	2,94	1,87
арамидные шнуры		
ШТ-4	4,53	3,17
ШР-3	6,42	4,37
ШС-6	7,28	4,92

Знание вязкоупругих характеристики арамидных текстильных материалов помогают осуществить наилучший выбор материала,

обладающего определенными деформационными свойствами.

Приведем значения параметров интенсивности процессов релаксации и ползучести (табл.5.1), чтобы по ним определить насколько быстро проходят процессы релаксации и ползучести того или иного материала.

Из табл.5.1 видно, что наиболее быстро проходят процессы релаксации и ползучести у бронезащитных и огнезащитных тканей - у них наблюдаются самые маленькие значения параметров интенсивности (чем больше значение параметра интенсивности - тем медленнее процесс).

Самые медленные процессы релаксации и ползучести наблюдаются у арамидных нитей, у которых самые большие значения параметров интенсивности.

Зная асимптотические значения модуля релаксации и податливости можно ответить на вопрос, насколько полно проходят процессы релаксации и ползучести.

Коэффициент степени релаксации определяется по формуле:

$$k_{\text{рел.}} = \frac{E_0 - E_{\infty}}{E_0} \cdot 100 \%, \quad (5.1)$$

а коэффициент степени ползучести, соответственно равен

$$k_{\text{полз.}} = \frac{D_{\infty} - D_0}{D_{\infty}} \cdot 100 \%. \quad (5.2)$$

Чем больше значение коэффициентов степени релаксации и ползучести, тем выше способность материала соответственно к релаксации и ползучести.

В табл.5.2 приведены асимптотические значения модуля релаксации и ползучести, а также коэффициенты степени релаксации и ползучести арамидных текстильных материалов.

Таблица 5.2 - Расчетные асимптотические значения модуля релаксации и податливости, коэффициенты степени релаксации и ползучести арамидных текстильных материалов

Материал	E_o , ГПа	E_∞ , ГПа	$k_{рел.}, \%$	D_o , ГПа ⁻¹	D_∞ , ГПа ⁻¹	$k_{полз.}, \%$
aramидные нити						
Арселон	109	46	58	0,0092	0,022	58
Армос	94	43	54	0,011	0,023	52
Терлон	98	47	52	0,010	0,021	52
Русар	115	54	53	0,0087	0,019	54
СВМ	105	48	54	0,0095	0,021	55
бронезащитные ткани						
ТБ-130	76	21	72	0,013	0,048	73
ТБ-190	68	17	75	0,015	0,059	75
ТБ-220	71	19	73	0,014	0,053	74
огнезащитные ткани						
ТО-265	63	18	71	0,016	0,056	71
ТО-240	54	14	74	0,019	0,071	73
ТО-125	59	15	75	0,017	0,067	75
aramидные шнуры						
ШТ-4	77	26	66	0,013	0,038	66
ШР-3	80	28	65	0,013	0,036	64
ШС-6	73	23	68	0,014	0,043	67

Из табл.5.2 видно, что наиболее полно - на три четверти - проходят процессы релаксации и ползучести у бронезащитных и огнезащитных тканей.

У арамидных же нитей эти процессы проходят лишь наполовину.

У арамидных шнуров процессы релаксации и ползучести проходят на две трети.

Применение разработанных методов определения функциональных параметров релаксации и ползучести арамидных текстильных материалов на практике заметно упрощается благодаря автоматизации вычислений с помощью соответствующего программного обеспечения.

Цифровые методы определения функциональных параметров-характеристик арамидных текстильных материалов дают возможность анализа эксплуатационных свойств этих материалов.

Они также важны при решении вопросов, связанных с системным и сравнительным анализом функциональных свойств арамидных текстильных материалов.

5.2. Практическое применение метода цифрового прогнозирования функциональных процессов арамидных текстильных материалов

Релаксационные процессы, процессы ползучести и восстановительные процессы арамидных текстильных материалов описываются определяющими уравнениями Больцмана-Вольтерра (4.1) и (4.72), учитывающими активирующие действия приложенной деформации и нагрузки.

Разработанные методы численного нахождения решений указанных уравнений имеют важное прикладное значение.

Так, например, указанные методы применимы для расчёта, а, следовательно, для прогнозирования различных функциональных процессов.

К наиболее типичным из них относятся: процессы релаксации, процессы ползучести и восстановительные процессы.

Всё многообразие функциональных процессов арамидных текстильных материалов, как непрерывных, так и кусочно-непрерывных, описывается указанными уравнениями (4.1), (4.72), а значит и разработанными в главе 4 методами цифрового нахождения решений указанных уравнений.

Цифровое прогнозирование различного рода функциональных процессов арамидных текстильных материалов имеет важное значение, как на стадии целенаправленного технологического отбора образцов материалов, обладающих необходимыми упругими и вязкоупруго-пластическими свойствами, для запуска их в производство, так и на стадии самого производства - для контроля технологического процесса за соблюдением необходимых функциональных характеристик, изучаемых материалов.

Трудно себе представить современную лабораторию, изучающую свойства полимерных материалов, либо осуществляющую контроль за технологическим процессом их производства, не владеющую методами по прогнозированию эксплуатационных процессов исследуемых материалов.

Научно-технический прогресс и постоянное совершенствование материалов, требует от производителей арамидных текстильных материалов повышенного внимания к качеству производимых изделий, наличию у данных материалов необходимых вязкоупругих свойств.

Цифровые методы прогнозирования функциональных процессов арамидных текстильных материалов дают возможность анализа функциональности этих материалов.

5.3. Разработка компьютерных алгоритмов и программного обеспечения по цифровому прогнозированию функциональных процессов арамидных текстильных материалов

На основе метода определения параметров-характеристик функциональных процессов арамидных текстильных материалов, составим соответствующий алгоритм (рис. 5.1).

Используя алгоритм, изображенный на рис. 5.1, можно по экспериментальному релаксационному семейству арамидных текстильных материалов с учетом выбора соответствующей релаксационной функции определять параметры-характеристики релаксационно-эксплуатационных процессов этих материалов:

- модуль упругости E_0 ;
- модуль вязкоупругости E_∞ ;
- параметр интенсивности релаксационно-эксплуатационного процесса $b_{n\varepsilon}$;
- функцию времен релаксации $f_{\varepsilon_1\varepsilon}$.

Приведенный на рис. 5.1 алгоритм, позволяет с целью контроля достоверности определения релаксационно-эксплуатационных параметров-характеристик арамидных текстильных материалов рассчитывать контрольные точки релаксационно-эксплуатационных процессов этих материалов.

На основе приведенного на рис. 5.1 алгоритма компьютерного определения параметров-характеристик релаксационно-эксплуатационных процессов арамидных текстильных материалов, были разработаны соответствующие программы для ЭВМ, приведенные в Приложении А.

