

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

На правах рукописи

Колодин Алексей Анатольевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ, ПРОГНОЗИРОВАНИЯ  
И ЦИФРОВОЙ ОЦЕНКИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ  
АРАМИДНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность:

2.6.17. Материаловедение

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент  
Переборова Нина Викторовна

Санкт-Петербург

2023

## Оглавление

	Стр.
<b>Введение</b> .....	5
<b>1. Обзор современных методов моделирования и прогнозирования деформационных процессов АТМ.</b> .....	13
1.1. Реологические особенности деформационных процессов АТМ.	14
1.2. Разложение деформации АТМ на компоненты. ....	16
1.3. Линейная релаксация и ползучесть АТМ. ....	18
1.4. Нелинейная релаксация и ползучесть АТМ. ....	19
1.5. Выводы по главе 1. ....	21
<b>2. Моделирование деформационных процессов АТМ.</b> .....	22
2.1. Технические характеристики АТМ. ....	22
2.2. Приборы для проведения экспериментальных исследований АТМ в режимах растяжения с постоянной скоростью деформирования .....	24
2.3. Приборы для проведения экспериментальных исследований АТМ в режимах релаксации и ползучести. ....	35
2.4. Исследование АТМ в режиме растяжения. ....	44
2.5. Исследование АТМ в режиме релаксации .....	65
2.6. Исследование АТМ в режиме ползучести. ....	69
2.7. Выводы по главе 2. ....	73

<b>3. Прогнозирование деформационных процессов АТМ. ....</b>	<b>74</b>
3.1. Прогнозирование релаксации АТМ .....	74
3.2. Прогнозирование ползучести АТМ .....	80
3.3. Прогнозирование восстановления АТМ .....	86
3.4. Усадка АТМ. ....	91
3.5. Выводы по главе 3. ....	96
<b>4. Цифровизация расчета параметров-характеристик деформационных процессов АТМ. ....</b>	<b>97</b>
4.1. Цифровизация расчета параметров-характеристик релаксации АТМ. ....	97
4.2. Цифровизация расчета параметров-характеристик ползучести АТМ. ....	101
4.3. Цифровизация расчета параметров-характеристик восстановления АТМ. ....	105
4.4. Цифровизация расчета параметров-характеристик вязкоупругости АТМ. ....	110
4.5. Выводы по главе 4. ....	115
<b>5. Практическое применение моделирования, прогнозирования и цифровой оценки деформационных процессов АТМ .....</b>	<b>116</b>
5.1. Применение методов цифровой оценки релаксации АТМ. ....	116
5.2. Применение методов цифровой оценки ползучести АТМ. ....	119
5.3. Применение методов цифровой оценки вязкоупругости АТМ. .	122
5.4. Выводы по главе 5. ....	125

<b>Заключение .....</b>	<b>126</b>
<b>Библиографический список использованной литературы .....</b>	<b>128</b>
<b>Приложение А. Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.....</b>	<b>151</b>
<b>Приложение Б. Акты внедрения результатов диссертационной работы.....</b>	<b>156</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы** диссертационной работы обоснована широким применением арамидных текстильных материалов (АТМ) в различных областях техники, что также повышает значимость изучения их деформационных свойств в зоне действия силовых неразрушающих нагрузок в процессе эксплуатации. АТМ относятся к классу вязкоупругих твердых тел, поэтому изучение их деформационных свойств необходимо осуществлять с позиции механики полимеров. Постоянное расширение областей использования АТМ и условий эксплуатации диктует необходимость всестороннего исследования их деформационных свойств.

Проведение указанных исследований АТМ становится возможным с применением математического моделирования деформационных процессов этих материалов, которые, в первую очередь, включают как вязкоупругую релаксацию, так и вязкоупругую ползучесть.

Методы математического моделирования деформационных процессов АТМ, а также, разработанные с их помощью, цифровые методы прогнозирования этих процессов позволяют решать задачи по качественной оценке основных эксплуатационных свойств АТМ и проводить исследования взаимосвязи свойств указанных материалов с их реологической структурой, а также осуществлять целенаправленное технологическое регулирование эксплуатационных свойств АТМ на основе прогнозирования различного рода их деформационных процессов.

Изучаемые деформационные свойства АТМ могут зависеть от различных факторов, основными среди которых являются: температурные колебания, влажностные воздействия, радиация, ультрафиолетовое и рентгеновское излучение, а также различные уровни и временные длительности силовых воздействий.

Следует особо отметить, что АТМ имеют отличия от большинства полимеров, заключающиеся в повышенной деформационной жесткости, что, в свою очередь, характеризуется большим значением модуля упругости. Это важное свойство АТМ, так же как и их огнестойкость способствует постоянно расширяющемуся применению этих материалов во многих областях промышленности.

Проведение качественной оценки деформационных свойств АТМ требует разработки адекватной математической модели этих свойств на основе аналитического физически обоснованного описания вязкоупругости. Заметим, что изучение деформационных свойств АТМ, проявляющихся при их эксплуатации, намного сложнее измерения разрывных характеристик этих материалов, значения которых не позволяют получить полную качественную оценку указанных свойств этих материалов. Большую значимость в проводимых исследованиях имеет также решение задачи по цифровому прогнозированию деформационных процессов АТМ, когда учитываются и условия их эксплуатации.

Появление новых АТМ, также, как и изделий из них, обладающих различными деформационными свойствами способствует разработке различных математических моделей указанных свойств и цифровых методов их прогнозирования. Разработка новых математических моделей и методов цифрового прогнозирования деформационных процессов АТМ позволяет повысить достоверность прогноза эксплуатационных характеристик этих материалов.

Работа выполнялась в рамках базовой части государственного задания министерства науки и высшего образования Российской Федерации 2023 - 2025 гг. № FSEZ-2023-0003 по теме: "Разработка научных основ и критериев качественной оценки функционально-эксплуатационных свойств одноосно ориентированных полимерных

материалов, в том числе двойного назначения, применяемых в технике и медицине, на основе математического моделирования, системного анализа и цифрового прогнозирования этих свойств", а также в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации № НШ-5349.2022.4.

**Степень разработанности темы исследования.** Разработка методов математического моделирования, также как и методов цифрового прогнозирования деформационных процессов АТМ имеют существенное значение для проведения последующей качественной оценки эксплуатационных свойств этих материалов. Это, в свою очередь, способствует улучшению качественных параметров-характеристик проектируемых АТМ и изделий из них, а также повышает их конкурентоспособность.

Моделирование, прогнозирование и качественная оценка деформационных характеристик АТМ является одним из направлений исследований, развиваемых в научной школе СПбГУПТД "Разработка критериев и методов качественной оценки функциональных и эксплуатационных свойств материалов текстильной и легкой промышленности", возглавляемой ее научным руководителем - проф. Переборовой Н.В. Указанная научная школа получила высокую оценку со стороны Комитета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга и была внесена в реестр ведущих научных и научно-педагогических школ Санкт-Петербурга.

Большое разнообразие АТМ и производимых изделий из них показывает необходимость совершенствования и разработки новых, более точных математических моделей и методов цифрового прогнозирования деформационных процессов указанных материалов. Учитывая сложную реологическую макроструктуру АТМ надо быть готовыми к тому, что

некоторые математические модели достаточно точно описывающие деформационные характеристики одного вида АТМ будут давать большую погрешность при моделировании и прогнозировании похожих характеристик других АТМ.

**Цель работы** заключается в разработке новых методов моделирования, прогнозирования и цифровой оценки деформационных процессов АТМ, позволяющих с повышенной степенью точности проводить качественную оценку их эксплуатационных свойств.

Основными **задачами** исследования являются:

- разработка новых математических моделей основных деформационных процессов АТМ - релаксации и ползучести, соответствующих режимам эксплуатации этих материалов;

- разработка новых цифровых методов прогнозирования основных деформационных процессов АТМ - релаксации и ползучести, учитывающих временную специфику указанных процессов;

- разработка новых методов качественной оценки эксплуатационных параметров-характеристик АТМ по параметрам их математических моделей релаксации и ползучести;

- разработка программного обеспечения с целью проведения качественной оценки эксплуатационных параметров-характеристик АТМ;

- проведение качественной оценки эксплуатационных параметров-характеристик АТМ.