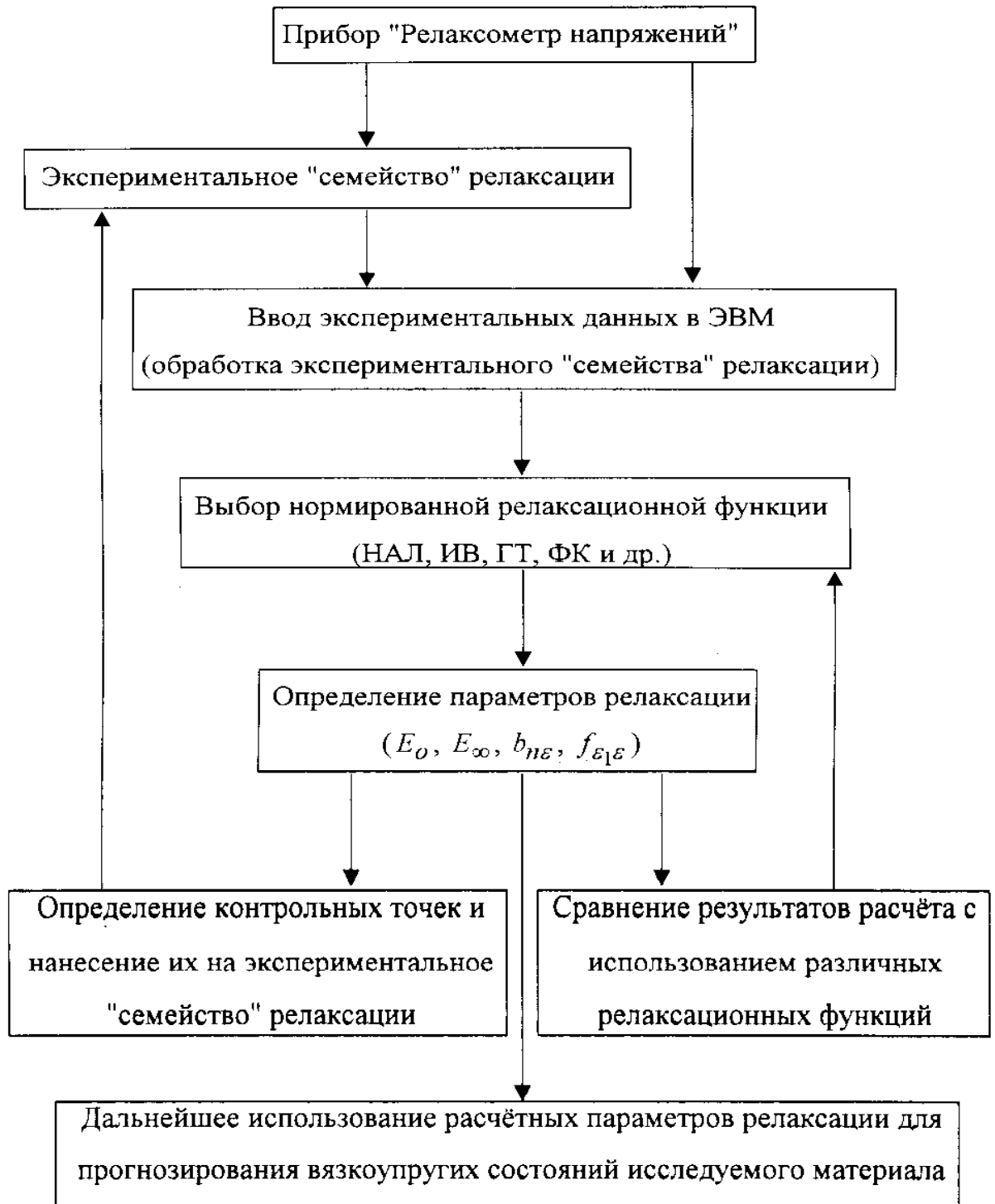


Рисунок 5.1 - Алгоритм цифрового определения параметров-характеристик релаксационно-эксплуатационных процессов арамидных текстильных материалов

Используя метод определения параметров-характеристик деформационно-эксплуатационных процессов арамидных текстильных материалов, составим соответствующий алгоритм (рис. 5.2).

Используя алгоритм, изображенный на рис. 5.2, можно по экспериментальному деформационному семейству арамидных текстильных материалов с учетом выбора соответствующей деформационной функции определять параметры-характеристики деформационно-эксплуатационных процессов этих материалов:

- начальную податливость D_o ;
- предельно-равновесную податливость D_∞ ;
- параметр интенсивности деформационно-эксплуатационного процесса $b_{n\sigma}$;
- функцию времен запаздывания $f_{\sigma_1\sigma}$.

Приведенный на рис. 5.2 алгоритм, позволяет с целью контроля достоверности определения деформационно-эксплуатационных параметров-характеристик арамидных текстильных материалов рассчитывать контрольные точки деформационно-эксплуатационных процессов этих материалов.

На основе приведенного на рис. 5.2 алгоритма компьютерного определения параметров-характеристик деформационно-эксплуатационных процессов арамидных текстильных материалов, были разработаны соответствующие программы для ЭВМ, приведенные в Приложении А.



Рисунок 5.2 - Алгоритм цифрового определения параметров-характеристик деформационно-эксплуатационных процессов арамидных текстильных материалов

Используя метод цифрового прогнозирования релаксационно-эксплуатационных процессов арамидных текстильных материалов, составим соответствующий алгоритм по указанному прогнозированию релаксационно-эксплуатационных процессов этих материалов (рис. 5.3).

Используя алгоритм, изображенный на рис. 5.3, можно не только прогнозировать релаксационно-эксплуатационные процессы арамидных текстильных материалов, но и определять доверительный интервал $(\sigma_t - \Delta\sigma_t, \sigma_t + \Delta\sigma_t)$ для прогнозируемого значения напряжения σ_t .

Алгоритм цифрового прогнозирования релаксационно-эксплуатационных процессов арамидных текстильных материалов, приведенный на рис. 5.3 позволяет проводить вычисления параллельно с несколькими выбранными релаксационными функциями, что, несомненно повышает достоверность и надежность такого прогнозирования.

Кроме того, алгоритм, приведенный на рис. 5.3, предусматривает сравнение прогнозируемого и экспериментального значений напряжения σ_t , а также вычисление относительной погрешности прогнозирования:

$$\delta = \frac{|\sigma_t - \sigma_{t \text{ эксп.}}|}{\sigma_t} \cdot 100\% . \quad (5.3)$$

На основе приведенного на рис. 5.3 алгоритма цифрового прогнозирования релаксационно-эксплуатационных процессов арамидных текстильных материалов, были разработаны соответствующие программы для ЭВМ, приведенные в Приложении А.

Используя метод цифрового прогнозирования деформационно-эксплуатационных процессов арамидных текстильных материалов, составим соответствующий алгоритм по указанному прогнозированию деформационно-эксплуатационных процессов этих материалов (рис. 5.4).

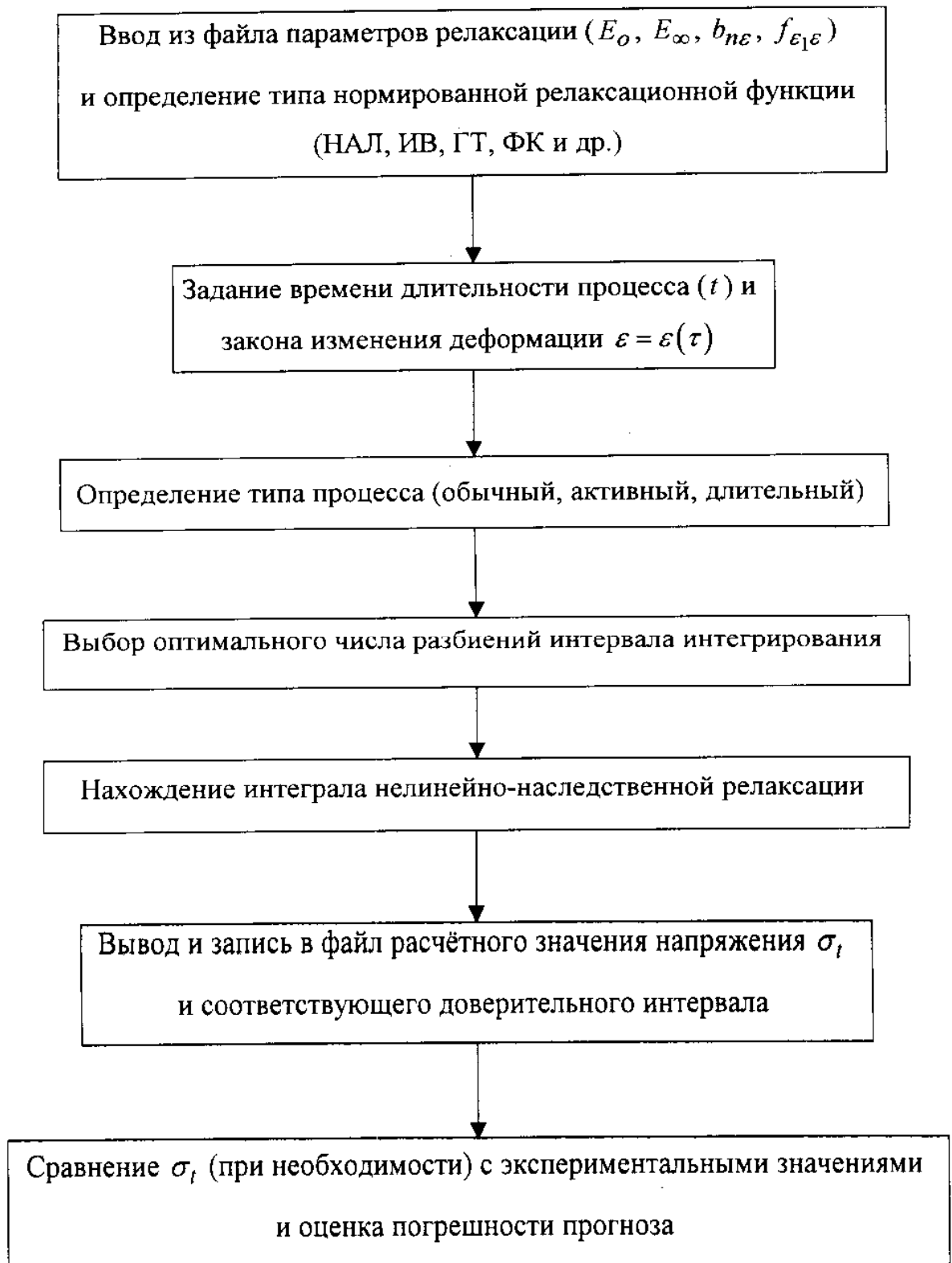


Рисунок 5.3 - Алгоритм цифрового прогнозирования релаксационно-эксплуатационных процессов арамидных текстильных материалов



Рисунок 5.4 - Алгоритм цифрового прогнозирования деформационно-эксплуатационных процессов арамидных текстильных материалов

Используя алгоритм, изображенный на рис. 5.4, можно не только прогнозировать деформационно-эксплуатационные процессы арамидных текстильных материалов, но и определять доверительный интервал $(\varepsilon_t - \Delta\varepsilon_t, \varepsilon_t + \Delta\varepsilon_t)$ для прогнозируемого значения деформации ε_t .

Алгоритм цифрового прогнозирования деформационно-эксплуатационных процессов арамидных текстильных материалов, приведенный на рис. 5.4 позволяет проводить вычисления параллельно с несколькими выбранными деформационными функциями, что, несомненно повышает достоверность и надежность такого прогнозирования.

Кроме того, алгоритм, приведенный на рис. 5.4, предусматривает сравнение прогнозируемого и экспериментального значений деформации ε_t , а также вычисление относительной погрешности прогнозирования:

$$\delta = \frac{|\varepsilon_t - \varepsilon_{t\text{эксп.}}|}{\varepsilon_t} \cdot 100\%. \quad (5.4)$$

На основе приведенного на рис. 5.4 алгоритма цифрового прогнозирования деформационно-эксплуатационных процессов арамидных текстильных материалов, были разработаны соответствующие программы для ЭВМ, приведенные в Приложении А.

Используя метод цифрового прогнозирования сложных деформационно-эксплуатационных процессов арамидных текстильных материалов, включая рассмотренные в четвертой главе деформационно-восстановительные процессы, составим соответствующий алгоритм по указанному прогнозированию сложных деформационно-эксплуатационных процессов этих материалов (рис. 5.5).

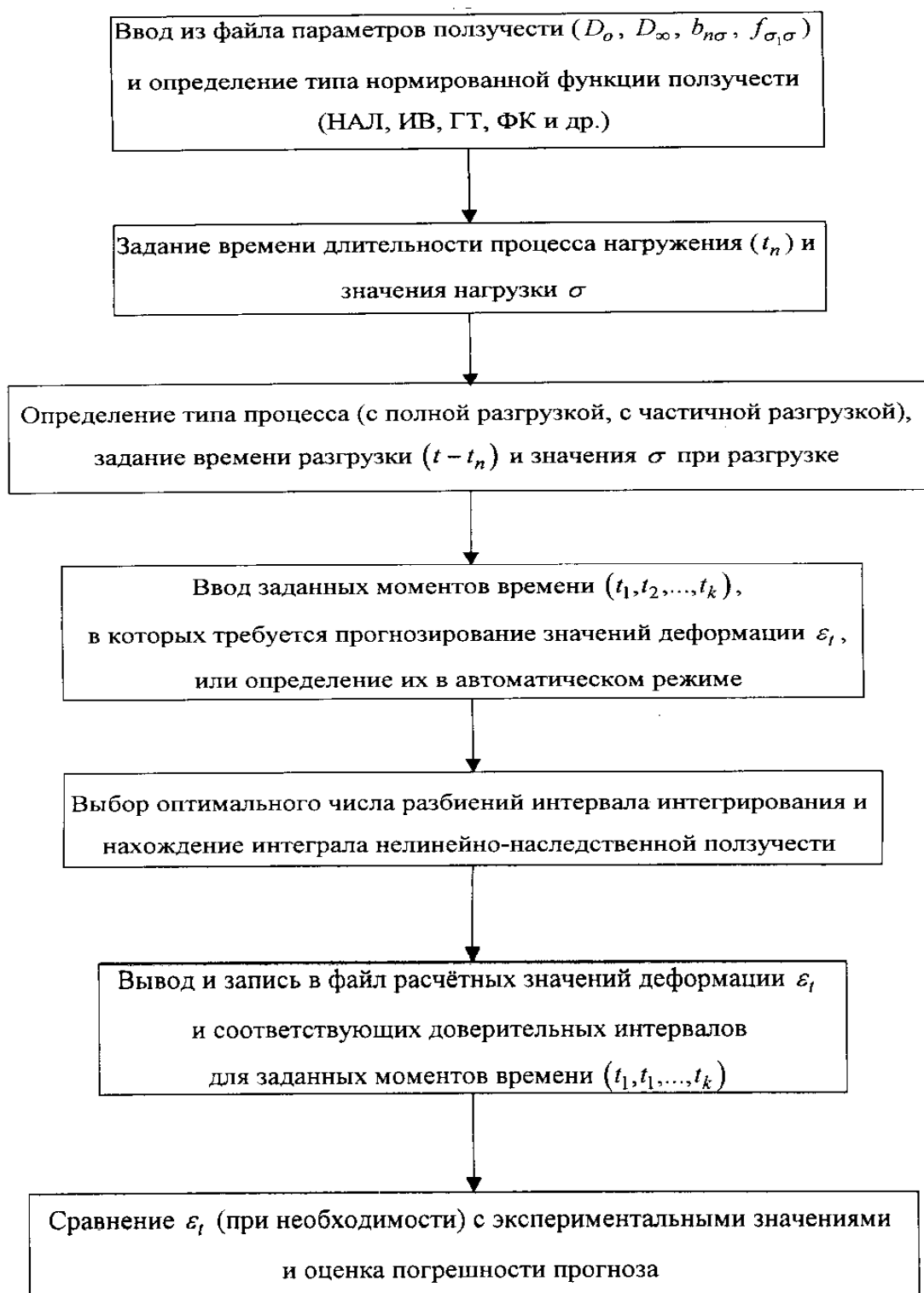


Рисунок 5.5 - Алгоритм цифрового прогнозирования сложных деформационно-эксплуатационных процессов арамидных текстильных материалов

Используя алгоритм, изображенный на рис. 5.5, можно не только прогнозировать деформационно-эксплуатационные процессы арамидных текстильных материалов различной степени сложности, но и определять доверительный интервал $(\varepsilon_t - \Delta\varepsilon_t, \varepsilon_t + \Delta\varepsilon_t)$ для прогнозируемого значения деформации ε_t .

Алгоритм цифрового прогнозирования сложных деформационно-эксплуатационных процессов, включая деформационно-восстановительные процессы, арамидных текстильных материалов, приведенный на рис. 5.5 позволяет проводить вычисления параллельно с несколькими выбранными деформационными функциями, что, несомненно, повышает достоверность и надежность такого прогнозирования.

Алгоритм, приведенный на рис. 5.5, предусматривает сравнение прогнозируемых и экспериментальных значений деформации ε_t , а также вычисление относительной погрешности прогнозирования.

На основе приведенного на рис. 5.5 алгоритма цифрового прогнозирования сложных деформационно-эксплуатационных процессов арамидных текстильных материалов, были разработаны соответствующие программы для ЭВМ, приведенные в Приложении А.

Используя метод цифрового прогнозирования сложных релаксационно-эксплуатационных процессов арамидных текстильных материалов, включая рассмотренные в четвертой главе процессы обратной релаксации, составим соответствующий алгоритм по указанному прогнозированию сложных релаксационно-эксплуатационных процессов этих материалов (рис. 5.6).