**Методы исследования.** Основу исследования составляют современные научные знания и положения механики полимеров. Были использованы также разные математические методы: уравнения математической физики, интегральные уравнения, численные методы, методы информатики.

**Соответствие диссертационной работы Паспорту научной**



**специальности.**

Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 2.6.17 Материаловедение:

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

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

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

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

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

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

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

16. Создание ... неметаллических и композиционных материалов, способных эксплуатироваться в экстремальных условиях: агрессивные среды, электрические и магнитные поля, повышенные температуры,

механические нагрузки, вакуум и др.

**Научная новизна** работы состоит в разработке:

- новой математической модели релаксации АТМ, учитывающей специфику их эксплуатации;
- новой математической модели ползучести, учитывающей специфику их эксплуатации;
- нового метода цифрового прогнозирования релаксации АТМ, учитывающего ее длительность и временной характер;
- нового метода цифрового прогнозирования ползучести АТМ, учитывающего ее длительность и временной характер;
- алгоритма и программы ЭВМ по цифровому прогнозированию релаксации АТМ;
- алгоритма и программы ЭВМ по цифровому прогнозированию ползучести АТМ;
- методов качественной оценки эксплуатационных параметров-характеристик АТМ.

**Теоретическая и практическая значимость** работы состоит в том, что

- разработаны новые математические модели основных деформационных процессов АТМ - релаксации и ползучести, соответствующие режимам эксплуатации этих материалов;
- разработаны новые цифровые методы прогнозирования основных деформационных процессов АТМ - релаксации и ползучести, учитывающие временную специфику указанных процессов;
- разработаны алгоритмы и программы ЭВМ по цифровому прогнозированию релаксации и ползучести АТМ, позволяющие проводить качественную оценку эксплуатационных параметров-характеристик этих материалов;

- сформулированы практические рекомендации в части проектирования АТМ и изделий из них с необходимыми эксплуатационными параметрами-характеристиками.

**Положения, выносимые на защиту:**

–новые математические модели основных деформационных процессов АТМ - релаксации и ползучести, соответствующие режимам эксплуатации этих материалов;

– новые методы цифрового прогнозирования основных деформационных процессов АТМ - релаксации и ползучести, учитывающие временную специфику указанных процессов;

- методы повышения точности цифрового прогнозирования релаксации и ползучести АТМ, зависящие от временных режимов их эксплуатации;

- разработанный программный продукт по цифровому прогнозированию и качественной оценке эксплуатационных параметров-характеристик АТМ.

**Степень достоверности результатов.** Методы математического моделирования, цифрового прогнозирования и качественной оценки деформационных свойств АТМ были внедрены в в ООО "Северный текстиль" и подтвердили свою хорошую работоспособность. Результатом применения указанных методов явились практические рекомендации в части проектирования АТМ и изделий из них с заданными эксплуатационными характеристиками.

**Апробация результатов работы.** Результаты работы докладывались на научных конференциях: Международной научной конференции "Инновационные направления развития науки о полимерных волокнистых и композиционных материалах" (Санкт-Петербург, 2020, 2021 гг.) и Всероссийской научной конференции с международным участием

молодых ученых "Инновации молодежной науки" (Санкт-Петербург, 2021, 2022 гг.).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано **14** печатных работ, среди которых **7** статей в рецензируемых журналах из "Перечня ВАК", из них **2** - моно статьи, **4** свидетельства о государственной регистрации программ в Российском агентстве по патентам и товарным знакам.

# **1. ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ АТМ**

Прежде всего, надо отметить, что АТМ - это сверхвысокосмодульные полимеры, что позволяет проводить моделирование и прогнозирование их деформационных процессов на основе положений, применяемых в механике полимеров.

Глава содержит обзор современной научной литературы по методам моделирования и прогнозирования деформационных процессов АТМ. В главе приведены также современные методы проведения качественного анализа указанных процессов и качественной оценки деформационных свойств этих материалов.

С целью построения качественной картины упруго-вязкоупруго-пластических свойств АТМ, описаны возможные методы прогнозирования упругой, вязкоупругой и пластической компонент деформации указанных материалов.

В главе приведены также основные понятия и закономерности теории вязкоупругости полимеров, на основе которой разрабатываются методы моделирования и прогнозирования деформационных процессов АТМ.

Рассмотрены различные варианты теории вязкоупругости полимеров - линейный и нелинейный, указаны их особенности, достоинства и различия.

В главе описаны основные методы вычисления параметров-характеристик для линейных и нелинейных деформационных процессов АТМ.

### 1.1. Реологические особенности деформационных процессов АТМ

АТМ, как и другие ориентированные полимерные материалы обладают свойством механической анизотропии, характеризующем ориентирование их макромолекул. Когда цепочки макромолекул полимера ориентированы в целом и свернуты в виде клубков, то полимер считается изотропным [1-3].

Другими словами, в этом случае наблюдается, так называемая "гош конформация". Когда же для макромолекул полимера наблюдается ориентация только лишь элементов цепей, то полимер считается анизотропным [4-6].

В любом случае, полимер будет ориентированным, когда имеет место обозначенная одноосная ориентация макромолекул и цепей из них [7-9].

Ориентированные полимеры часто рассматривают как квазиодномерные, что значительно упрощает построение математических моделей их эксплуатационных процессов, в частности, деформационных [10-12].

Другим важным свойством, которым обладают полимеры, имеющие цепную структуру макромолекул, является высокоэластичность [13], что означает возможность вращения макромолекул полимера вокруг своих внутренних узлов, позволяя макромолекуле быть гибкой и легко сворачиваемой [14].

Свойство гибкости макромолекул АТМ особо может проявляется при их интенсивном тепловом движении [15].

Если же рассматривается стеклообразное состояние полимера, то в этом случае его деформация характеризуется изменяющимися межатомными расстояниями и валентными углами макромолекулярных цепей [16-20].

В случае же высокоэластического состояния полимера, его деформация характеризуется лишь ориентацией макромолекул и перемещениями их звеньев, при которых не меняются межмолекулярные расстояния [21-24].

АТМ характеризуются ориентированными макромолекулами, а также механизмом процесса деформирования аналогичному механизму полимерного материала, находящегося в стеклообразном состоянии [25-28].

Существенным для АТМ является то, что зависимости напряжения и деформации друг от друга являются температурно-временными [29-32].

При деформационных процессах АТМ могут возникать три различных вида деформаций: упругая, вязкоупругая и пластическая [33-37].

Упругая деформация характеризуется изменением валентных углов и межатомных расстояний [38-40].

Вязкоупругая деформация характеризуется температурно-временными перегруппировками макромолекул полимерного материала в своих аморфных областях [41-44].

Пластическая деформация характеризуется межмолекулярными проскальзываниями макромолекул друг относительно друга [45-49].

В деформационных процессах АТМ обычно присутствуют все три перечисленные вида деформационных изменений, причем, если упругая деформация является полностью обратимой, то пластическая деформация - полностью необратима [50-53].

## 1.2. Разложение деформации АТМ на компоненты

Как было сказано в пункте 1.1, деформационные процессы АТМ характеризуются тремя видами изменения деформации: упругой, вязкоупругой и пластической [54-58].

В научной литературе можно встретить и другие версии деления деформации, например, объединяются вязкоупругая и пластическая компоненты в вязкоупруго-пластическую [59-63].

Деформационные свойства АТМ являются зависимыми от вида и длительности нагрузки и температуры, а также от других факторов, например, влаги и содержания в них низкомолекулярных веществ [64-69].

Главными деформационными характеристиками АТМ являются: модуль релаксации, задаваемый формулой [70]

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

а также податливость, вычисляемая по формуле [71]

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

Здесь имеют место следующие обозначения:

$t$  - время,

$\varepsilon$  - величина деформации,

$\sigma$  - значение напряжения.

Часто значение напряжения  $\sigma$  заменяется значение усилия  $F$ ,



связанного с напряжением по формуле [72-76]

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

Здесь:

$S$  - площадь сечения АТМ.

Процессы деформирования АТМ определяются изменением структуры этих материалов. Они могут также существенно зависеть от различных условий, таких, как: изменения температуры, длительности механической нагрузки, воздействия других факторов [77-80].

Скорости деформационных изменений АТМ зависят от температурных воздействий [81-83].

Энергия деформационных изменений может быть описана формулой Аррениуса [84-88]:

$$kT \cdot \ln \frac{\tau_{\sigma}}{\tau_0} \approx U_{\sigma}. \quad (1.4)$$

Здесь имеют место следующие обозначения:

$k$  - постоянная Больцмана,

$T$  - величина абсолютной температуры,

$\tau_0 \approx 10^{-13}$  с, время ползучести (запаздывания),

$U_{\sigma}$  - значение энергии активации,

$U_{\sigma_0} \approx 100$  кДж / моль - начальное значение энергии активации.

Действие значительной величины нагрузки на АТМ может приводить к разрушению их молекулярной структуры, а, следовательно, и самих этих материалов [89-94].

### 1.3. Линейная релаксация и ползучесть АТМ

Простейшими типами релаксации и ползучести полимерных материалов являются линейная релаксация и линейная ползучесть [95-98].

Если деформационные процессы АТМ обладают свойством линейности, то моделирование этих процессов существенно упрощается по сравнению с общим случаем [99-102].

При этом моделирование процесса релаксации АТМ в случае линейности его свойств может быть осуществлено на основе интегрального уравнения Больцмана-Вольтерра [103-108]:

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

Здесь через  $E_0$  обозначен модуль упругости, то есть начальное значение  $E_t$ .

Функция  $\phi(t-\tau)$  - интегральное ядро.

Можно заметить, что при  $t \ll \tau$ , (здесь  $\tau$  - время релаксации), АТМ свойственны упругие свойства [109-124]:

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

При значениях  $t \gg \tau$ , наоборот, у АТМ проявляются вязкоупругие свойства [125-129]:

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

Здесь через  $E_\infty$  обозначен модуль вязкоупругости, то есть предельное значение  $E_t$ .

Аналогично, моделирование процесса ползучести АТМ в случае линейности его свойств может быть осуществлено на основе интегрального уравнения Больцмана-Вольтерра [130-135]:

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

Здесь через  $D_0$  обозначена упругая податливость, то есть начальное значение  $D_t$ .

Можно заметить, что [136-140]:

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

Аналогично, через  $D_\infty$  обозначена вязкоупругая податливость, то есть предельное значение  $D_t$  [141-144]:

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

Для случая, когда имеет место квазимгновенное приложение напряжения  $\sigma$  в момент времени  $\theta \cong 0$ , уравнение (1.8) дает формулу [145-149]:

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

Аналогично, из (1.5) имеем формулу релаксации для случая квазимгновенного приложения деформации [150-156]:

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

#### 1.4. Нелинейная релаксация и ползучесть АТМ

Случай нелинейности процессов релаксации и ползучести АТМ характеризуется нелинейными интегральными ядрами  $\phi(t-\tau)$ , входящими в формулы (1.5) и (1.8) [157-161].

В этом случае моделирование процесса релаксации АТМ может быть осуществлено на основе интегрального уравнения Больцмана-Вольтерра, записанного в виде [162-167]:

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

Аналогично моделирование процесса ползучести АТМ для нелинейного случая может быть осуществлено на основе интегрального уравнения Больцмана-Вольтерра, записанного в виде [168-173]:

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

Можно заметить, что для случая задания модуля релаксации АТМ в виде [174-178]

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

получаем определяющее уравнения для напряжения (1.11) в виде [179-182]:

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

Здесь через  $\varphi_t$  обозначена нормированная функция релаксации.

Аналогично, можно заметить, что для случая задания податливости АТМ в виде [183-187]

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

получаем определяющее уравнения для напряжения (1.12) в виде [188-192]:

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

Здесь через  $\psi_t$  обозначена нормированная функция ползучести (запаздывания).

Нелинейность уравнений (1.13) и (1.15) заключается в том, что в них величины деформации и напряжения входят в интегральные ядра в виде параметров [193-197].

### **1.5. Выводы по главе 1**

В главе кратко были изложены современные представления о реологических особенностях деформационных процессов АТМ: релаксации и ползучести, как для линейных вариантов этих процессов, так и для нелинейных вариантах.

Построение математических моделей деформационных процессов АТМ основано на использовании определяющих интегральных соотношений Больцмана-Вольтерра.

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ АТМ

В главе приведена информация по производителям изучаемых АТМ, как по российским, так и по зарубежным.

Предлагаются математические модели процессов релаксации и процессов ползучести АТМ на основе аппроксимации одноименных экспериментальных семейств.

Описывается приборная база для проведения экспериментальных исследований деформационных процессов АТМ.

### 2.1. Технические характеристики АТМ

В работе исследовались АТМ, как российского, так и зарубежного изготовления, производители которых приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1. - Производители АТМ

Марка	Производитель
Терлон	Россия, ГП ВНИИПВ (Московская обл., г. Мытищи)
Армос	Россия, ГП ВНИИПВ (Московская обл., г. Мытищи)
Русар	Россия, ООО «Каменскхимволокно» (Ростовская обл., Каменск-Шахтинский)
СВМ	Россия, ООО «Каменскхимволокно» (Ростовская обл., Каменск-Шахтинский)
Технора	Нидерланды, Teijin Aramid BV (г. Арнем)
Тварон	Нидерланды, Teijin Aramid BV (г. Арнем)
Кевлар	США, Du Pont (г. Уилмингтон, штат Делавэр)

Зарубежные и российские АТМ отличаются друг от друга компонентным составом, информация по которому приведена в таб. 2.2.

Таблица 2.2. - Компонентный состав АТМ

Марка	Компонентный состав
Терлон	сополимеры с содержанием сомономеров (5-15)%, близкие к поли-пара-фенилентерефталамиду
Армос	ароматический пара-сополиамид на основе полидобезимидазола из (35-45) % мол. гетероциклического парадиа-мина, (5-15)% мол. парафенилендиа-мина и 50 % мол. терефталилхлорида
Русар	гетероциклический парасополиамид
СВМ	ароматический сополиамид на основе полиамидо-безимидазола (из гетероциклического пара-диамида и терефталилхлорида)
Технора	со-поли-парафенилен3,4окси-дифенелен терефталамид
Тварон	поли-пара-фенилентерефталамид
Кевлар	поли-пара-фенилентерефталамид

Из табл. 2.2 видно, что все АТМ являются сверхвысокомодульными ориентированными полимерами.

Им свойственна неплавкость и высокая температура разрушения, варьируемая в интервале 450 - 600 °С.

Физико-механические характеристики АТМ приведены в табл.2.3.

Таблица 2.3 - Физико-механические характеристики АТМ

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
Армос	108	192	3,1	2,3	94
Русар	58,8	134	3,1	3,3	115
СВМ	29,5	65	2,6	3,2	105
Технора	110	217	4,0	2,7	81
Тварон	120	226	2,6	2,6	122
Кевлар	130	199	2,2	2,2	109

Всем изучаемым в работе АТМ свойственно большое значение деформационной жесткости, характеризующееся значением модуля упругости  $E_0$ .

Из табл.2.3 видим, что наибольшая деформационная жесткость ( $E_0 = 122 \text{ ГПа}$ ) - у тварона, наименьшая ( $E_0 = 81 \text{ ГПа}$ ) - у техноры.

## **2.2. Приборы для проведения экспериментальных исследований АТМ в режимах растяжения с постоянной скоростью деформирования**

Простейшим деформационным процессом АТМ является процесс растяжения с постоянной скоростью изменения деформации

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}.$$



Экспериментальные исследования полимерных материалов в режиме процесса растяжения с постоянной скоростью деформирования проводятся с использованием различного рода разрывных машин.