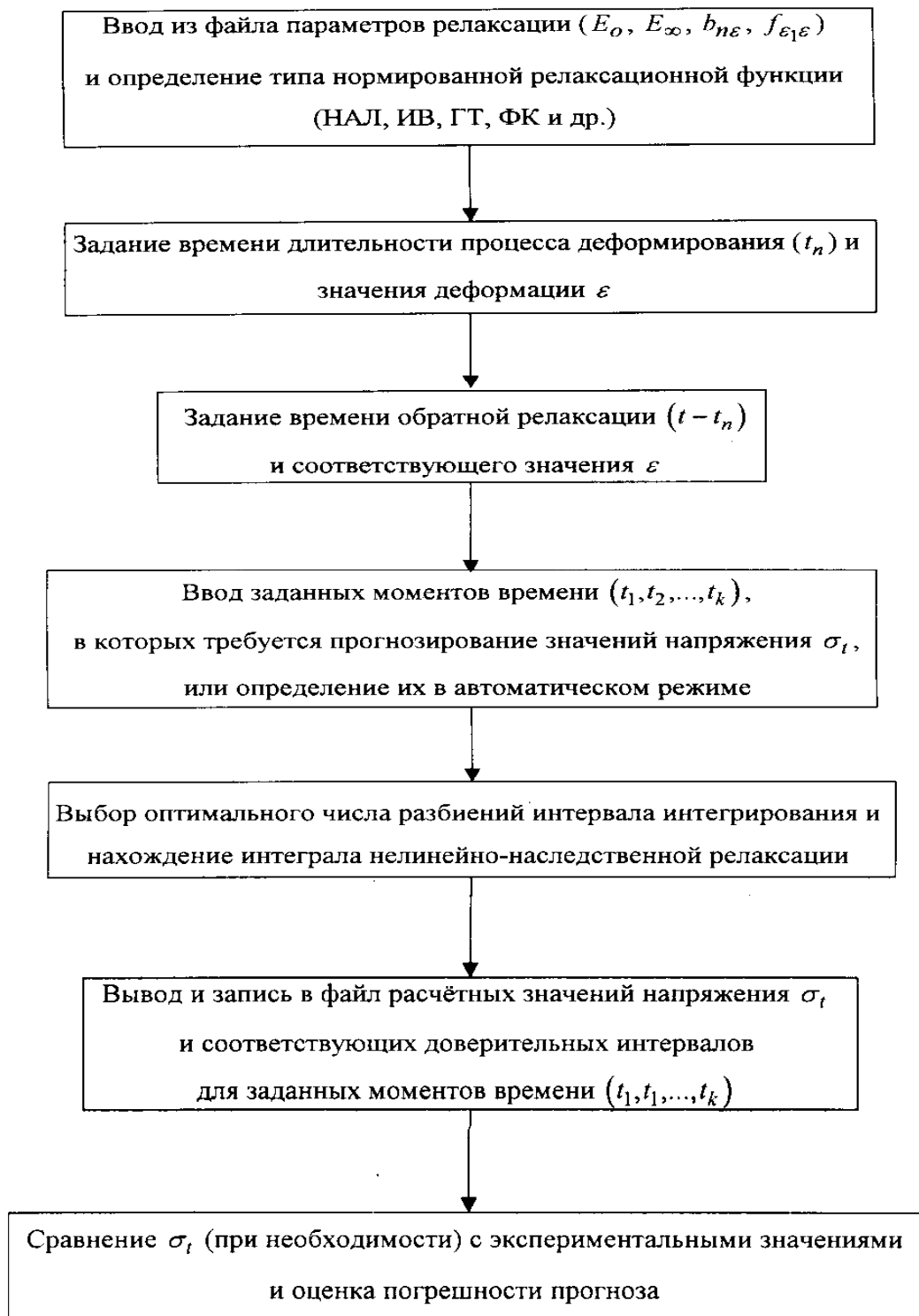


Рисунок 5.6 - Алгоритм цифрового прогнозирования сложных релаксационно-эксплуатационных процессов арамидных текстильных материалов

Используя алгоритм, изображенный на рис. 5.6, можно не только прогнозировать релаксационно-эксплуатационные процессы арамидных текстильных материалов различной степени сложности, но и определять доверительный интервал $(\sigma_t - \Delta\sigma_t, \sigma_t + \Delta\sigma_t)$ для прогнозируемого значения напряжения σ_t .

Алгоритм цифрового прогнозирования сложных релаксационно-эксплуатационных процессов, включая процессы обратной релаксации, арамидных текстильных материалов, приведенный на рис. 5.6 позволяет проводить вычисления параллельно с несколькими выбранными релаксационными функциями, что, несомненно, повышает достоверность и надежность такого прогнозирования.

Алгоритм, приведенный на рис. 5.6, предусматривает сравнение прогнозируемых и экспериментальных значений напряжения σ_t , а также вычисление относительной погрешности прогнозирования.

На основе приведенного на рис. 5.6 алгоритма цифрового прогнозирования сложных релаксационно-эксплуатационных процессов арамидных текстильных материалов, были разработаны соответствующие программы для ЭВМ, приведенные в Приложении А.

По результатам проведенных исследований были разработаны компьютерные алгоритмы и программы для ЭВМ:

- "Моделирование деформационных свойств полимерных материалов технического назначения в условиях переменной температуры";
- "Моделирование релаксационных свойств полимерных материалов технического назначения в условиях переменной температуры";



Рисунок 5.7 - Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026680897



Рисунок 5.8 - Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026680901

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026616484

**"Моделирование восстановительных свойств
полимерных материалов технического назначения в
условиях переменной температуры"**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна" (RU)*

Авторы: *Переборова Нина Викторовна (RU), Евдокимов Владислав Владимирович (RU), Гадалова Наталия Михайловна (RU), Тян Артур Вячеславович (RU)*

Заявка № 2026680123

Дата поступления **29 июня 2026 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 06 июля 2026 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Документ подписан электронной подписью
Сергей Юрьевич Зубов, 2019.04.10 14:08:41:500
Идентификатор: Зубов Юри́й Серге́евич
Сертификат: 00000000-00000000-00000000-00000000-00000000

Ю.С. Зубов



Рисунок 5.9 - Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026616484



о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026616485

"Моделирование эксплуатационных свойств полимерных материалов технического назначения в условиях переменной температуры"

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна" (RU)*

Авторы: *Переборова Нина Викторовна (RU), Евдокимов Владислав Владимирович (RU), Гадалова Наталия Михайловна (RU), Тянь Артур Вячеславович (RU)*

Заявка № 2026680122

Дата поступления **29 июня 2026 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 06 июля 2026 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Документ подписан электронной подписью
Сергей Юрьевич Зубов 2014.08.08 10:58
Имя: Зубов Юрий Сергеевич
E-mail: zuboys@yandex.ru 2014.08.08

Ю.С. Зубов



Рисунок 5.10 - Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026616485



Рисунок 5.11 - Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026680445



Рисунок 5.12 - Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026667644

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026667321

**"Качественная оценка восстановительных свойств
одноосно ориентированных полимерных материалов в
условиях переменной температуры"**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна" (РУ)*

Авторы: *Переборова Нина Викторовна (RU), Егорова Марина
Авинировна (RU), Егоров Иван Михайлович (RU), Евдокимов
Владислав Владимирович (RU)*

Заявка № 2026666107

Дата поступления 26 мая 2026 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **08 июня 2026 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ВОПРОСЫ ПОДПИСАН ИЛИ НЕ ПОДПИСАН

Сергей Юрьевич Зубов, д.т.н., проф., зав. кафедрой
Ученый, Зубов Игорь Сергеевич
Заблуждение о «защите» от 09.08.2005 по 01.11.2005

Ю.С. Зубов

Рисунок 5.13 - Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026667321



Рисунок 5.14 - Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026680449

- "Моделирование восстановительных свойств полимерных материалов технического назначения в условиях переменной температуры";
- "Моделирование эксплуатационных свойств полимерных материалов технического назначения в условиях переменной температуры";
- "Качественная оценка восстановительных свойств одноосно ориентированных полимерных материалов в условиях переменной температуры";
- "Качественная оценка релаксационных свойств полимерных материалов медицинского назначения в условиях переменной температуры";
- "Качественная оценка релаксационных свойств полимерных материалов двойного назначения в условиях переменной температуры";
- "Качественная оценка восстановительных свойств полимерных материалов двойного назначения в условиях переменной температуры", свидетельства на государственную регистрацию которых приведены на рис. 5 - рис. 12.

5.4. Выводы по главе 5

Методы, разработанные и приведённые в настоящей работе, находят своё применение как в научных и учебных целях - при исследовании функциональных свойств арамидных текстильных материалов, так и в технологических целях - для целенаправленного отбора образцов материалов, обладающих определенными упругими и вязкоупруго-пластическими свойствами.

Применение разработанных методов на практике заметно упрощается благодаря компьютеризации соответствующих вычислительных процессов.

Включение методов определения характеристик и прогнозирования релаксационных, деформационных и восстановительных процессов в единые программные пакеты определяет их универсальность и возможность использования при прогнозировании любых вязкоупругих процессов арамидных текстильных материалов.

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

Исследование упругих и поглощаемых компонент механической работы деформирования позволяет детально качественно проанализировать вязкоупругие свойства материалов.

На основе методов моделирования функциональных свойств арамидных текстильных материалов разработаны компьютерные методы решения задач нелинейно-наследственной вязкоупругости.

Указанные методы позволяют решать технологические задачи отбора образцов материалов, обладающих оптимальными функциональными свойствами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработанные математические модели функциональных процессов арамидных текстильных материалов на основе функции НАЛ является основой для дальнейшего цифрового прогнозирования указанных свойств изучаемых материалов.

2. Разработанные на основе математического моделирования функциональных свойств арамидных текстильных материалов цифровые методы прогнозирования указанных свойств этих материалов позволяют с достаточной степенью точности проводить оценку функциональности различных арамидных материалов.

3. Разработанные на основе цифровых технологий компьютерные алгоритмы и программы для ЭВМ по прогнозированию функциональных свойств арамидных текстильных материалов являются основой для проведения системного анализа указанных свойств изучаемых материалов.

4. Разработанные методы системного анализа функциональных свойств арамидных текстильных материалов являются основой для целенаправленного отбора образцов изучаемых материалов и проведения сравнительного анализа их функциональности.

5. Разработанные методы проведения сравнительного анализа функциональности арамидных текстильных материалов позволяют получать рекомендации по проектированию новых материалов, обладающих заданными функциональными свойствами, а также выявлять зависимость этих свойств от компонентного состава.