Результатом таких исследований являются графические диаграммы растяжения, представляющие собой графики зависимости напряжения (или силового усилия) от значения деформации.

Изменение деформации в режиме растяжения осуществляется, как правило, с постоянной скоростью.

Как правило, эксперимент по процессу растяжения полимерного материала с постоянной скоростью деформирования проводится до момента его разрыва.

Числовые значения деформации и напряжения в момент разрыва материала называются разрывными значениями и обозначаются соответственно:

$\varepsilon_{\text{разр.}}$  - разрывная деформация,

$\sigma_{\text{разр.}}$  - разрывное напряжение.

Для экспериментальных исследований процессов растяжения АТМ применялась универсальная измерительная установка "Instron 1122" (рис. 2.1).

В работе экспериментальные исследования АТМ в режимах процессов растяжения проводились с постоянной скоростью деформирования:

$\dot{\varepsilon}_1 = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ , соответствующая растяжению полимерного материала на 25% за 1 минуту;

$\dot{\varepsilon}_2 = 8,3 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ , соответствующая растяжению полимерного материала на 5% за 1 минуту;



Рисунок 2.1 - Разрывная машина "Instron - 1122" для экспериментальных исследований АТМ в режимах растяжения с постоянной скоростью деформирования



Рисунок 2.2 - Зажимы разрывной машины "Instron - 1122" для фиксации исследуемого АТМ

$\dot{\epsilon}_3 = 4,17 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ , соответствующая растяжению полимерного материала на 2,5% за 1 минуту;

$\dot{\epsilon}_4 = 8,3 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ , соответствующая растяжению полимерного материала на 0,5% за 1 минуту.

Исследования в режимах растяжения с постоянной скоростью деформирования проводились для различных значений температур:

$$T_1 = 20 \text{ } ^\circ\text{C} ,$$

$$T_2 = 40 \text{ } ^\circ\text{C} ,$$

$$T_3 = 60 \text{ } ^\circ\text{C} ,$$

$$T_4 = 80 \text{ } ^\circ\text{C} ,$$

$$T_5 = 100 \text{ } ^\circ\text{C} ,$$

$$T_6 = 150 \text{ } ^\circ\text{C} ,$$

$$T_7 = 200 \text{ } ^\circ\text{C} ,$$

$$T_8 = 250 \text{ } ^\circ\text{C} ,$$

$$T_9 = 300 \text{ } ^\circ\text{C} .$$

Для осуществления соответствующего температурного режима использовались специальные термокамеры, позволяющие проводить экспериментальные исследования полимерных материалов в режимах растяжения до значений температуры  $T = 300 \text{ } ^\circ\text{C}$  включительно.

При проведении экспериментального исследования в режиме растяжения с постоянной скоростью деформирования образец исследуемого на разрывной машине "Instron - 1122" АТМ зажимается в специальных зажимах (рис. 2.2) и, при необходимости, помещается в термокамеру.



Рисунок 2.3 - Снятие показаний с разрывной машины "Instron - 1122" при проведении эксперимента в режиме процесса растяжения АТМ с постоянной скоростью деформирования

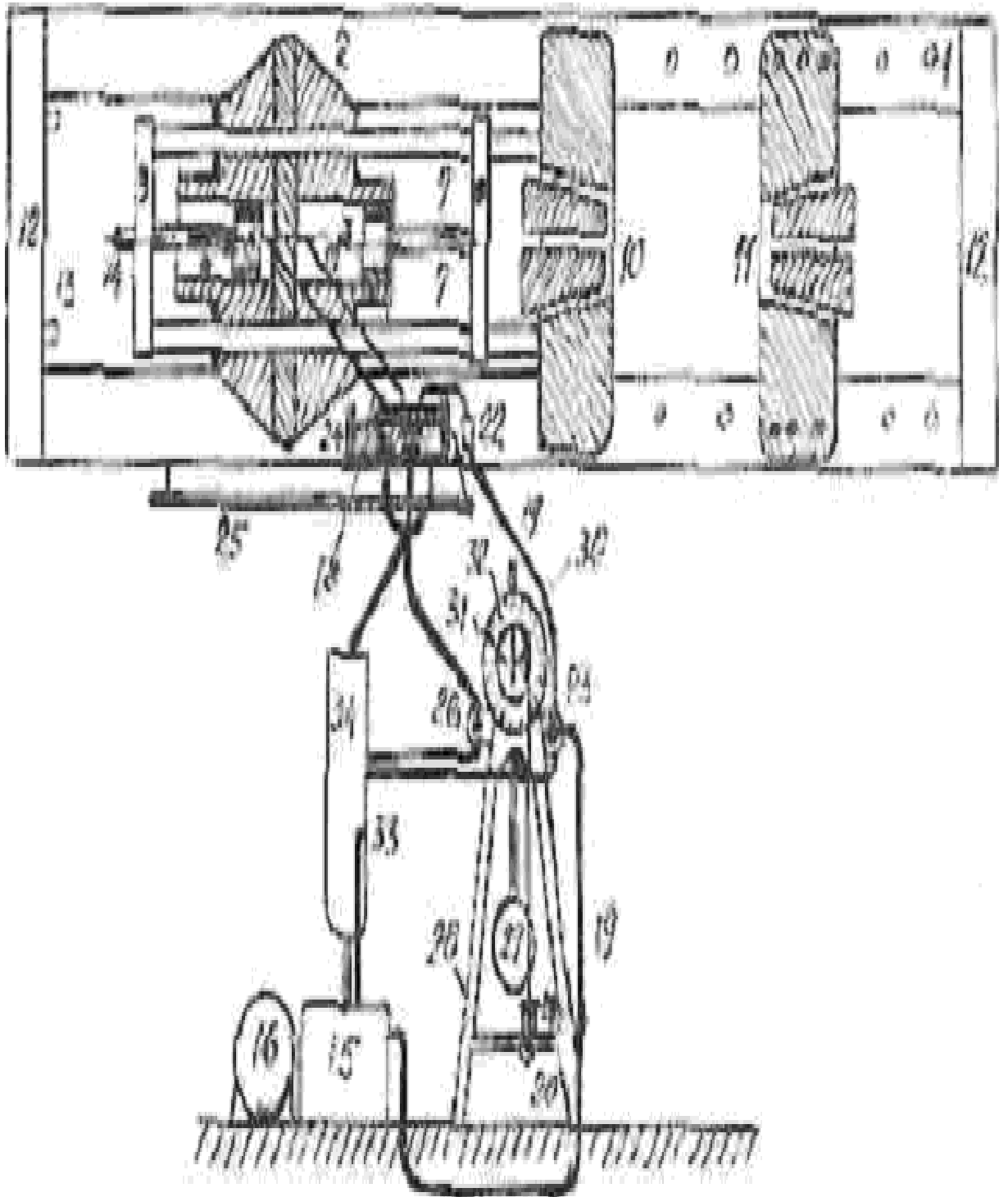


Рисунок 2.4 - Сто тонная разрывная гидравлическая машина "Амслер"

Фиксация переменных значения напряжений при изменении деформации на разрывной машине "Instron - 1122" осуществляется в автоматическом режиме при помощи самописец, данные с которого поступают в компьютер (рис.2.3).

Упомянутая разрывная машина "Instron - 1122" используется, как правило, для проведения экспериментальных исследований в режимах растяжения с постоянными скоростями деформирования, в основном для АТМ в виде нитей.

Для проведения экспериментальных исследований в режимах растяжения с постоянными скоростями деформирования АТМ большой линейной плотности, например, арамидных тканей, шнуров, канатов, лент, жгутов и т.д., используются более мощные разрывные машины.

Примером такой более мощной разрывной машины является сто тонная разрывная гидравлическая машина "Амслер", представленная на рис. 2.4.

Для проведения экспериментальных исследований в режимах растяжения с постоянными скоростями деформирования, где не требуется чрезмерных усилий, применяется также пяти тонная разрывная машина "Р-5", представленная на рис. 2.5, а также разрывная машина "ФМ-500", представленная на рис. 2.6.