6. Разработанные в диссертации математические модели функциональных свойств арамидных текстильных материалов и методы цифрового прогнозирования этих свойств являются достаточно универсальными и могут быть применены для оценки функциональности других полимерных материалов.

Библиографический список использованной литературы

1. Вундерлих Б. Физика макромолекул. -М.: Мир, 1976. Т. 1. -624 с.
2. Вундерлих Б. Физика макромолекул.-М.: Мир, 1979. Т. 2. -576 с.
3. Джейл Ф. К. Полимерные монокристаллы. -Л.: Химия, 1968. -552 с.
4. Уорд И. Механические свойства твёрдых полимеров. -М.:Химия, 1975. - 350с.
5. Физика полимеров. Перевод с английского. М.: Мир, 1969, 322 с.
6. Бартенев Г.М., Френкель С.Я. Физика полимеров. Л.: Химия, 1990, 430с.
7. Бартенев Г.М., Зеленов Ю.В. Физика и механика полимеров. -М.: Высшая школа. 1983. -392 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. Архангельский А. Г. Учение о волокнах. -М.: Гизлегпром, 1938. -480 с.
11. Диллон И. Х.//В кн.: Усталость полимеров. -М.: Госхимиздат, 1957, -с. 5-116.
12. Рабинович А.Л. Введение в механику армированных полимеров. М., Наука, 1970, 482 с.
13. Ростиашвили В.Г., Иржак В.И., Розенберг Б.А. Стеклование полимеров. Л.: Химия, 1987, 188с.
14. Ван Кревелен Д.В. Свойства и химическое строение полимеров. -М.: Химия, 1976. -416 с.
15. Бартенев Г.М. Структура и релаксационные свойства эластомеров. -М.: Химия, 1979. - 288с.

16. Бартенев Г.М., Зеленов Ю. В. Курс физики полимеров. -М.: Химия, 1976. -288 с.
17. Бирштейн Т.М., Птицин О.Б, Конформации макромолекул. М.: Наука, 1964,392с.
18. Перепелкин К.. Е. Структурная обусловленность механических свойств высокоориентированных волокон. -М.: НИИТЭХИМ, 1970. -72 с.
19. Перепелкин К.Е. Физическое материаловедение ориентированных полимерных волокон//В кн. Механические свойства и износостойкость текстильных материалов. Вильнюс - Каунас, 1971, с. 7-14.
20. Овчинников В.А., Жоров В.А., Баскаев З.П. Упругость кристаллической решетки полиэтилентерефталата//Механика полимеров, 1972, № 6, с.982-986.
21. Рейнер М. Реология. Пер. с англ. М.: Наука, 1965, 224 с.
22. Бродская Л.И., Геллер В.Э. Изучение оптической анизотропии по толщине полиэфирного моноволокна. - Хим. волокна, 1973,№ 2,с.48-50.
23. Начинкин О.И. О форме поперечного сечения химических волокон. - Хим. волокна, 1973, № 2, с.28-30.
24. Носов М.П., Пахомова Л.Н. О радиальной неоднородности капроновых волокон//Изв.вузов. Технология легкой промышленности, 1964, № 2, с. 73-78.
25. Веттегрень В.И., Марихин В.А., Мясникова Л.П., Чмель А.//Высокомолекулярные соединения, 1975, сер. А, т. 17, № 7, -с. 1546-1549.
26. Веттегрень В.И., Воробьев В.М., Фридлянд К.Ю.//Высокомолярные соединения, 1977, сер. Б, т. 19, № 4, -с. 266-269.
27. Веттегрень В.И. Автореф. канд. дис. -Л.: ФТИ АН СССР им. А. Ф. Иоффе. 1970.

28. Волькенштейн М.В. Конфирмационная статистика полимерных цепей. - М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1959. -468 с.
29. Берестнев В.А., Флексер Л.А., Лукьянова Л.М. Макроструктура волокон и элементарных нитей и особенности их разрушения. -М.: Лег. и
30. Вульфсон С.З. Температурные напряжения в бетонных массивах с учётом ползучести бетона//Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. - 1960, №1, с. 162-165.
31. Герасимова Л.С., Семенова Т.П. Макроструктура синтетических нитей, сформованных из расплава полимера. -М.: НИИТЭХИМ, 1979. -22 с.
32. 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.
33. Гинзбург Б.М., Султанов Н.//Высокомолекулярные соединения, 2001, т. 43, № 7, с. 1140 - 1151.
34. 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.
35. Годовский Ю.К. Теплофизика полимеров. М.: Химия, 1982, 280 с.
36. Гольберг И.И. Механическое поведение полимерных материалов. -М.: Химия, 1970. -192 с.
37. Гольдман А.Я. Прогнозирование деформационно-прочностных свойств полимерных и композиционных материалов. -Л.: Химия, 1988. -272с.
38. Готлиб Ю.Я., Даринский А.А., Светлов Ю.Е. Физическая кинетика макромолекул. Л.: Химия, 1986, 272 с.
39. Гросберг А.Ю., Хохлов А.Р. Статистическая физика макромолекул. М.: Наука, 1989, 344 с.

40. Ержанов Ж.С. Теория ползучести горных пород и её приложения. - Алма-Ата, 1964. -175с.
41. Журков С. Н; Томашевский Э. К. Некоторые проблемы прочности твердого тела. -М.: Изд-во АН СССР, 1959, -с.68-75.
42. Индрияс Ю.П.//В кн.: Новые методы исследования строения, свойств и оценка качества текстильных материалов. Материалы IX Всесоюз. конф. по текст, материаловедению. Минск, Высшая школа, 1977, -с. 98-101.
43. Каргин В. А., Слонимский Г. Л. Краткие очерки по физикохимии полимеров. -М.: Химия, 1967. -232 с.
44. Кацнельсон М.Ю., Балаев Г.А. Полимерные материалы. -Л.: Химия, 1982. -317с.
45. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. Пер. с англ. М.: Наука, 1978, 780с.
46. Кобеко П.П. Аморфные вещества. Л.: Изд. АН СССР, 1952, 432 с.
47. Мак-Келви Д.М. Переработка полимеров. -М.: Химия, 1965. -444 с.
48. Манделькern Л. Кристаллизация полимеров. – М.-Л.: Химия, 1966. -336 с.
49. Манин В.Н., Громов А.Н. Физико-химическая стойкость полимерных материалов в условиях эксплуатации. -Л.: Химия, 1980. -248 с.
50. Марихин В.А., Мясникова Л.П. Надмолекулярная структура полимеров. –Л.:Химия, 1977. – 240 с.
51. Марихин В.А., Мясникова Л.П., Викторова Н.Л.//Высокомол. соедин., 1976, сер. А, т. 18, № 6, -с. 1302-1309.
52. Мереди́т Р.//В кн.: Физические методы исследования текстильных материалов. -М.: Гиз.легпром, 1963, -с. 203-241.
53. Мешков С.И. Вязко-упругие свойства металлов. -М., 1974. -192с.

54. Мортон В.Е., Херл Д.В.С. Механические свойства текстильных волокон. -М.: Лег. индустрия, 1971. -184с.
55. Москвитин В.В. Сопротивление вязкоупругих материалов применительно к зарядам ракетных двигателей на твёрдом топливе. -М.: Наука, 1972. - 327 с.
56. Нильсон Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций. -М.: Химия, 1978. -312 с.
57. Носов М.П. Динамическая усталость полимерных нитей. –Киев: Гостехиздат УССР, 1963. -196 с.
58. Носов М.П., Теплицкий С.С. Усталость нитей. –Киев: Техника, 1970. - 176с.
59. Перепечко И.И. Акустические методы исследования полимеров. -М.: Химия, 1973. -296с.
60. Рысюк Б.Д., Носов М.П. Механическая анизотропия полимеров. –Киев: Наук. думка, 1978. -232 с.
61. Сакурада Н., Ито Т., Накамае К. Модули упругости кристаллических решеток полимеров//Химия и технология полимеров, 1964, № 10, с.19-36.
62. Саркисов В.Ш., Тиранов В.Г. Нелинейная вязкоупругость в механических моделях.- Астрахань: АГТУ, 2001.- 240 с.
63. Сверхвысокомодульные полимеры//Под ред. А.Чиффери и И.Уорда. Пер. с англ. Л.: Химия, 1983, 272 с.
64. Тагер А. А. Физикохимия полимеров, 3-е изд., испр. и доп. М., Химия, 1978. 544 с.
65. Тамупс В.П., Куксенко В.С. Микромеханика разрушения полимерных материалов. Рига. Зинатне, 1978, 294 с.
66. Тобольский А. Свойства и структура полимеров. Пер. с англ. М.: Химия, 1964,322с.

67. Трелоар Л. Физика упругости каучука. Пер. с англ. Л.: ИЛД953, 240 с.
68. Труевцев Н.Н., Легезина Г.И., Петрова Л.Н., Галахов А.В. Исследование деформационных свойств льносодержащей пряжи различных способов прядения//Изв. вузов. Технология текстильной промышленности, 2002, № 2. С.20-22.
69. Флори П. Статистическая механика цепных молекул. -М.: Мир, 1971. - 440 с.
70. Хёрл Д.В.С., Петерс Р.Х. Структура волокон. – М.:Химия, 1969. – 400с.
71. Хопкинс И., Керкджиан К. Физическая акустика. Пер. с англ. М.: ИЛ, 1969, Т.2. Часть Б, с.110.
72. Цветков В.Н. Жесткоцепные полимерные молекулы. Л.: Наука, 1985, 380с.
73. Цобкалло Е.С., Тиранов В.Г., Громова Е.С. Влияние уровня предварительного деформирования на жесткость синтетических нитей//Химические волокна, №3, 2001. С. 45-48.
74. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. ФМ, М.,1963,848 с.
75. Перепелкин К.Е. Межмолекулярные взаимодействия в волокнообразующих линейных полимерах и их некоторые механические свойства//Механика полимеров, 1971, № 5, с.790-795.
76. Перепелкин К.Е. Основные закономерности ориентирования и релаксации химических волокон на основе гибко- и жесткоцепных полимеров. -М.: НИИТЭХИМ, 1977. -48 с.
77. Перепелкин К. Е. Физико-химические основы процессов формирования химических волокон. -М.: Химия, 1978. -320 с.
78. Перепелкин К.Е. Самопроизвольное (спонтанное) ориентирование и удлинение химических волокон и пленок. -М.: НИИТЭХИМ, 1980. -56 с.

79. Перепелкин К.Е. Структура и свойства волокон. –М.: Химия, 1985. – 208 с.
80. Аскадский А.А., Матвеев Ю. И. Химическое строение и физические свойства полимеров. -М.: Химия, 1983. -248 с.
81. Аскадский А.А. Структура и свойства теплостойких полимеров. -М.: Химия, 1981. -320 с.
82. Аскадский А.А. Деформация полимеров. -М.: Химия, 1973. -448 с.
83. Победря Б.Е. Механика композиционных материалов. -М.: Изд-во Московск. ун-та, 1984. -336с.
84. Попов Л.Н., Маланов А.Г., Слуцкер Г.Я., Сталевич А.М. Вязкоупругие свойства технических тканей//Хим. волокна. -1993, №3, с. 42-44.
85. Шермергор Т.Д. Теория упругости микронеоднородных сред. -М.,1977. - 400с.
86. Бреслер С.Е., Ерусалимский Б.Л. Физика и химия макромолекул. -М.: Наука, 1965. -512 с.
87. Сорокин Е.Я., Перепелкин К.Е. Неравномерность свойств химических волокон. –М: НИИТЭХИМ, 1975. -34 с.
88. Уржумцев Ю.С., Максимов Р.Д. Прогностика деформативности полимерных материалов. -Рига: Знание, 1975, 416 с.
89. Уржумцев Ю.С. Прогнозирование длительного сопротивления полимерных материалов. - М.: Наука, 1982. -222с.
90. Слонимский Г.Л. О законе деформации высокоэластичных полимерных тел//Доклады АН СССР. - 1961, т.140, с. 343.
91. Слонимский Г.Л. Релаксационные процессы в полимерах и пути их описания//Высокомолекулярные соединения. Сер.А. -1971, т.13, №2, с. 450-460.

92. Слонимский Г.Д., Аскадский А.А., Китайгородский А.И.//Высокомолекулярные соединения, 1970, сер. А, т. 12, № 3, -с. 494-512.
93. Шермергор Т.Д. Реологические характеристики упруго-вязких материалов, обладающих асимметричным релаксационным спектром//Инж. журнал. -1967, №5, с. 73-83.
94. Ильющин А.А. Пластичность. Ч.1. Упруго-пластические деформации. - М.-Л.: Гостехиздат, 1948. - 376 с.
95. Ильющин А.А., Победря Б.Е. Основы математической теории термовязко-упругости. -М., 1970. -280с.
96. Колтунов М.А. Ползучесть и релаксация. - М., 1967. - 277 с.
97. Кристенсен Р. Введение в теорию вязкоупругости. -М., 1974. -338с.
98. Ферри Дж. Вязкоупругие свойства полимеров. -М.: ИЛ, 1963. - 535с.
99. Бленд Д. Теория линейной вязкоупругости. -М.,1965. -199с.
100. Арутюнян Н.Х. Некоторые вопросы теории ползучести. -М.-Л.: Гостехиздат, 1952.- 323 с.
101. Бугаков И.И. Ползучесть полимерных материалов. - М.: Наука, 1973. - 288 с.
102. Кукин Г.Н., Соловьев А.Н. Текстильное материаловедение. -М.: Легпромбытиздат, 1985. Т. 1. -214 с.
103. Кукин Г.Н., Соловьев А.Н., Кобляков А.И. Текстильное материаловедение. -М.: Легпромбытиздат, 1989. Т. 2. -350 с.
104. Кукин Г.Н., Соловьев А.Н., Кобляков А.И. Текстильное материаловедение. -М.: Легпромбытиздат, 1992. Т. 3. -272 с.
105. Смит Т.Л. Эмпирические уравнения для вязкоупругих характеристик и вычисления релаксационных спектров//В кн.: Вязкоупругая релаксация в полимерах. -М.: Мир, 1974. 270 с.

106. Феодоровский Г.Д. Определяющие уравнения реологически сложных полимерных сред//Вестник Ленингр. ун-та. Матем., механ., астрон. - 1990, №15, вып.3. - С. 87-91.
107. Щербаков В.П. Прикладная механика нити.- М.: РИО МГТУ им. А.Н.Косыгина, 2001.
108. Щербаков В.П., Коган В.М. Уточнение и дополнение к решению задачи о равновесии упругой нити на цилиндре// Изв. вузов. Технология лёгкой промышленности. -2003, №2, с. 86-91, №4, с. 71-77.
109. Щербаков В.П., Цыганов И.Б., Заваруев В.А. Контактное взаимодействие скрученных нитей// Изв. вузов. Технология лёгкой промышленности. -2003, №3, с. 91-94, №5, с. 77-79.
110. Щербаков В.П., Цыганов И.Б., Заваруев В.А. Расчет упругих модулей и прочности крученой нити методами теории упругости анизотропного тела// Изв. вузов. Технология лёгкой промышленности. -2003, №6, с. 81-86.
111. Шермергор Т.Д. Описание наследственных свойств материала при помощи суперпозиции операторов//В кн.: Механика деформируемых тел и конструкций. -М., 1975. -С. 528-532.
112. Бугаков И.И. Определяющие уравнения для материалов с фазовым переходом//Механика твёрдого тела. -1989, №3, с. 111-117.
113. Бугаков И.И. О принципе сложения как основе нелинейных определяющих уравнений для сред с памятью//Механика твёрдого тела. - 1989, №5, с. 83-89.
114. Бугаков И.И. О связи уравнений Гуревича с уравнениями наследственного типа//Вестник Ленингр. ун-та. Матем., механ., астрон. - 1976, №1, с. 78-80.

115. Сталевич А.М. Кинетический смысл релаксационных функций у высокоориентированных полимеров//Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. -1980, №3, с. 106-107.
116. Сталевич А.М., Роот Л.Е. Зависимость модуля упругости высокоориентированных синтетических нитей от степени деформации//Хим. волокна. -1980, №5, с. 36-37.
117. Сталевич А.М., Тиранов В.Г., Слущер Г.Я. Температурно-силовая зависимость вязкоупругих эффектов у высокоориентированных нитей из ароматического полиамида//Хим. волокна.- 1981, №1. С. 31-33.
118. Александров А.П. Морозостойкость высокомолекулярных соединений//В сб.: Труды I и II конференций по высокомолекулярным соединениям. -М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1945. -С. 49 - 50.
119. Александров А.П., Журков С.Н. Явление хрупкого разрыва. -М.: Гос-техтеориздат, 1933. -52 с.
120. Аскадский А.А. Новые возможные типы ядер релаксации//Механика композитных материалов. -1987, №3, с. 403-409.
121. Аскадский А.А., Худошев И.Ф.//В кн.: Химия и технология высокомолекулярных соединений. Итоги науки и техники. -М.: ВИНТИ, 1983. Т. 18, -с. 152-197.
122. Бугаков И.И., Чеповецкий М.А. Исследование уравнения Работнова//Изв. АН СССР. Механика твёрдого тела. -1988, №3. -С. 172-175.
123. Volterra V. Legens sur les fonctions de lignes. -Paris, 1913. -230p.
124. Вольтерра В. Теория функционалов, интегральных и интегро-дифференциальных уравнений.- М.: Наука, 1982. -304 с.