Помимо проведения экспериментальных исследований АТМ в режимах процессов растяжения с постоянной скоростью деформирования часто проводятся экспериментальные исследования в режимах циклического нагружения и разгрузки этих материалов.

Для этой цели применяется прибор, представленный на рис. 2.7, позволяющий проводить указанные экспериментальные исследования в диапазоне 10 - 2 000 (Н).

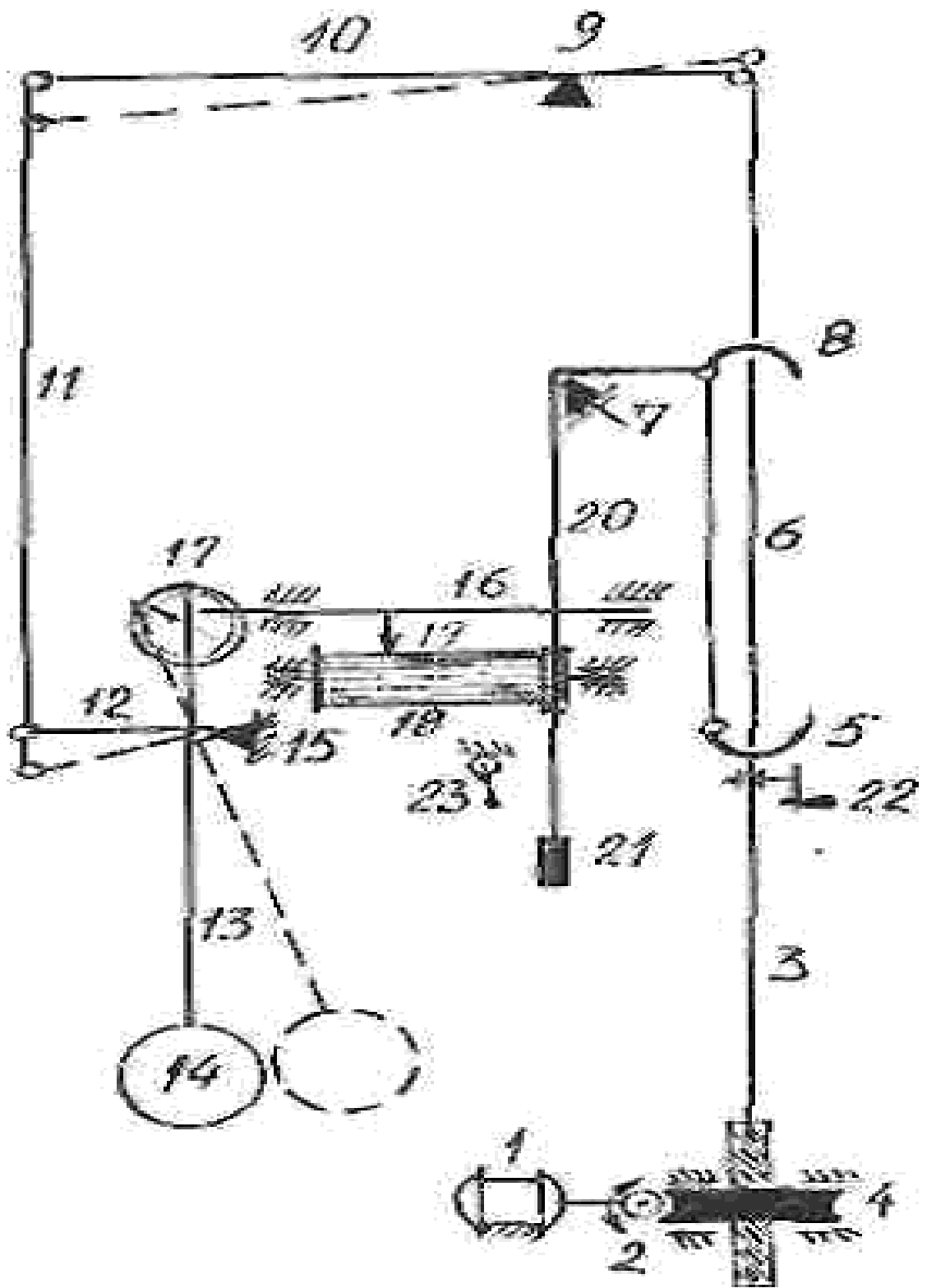


Рисунок 2.5 - Пяти тонная разрывная машина "P-5"



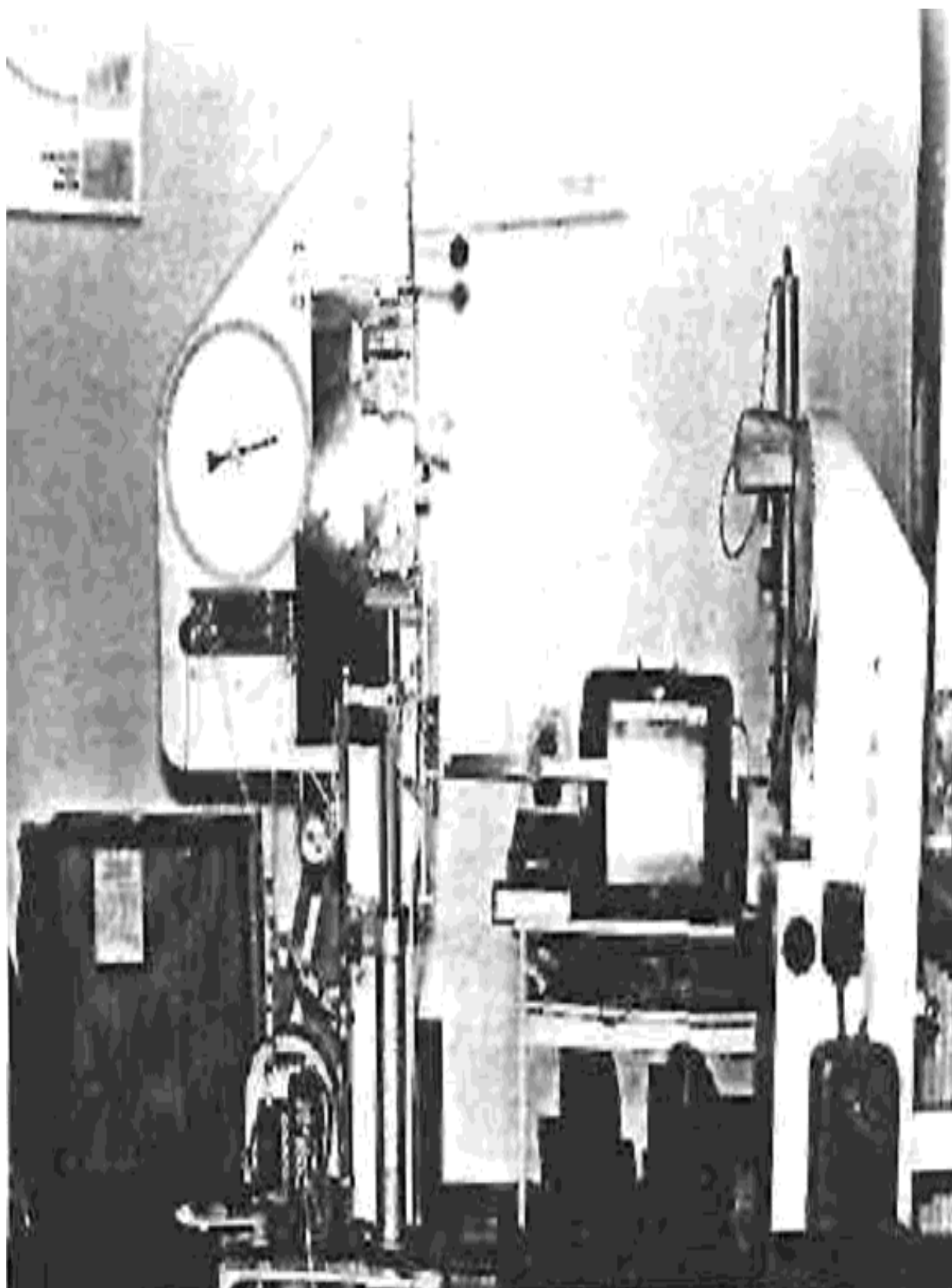


Рисунок 2.6 - Разрывная машина "ФМ-500"

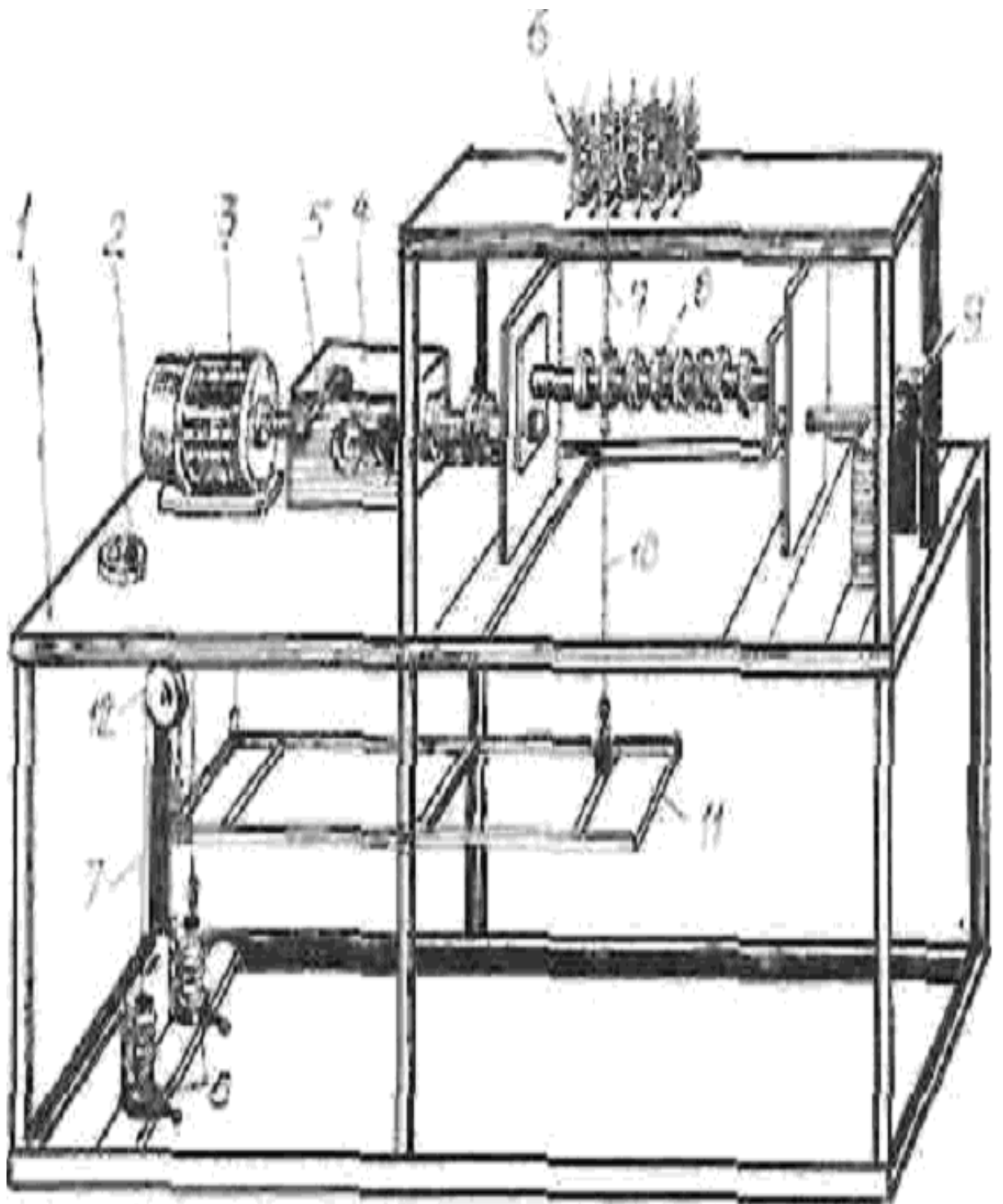


Рисунок 2.7 - Прибор для исследования АТМ в режимах циклического нагружения и разгрузки

При этом, частота периодического нагружения и разгрузки меняется в диапазоне 0 - 200 циклов в течении минуты.

### **2.3. Приборы для проведения экспериментальных исследований АТМ в режимах релаксации и ползучести**

Режимы релаксации и ползучести АТМ являются основополагающими деформационными процессами этих материалов.

Для определения расчетных параметров этих процессов требуется проведение краткосрочных экспериментов с использованием релаксметров напряжений (для измерения процессов релаксации) и релаксметров деформаций (для измерения процессов ползучести).

Процесс релаксации АТМ характеризуется исследованием изменяющегося напряжения  $\sigma_t$  во времени  $t$  при заданных значениях деформаций  $\varepsilon$ .

Примером релаксометра напряжений служит прибор, изображенный на рис. 2.8, установленный в центре коллективного пользования СПбГУПТД.

На рис. 2.9 запечатлен процесс проведения исследования АТМ в режиме релаксации.

Процесс ползучести АТМ характеризуется исследованием изменяющейся деформации  $\varepsilon_t$  во времени  $t$  при заданных значениях напряжений  $\sigma$ .

Примером релаксометра деформаций служит прибор, изображенный на рис. 2.10, установленный в центре коллективного пользования СПбГУПТД.