125. Havriliak S., Negami S. A complex plan representation of dielectric and mechanical relaxation processes in some polymers//Polymer. -1967, v.8, №4, p. 161-210.
126. Гаврильяк С., Негами С. Анализ α -дисперсии в некоторых полимерных системах методом комплексных переменных//В кн.: Переходы и релаксационные явления в полимерах. -М.,1968. -С.118-137.
127. Гуревич Г.И. О законе деформации твёрдых и жидких тел//Журн. технич. физики. -1947, 17, №12, с. 1491-1502.
128. Екельчик В.С., Ривкид В.Н. Аналитическое описание линейной анизотропной ползучести тканевых стеклопластиков различных схем армирования//В кн.: Свойства полиэфирных стеклопластиков и методы их контроля. -1970, вып.2, с.151-167.
129. Екельчик В.С. О выборе ядер определяющих уравнений теории наследственной упругости//Вопросы судостроения. Технология судостроения. -1979, вып. 23, с. 75-79.
130. Екельчик В.С., Рябов В.М. Об использовании одного класса наследственных ядер в линейных уравнениях вязкоупругости//Механика композитных материалов. -1981, №3, с. 393-404.
131. Persoz B. Le Principe de Superposition de Boltzmann//In col.: Cahier Groupe Franc. Etudees Rheol. -1957, v.2, p. 18-39.
132. Работнов Ю.Н. Равновесие упругой среды с последствием//Прикл. математика и механика. -1948, т. 12, №1, с. 53-62.
133. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов и конструкций. -М.,1966. -752 с.
134. Работнов Ю.Н., Паперник Л.Х., Степанычев Е.И. Описание ползучести композиционных материалов при растяжении и сжатии//Механика полимеров. -1973, №5, с. 779-785.

135. Работнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твёрдых тел. -М.: Наука, 1977. -384с.
136. Работнов Ю.Н. Введение в механику разрушения. -М.: Наука, 1987. - 80с.
137. Ржаницын А.Р. Некоторые вопросы механики систем, деформирующихся во времени. -М.,1949.-252с.
138. Ржаницын А.Р. Теория ползучести. -М.: Стройиздат, 1968. - 416 с.
139. Сталевич А.М. Деформирование высокоориентированных полимеров. Теория линейной вязкоупругости: Конспект лекций. Ч.1. - СПб: СПГУТД, 1995. -80с.
140. Сталевич А.М. Деформирование высокоориентированных полимеров. Теория нелинейной вязкоупругости: Конспект лекций. Ч.2. - СПб: СПГУТД, 1997. -197с.
141. Сталевич А.М. Деформирование ориентированных полимеров.– СПб.: СПГУТД, 2002. - 250 с.
142. Макаров А.Г., Демидов А.В., Сталевич А.М. Вариант моделирования нелинейно-наследственной вязкоупругости полимерных материалов//Механика твердого тела, 2009, № 1, с. 155-165.
143. Макаров А.Г., Демидов А.В., Сталевич А.М. Вариант прогнозирования нелинейно-наследственной вязкоупругости полимеров//Прикладная механика и техническая физика, 2007, т. 48, №5, с. 34 - 44.
144. Макаров А.Г., Демидов А.В., Сталевич А.М. Вариант математического моделирования деформационных процессов синтетических нитей//Химические волокна, 2007, № 6, с. 55 - 58.

145. Вагнер В.И., Евдокимов В.В., Чуркин К.С., Колодин А.А. Энергетическая оценка деформационных процессов полимерных материалов// Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности - 2023 - 3, с. 5-8.
146. Киселев С.В., Евдокимов В.В.. Математическое моделирование релаксационно-деформационных процессов арамидных текстильных материалов// Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности - 2025, № 6, с. 83-86.
147. Евдокимов В.В. Системный анализ деформационно-восстановительных процессов арамидных текстильных материалов// Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности - 2025, № 6, с. 44-47.
148. Евдокимов В.В., Переборова Н.В. Вариант оценки эксплуатационных и функциональных свойств полимерных текстильных нитей// Дизайн. Материалы. Технология - 2026, № 2, с. 104-109.
149. Переборова Н.В., Вагнер В.И., Евдокимов В.В. Расчет упругих, вязкоупругих и пластических компонент деформации полимерных текстильных материалов//Химические волокна, 2026, № 3, с. 47-51.
150. Макаров А.Г., Евдокимов В.В., Чуркин К.С., Рыжов Ф.С., Добрякова М.Г., Матвеев В.С. Релаксационные процессы полимерных материалов с позиции спектральной теории //Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки, 2023, № 2, с. 88-92.
151. Киселев С.В., Козлов А.А., Евдокимов В.В. Моделирование ползучести геотекстильных нетканых материалов// Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки, 2026, № 1, с. 5-8.

152. Егорова М.А., Егоров И.М., Евдокимов В.В. Компоненты деформации геотекстильных нетканых материалов// Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки, 2026, № 1, с. 40-43.
153. Егорова М.А., Егоров И.М., Евдокимов В.В. Математическое моделирование и автоматизированный расчет эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии, 2026 – 2, с. 5-9.
154. Переборова Н.В., Вагнер В.И., Евдокимов В.В. Разложение на компоненты полной деформации полимерных текстильных материалов//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии, 2026 – 2, с. 108-112.
155. Егорова М.А., Евдокимов В.В. Разработка методов математического моделирования и расчета эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов// Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки, 2026, № 2, с. 58-63.
156. Егоров И.М. Евдокимов В.В. Метод разложения полной деформации полимерных текстильных материалов на составные компоненты // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки, 2026, № 2, с. 72-76.
157. Переборова Н.В., Евдокимов В.В. Методология математического моделирования ползучести полимерных текстильных нитей// Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки, 2026, № 2, с. 91-95.

158. Евдокимов В.В., Егорова М.А., Егоров И.М. Цифровое прогнозирование эксплуатационных процессов полимерных текстильных материалов// Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки, 2026 – 3, с. 27-31.
159. Макаров А.Г., Евдокимов В.В. Цифровое прогнозирование деформационных процессов полимерных материалов//Всероссийская научная конференция с международным участием "Инновации молодежной науки". Часть 2 - 2026, с. 23-24.
160. Евдокимов В.В. Сравнительный анализ деформационных свойств арамидных текстильных материалов//Всероссийская научная конференция с международным участием "Инновации молодежной науки". Часть 2 - 2026, с. 25-27.
161. Переборова Н.В., Евдокимов В.В. Разложение деформации полимерных материалов на упругую и вязкоупругую составляющую//Всероссийская научная конференция с международным участием "Инновации молодежной науки". Часть 2 - 2026, с. 27-28.
162. Переборова Н.В., Егорова М.А., Егоров И.М., Евдокимов В.В. Качественная оценка восстановительных свойств одноосно ориентированных полимерных материалов в условиях переменной температуры. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026667321. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 08.06.2026.

163. Переборова Н.В., Киселев С.В., Вагнер В.И., Евдокимов В.В. Качественная оценка релаксационных свойств полимерных материалов медицинского назначения в условиях переменной температуры. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026667644. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 09.06.2026.
164. Переборова Н.В., Киселев С.В., Вагнер В.И., Евдокимов В.В. Качественная оценка релаксационных свойств полимерных материалов двойного назначения в условиях переменной температуры. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026680445. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 10.07.2026.
165. Переборова Н.В., Егорова М.А., Егоров И.М., Евдокимов В.В. Качественная оценка восстановительных свойств полимерных материалов двойного назначения в условиях переменной температуры. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026680449. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 10.07.2026.
166. Переборова Н.В., Евдокимов В.В., Гадалова Н.М., Тянь А.В. Моделирование деформационных свойств полимерных материалов технического назначения в условиях переменной температуры. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026680897. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29.06.2026.

167. Переборова Н.В., Евдокимов В.В., Гадалова Н.М., Тянь А.В. Моделирование релаксационных свойств полимерных материалов технического назначения в условиях переменной температуры. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026680901. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13.07.2026.
168. Переборова Н.В., Евдокимов В.В., Гадалова Н.М., Тянь А.В. Моделирование восстановительных свойств полимерных материалов технического назначения в условиях переменной температуры. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026616484. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29.06.2026.
169. Переборова Н.В., Евдокимов В.В., Гадалова Н.М., Тянь А.В. Моделирование эксплуатационных свойств полимерных материалов технического назначения в условиях переменной температуры. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026616485. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 29.06.2026.

ПРИЛОЖЕНИЕ А.