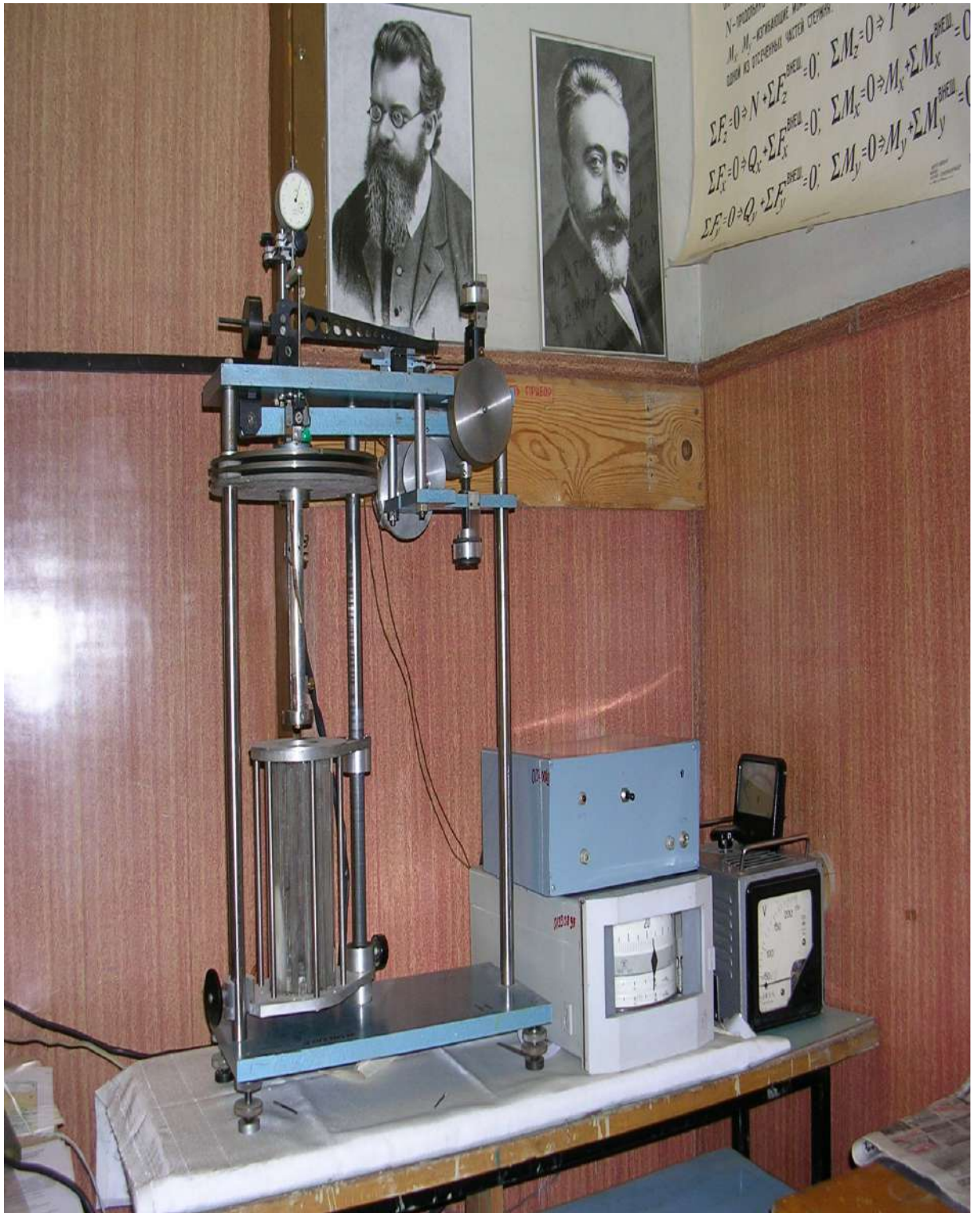


Рисунок 2.8 - Прибор "релаксометр напряжений" центра коллективного пользования СПбГУПТД для проведения испытаний АТМ в режимах релаксации



Рисунок 2.9 - Проведение исследования АТМ на приборе "релаксометр напряжений" центра коллективного пользования СПбГУПТД в режиме релаксации



Рисунок 2.10 - Прибор "релаксометр деформаций" центра коллективного пользования СПбГУПТД для проведения испытаний АТМ в режимах ползучести



Рисунок 2.11 - Проведение исследования АТМ на приборе "релаксометр деформаций" центра коллективного пользования СПбГУПТД в режиме ползучести

На рис. 2.11 запечатлен процесс проведения исследования АТМ в режиме ползучести.

Приведенные на рис. 2.8 - рис. 2.11 релаксометры напряжений и деформаций применяются преимущественно для проведения исследований в режимах релаксации и ползучести АТМ, имеющих не очень большие значения линейной плотности, например, арамидных текстильных нитей.

Для проведения экспериментальных исследований в режимах релаксации и ползучести АТМ значительно большей линейной плотности, чем у арамидных текстильных нитей могут применяться и другие приборы.

Примером для исследования АТМ с большой линейной плотностью в режимах статического и динамического нагружения является прибор, приведенный на рис. 2.12.

Другим примером прибора для исследования АТМ с большой линейной плотностью в режимах релаксации и ползучести служит "динамометр натяжений", изображенный на рис. 2.13.

Он применяется для проведения исследований в режимах релаксации и ползучести арамидных текстильных канатов, арамидных текстильных шнуров и других арамидных материалов круглого и овального сечения.

Еще одним прибором для проведения исследований в режимах релаксации и ползучести арамидных текстильных лент и арамидных текстильных тканей является "динамометр натяжений", изображенный на рис. 2.14.



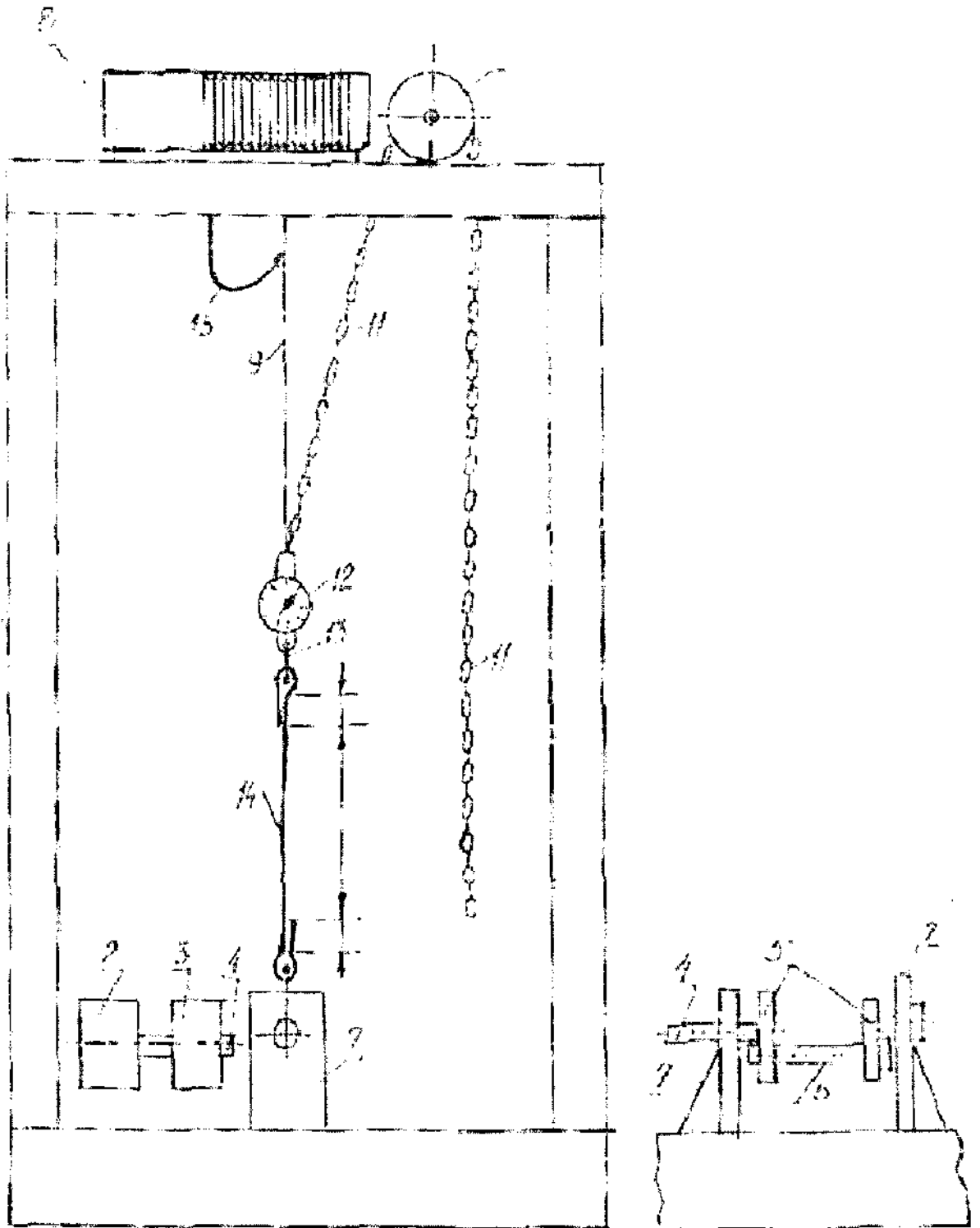


Рисунок 2.12 - Прибор для проведения исследования АТМ на статическое и динамическое нагружение