СВИДЕТЕЛЬСТВА О РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММ ДЛЯ ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026680897

**"Моделирование деформационных свойств полимерных
материалов технического назначения в условиях
переменной температуры"**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна" (RU)*

Авторы: *Переборова Нина Викторовна (RU), Евдокимов Владислав Владимирович (RU), Гадалова Наталия Михайловна (RU), Тянь Артур Вячеславович (RU)*



Заявка № 2026680046

Дата поступления **29 июня 2026 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 13 июля 2026 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Документ подписан Электронной подписью
Сертификат: 22607070.1.1.10116820820101506
Идентификатор: 22607070.1.1.10116820820101506
Действителен до: 2025-10-31 11:50:55

Ю. С. Зубов

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2026680897

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026680901

"Моделирование релаксационных свойств полимерных материалов технического назначения в условиях переменной температуры"

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» (RU)*

Авторы: *Переборова Нина Викторовна (RU), Ебдокимов Владислав Владимирович (RU), Гадалова Наталия Михайловна (RU), Тянь Артур Вячеславович (RU)*

Заявка № 2026680048

Дата поступления **29 июня 2026 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 13 июля 2026 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Сергей Юрьевич Лобанов, и.о. заместителя
директора, Лобанов Юрий Сергеевич
Заступник от 09.09.2005 по 31.11.2005

Ю.С. Зубов



Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2026680901

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026616484

**"Моделирование восстановительных свойств
полимерных материалов технического назначения в
условиях переменной температуры"**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна" (RU)*

Авторы: *Переборова Нина Викторовна (RU), Евдокимов Владислав Владимирович (RU), Гадалова Наталия Михайловна (RU), Тянь Артур Вячеславович (RU)*

Заявка № 2026680123

Дата поступления **29 июня 2026 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 06 июля 2026 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Сергей Юрьевич Зубов
Иван Сергеевич Зубов
09.09.2025 г. № 111.2025

Ю.С. Зубов



Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2026616484

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026616485

**"Моделирование эксплуатационных свойств
полимерных материалов технического назначения в
условиях переменной температуры"**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования "Санкт-
Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна" (RU)*

Авторы: *Переборова Нина Викторовна (RU), Евдокимов
Владислав Владимирович (RU), Гадалова Наталия
Михайловна (RU), Тян Артур Вячеславович (RU)*

Заявка № **2026680122**
Дата поступления **29 июня 2026 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программы для ЭВМ **06 июля 2026 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью
Сертификат № 76415 d:3b5716423038a7e0206
Ирина С. Зубова
Регистрационный № 2026616485

Ю.С. Зубов



Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2026616485

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026680445

**"Качественная оценка релаксационных свойств
полимерных материалов двойного назначения в
условиях переменной температуры"**

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), Вагнер Виктория Игоревна (RU),
Евдокимов Владислав Владимирович (RU)*

Заявка № **2026665970**
Дата поступления **26 мая 2026 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **10 июля 2026 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью
Сергей Юрьевич Зубов, ID: 705710488002e1c2506
Идентификатор Зубов Ю.С. 705710488002e1c2506
Действителен до 2025-07-31 11:30:25

Ю.С. Зубов



Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2026680445



Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2026667644

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026667321

**"Качественная оценка восстановительных свойств
одноосно ориентированных полимерных материалов в
условиях переменной температуры"**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна" (RU)*

Авторы: *Переборова Нина Викторовна (RU), Егорова Марина
Авинировна (RU), Егоров Иван Михайлович (RU), Евдокимов
Владислав Владимирович (RU)*



Заявка № 2026666107

Дата поступления **26 мая 2026 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **08 июня 2026 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ВОПРОСЫ ПОДПИСАН ИЛИ НЕ ПОДПИСАН

Сергей Юрьевич Зубов, д.т.н., профессор кафедры
Управления, Зубов Игорь Сергеевич
Белгородская обл., Белгород, ул. 9 мая, 200 г.

Ю.С. Зубов

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2026667321

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026680449

**"Качественная оценка восстановительных свойств
полимерных материалов двойного назначения в
условиях переменной температуры"**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования "Санкт-
Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна" (RU)*

Авторы: *Переборова Нина Викторовна (RU), Егорова Марина
Авинировна (RU), Егоров Иван Михайлович (RU), Евдокимов
Владислав Владимирович (RU)*

Заявка № **2026666179**
Дата поступления **26 мая 2026 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программы для ЭВМ **10 июля 2026 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Ю. С. Зубов**

документ подписан электронной подписью
сертификат субъекта: 301057104281867161586
Идентификатор: 301057104281867161586
договор: 301057104281867161586



Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2026680449

ПРИЛОЖЕНИЕ Б.

АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе

СПбГУПТД

доктор технических наук, профессор

Макаров А.Г.

31.08.2026



АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационной работы

Евдокимова Владислава Владимировича

**«Применение цифровых технологий при прогнозировании
функциональных свойств арамидных текстильных материалов»**

Диссертационная работа Евдокимова Владислава Владимировича «Применение цифровых технологий при прогнозировании функциональных свойств арамидных текстильных материалов» выполнялась в 2022 – 2026 гг. на кафедре интеллектуальных систем и защиты информации в рамках прохождения обучения в аспирантуре по специальности 2.6.17. – Материаловедение.

По результату проведенных исследований были получены следующие результаты:

- разработанная математическая модель функциональных свойств арамидных текстильных материалов на основе функции нормированный арктангенс логарифма (НАЛ) является основой для дальнейшего цифрового прогнозирования указанных свойств изучаемых материалов;
- разработанные на основе математического моделирования функциональных свойств арамидных текстильных материалов цифровые

методы прогнозирования указанных свойств этих материалов позволяют с достаточной степенью точности проводить оценку функциональности различных арамидных материалов;

- разработанные на основе цифровых технологий компьютерные алгоритмы и программы для ЭВМ по прогнозированию функциональных свойств арамидных текстильных материалов являются основой для проведения системного анализа указанных свойств изучаемых материалов;

- разработанные методы системного анализа функциональных свойств арамидных текстильных материалов являются основой для целенаправленного отбора образцов изучаемых материалов и проведения сравнительного анализа их функциональности;

- разработанные методы проведения сравнительного анализа функциональных свойств арамидных текстильных материалов позволяют получать рекомендации по проектированию новых материалов, обладающих заданными функциональными свойствами, а также выявлять зависимость этих свойств от компонентного состава;

- разработанные в диссертации математические модели функциональных свойств арамидных текстильных материалов и методы цифрового прогнозирования этих свойств являются достаточно универсальными и могут быть применены для оценки функциональности других полимерных материалов.

По результатам проведенных исследований были разработаны и получили государственную регистрацию следующие программы для ЭВМ:

- "Моделирование деформационных свойств полимерных материалов технического назначения в условиях переменной температуры";

- "Моделирование релаксационных свойств полимерных материалов технического назначения в условиях переменной температуры";

- "Моделирование восстановительных свойств полимерных материалов технического назначения в условиях переменной температуры";
- "Моделирование эксплуатационных свойств полимерных материалов технического назначения в условиях переменной температуры";
- "Качественная оценка восстановительных свойств одноосно ориентированных полимерных материалов в условиях переменной температуры";
- "Качественная оценка релаксационных свойств полимерных материалов медицинского назначения в условиях переменной температуры";
- "Качественная оценка релаксационных свойств полимерных материалов двойного назначения в условиях переменной температуры";
- "Качественная оценка восстановительных свойств полимерных материалов двойного назначения в условиях переменной температуры".

Все указанные программы для ЭВМ используются при проведении научных исследований в лаборатории Информационных технологий и в учебном процессе с аспирантами и магистрантами на кафедре Интеллектуальных систем и защиты информации СПбГУПТД.

Зам. зав. кафедрой интеллектуальных
систем и защиты информации, к.т.н., доцент



Зурахов В.С.

Зам. зав. лабораторией
информационных технологий, к.т.н., доцент



Вагнер В.И.

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
25 июня 2026 г.

АКТ

О внедрении результатов
диссертационной работы Евдокимова Владислава Владимировича

Настоящий акт составлен в том, что материалы и научные результаты диссертационного исследования Евдокимова В.В. на тему: "Применение цифровых технологий при прогнозировании функциональных свойств арамидных 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" в 2025 - 2026 гг.

Разработанное программное обеспечение по качественной оценке релаксационных, деформационных и восстановительных свойств полимерных текстильных материалов позволяет проводить системную оценку эксплуатационных свойств указанных материалов и способствует улучшению их качества.

Начальник производства



Л. Н. Андреева

Акт внедрения АО «Салют»



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 июня 2026 г.
г. Санкт-Петербург

АКТ

о внедрении результатов

диссертационной работы Евдокимова Владислава Владимировича,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических
наук по специальности "2.6.17 - Материаловедение"

Настоящий составлен в том, что результаты диссертационного "Применение цифровых технологий при прогнозировании функциональных свойств арамидных 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 2025 - 2026 гг.

Внедрение предложенных автором методов математического моделирования и цифрового прогнозирования эксплуатационных процессов арамидных текстильных материалов позволяет повысить качество и надежность продукции, сократить сроки разработки новых изделий, а также снизить себестоимость продукции на 12-15 %.

Заместитель генерального директора
по производству

Палей С.М.

Акт внедрения ООО «Эковаст»