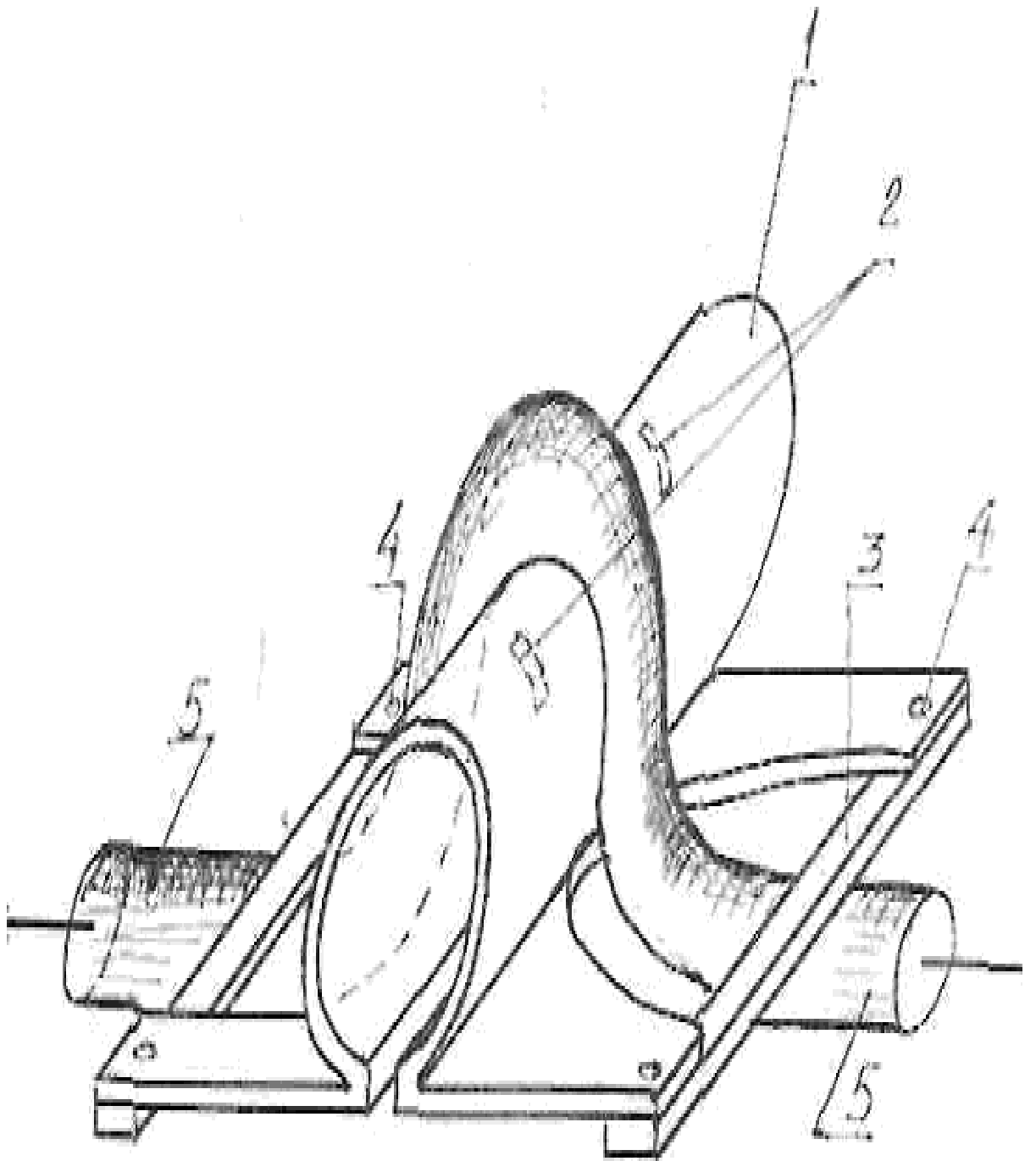


Рисунок 2.13 - Прибор "динамометр натяжения", применяемый для исследования АТМ с большой линейной плотностью (арамидных текстильных канатов и арамидных текстильных шнуров) в режимах релаксации и ползучести

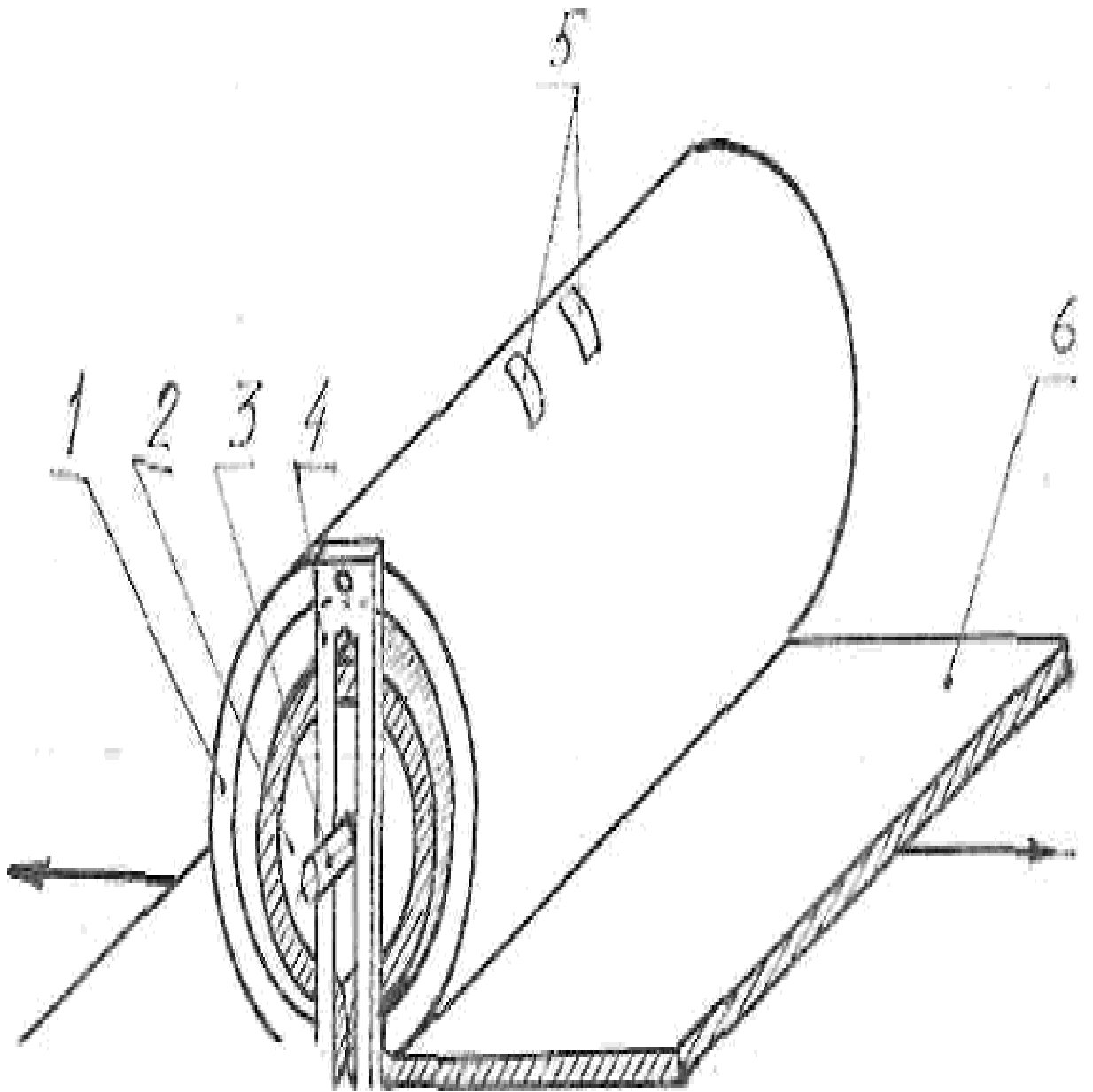


Рисунок 2.14 - Прибор "динамометр натяжения", применяемый для исследования АТМ с большой линейной плотностью (арамидных текстильных лент и арамидных текстильных тканей) в режимах релаксации и ползучести

## 2.4. Исследование АТМ в режиме растяжения

Процесс растяжения АТМ аналитически может быть записан в виде:

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

Здесь:

$\varepsilon_0$  - некоторое значение начальной деформации, наиболее часто равной "нулевому" значению;

$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$  - значение скорости деформирования, которое может быть

как переменной, так и постоянной величиной.

Процесс растяжения АТМ является частным случаем процесса релаксации, поэтому для его математического моделирования могут применяться те же математические модели, что и для случая процесса релаксации.

Графики процессов растяжения АТМ при значениях скорости деформации  $\dot{\varepsilon} = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  и температуры  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  приведены на рисунках:

- АТМ терлон (Россия) - рис. 2.15;
- АТМ армос (Россия) - рис. 2.16;
- АТМ русар (Россия) - рис. 2.17;
- АТМ СВМ (Россия) - рис. 2.18;
- АТМ техноора (Нидерланды) - рис. 2.19;
- АТМ тварон (Нидерланды) - рис. 2.20;
- АТМ кевлар (США) - рис. 2.21.

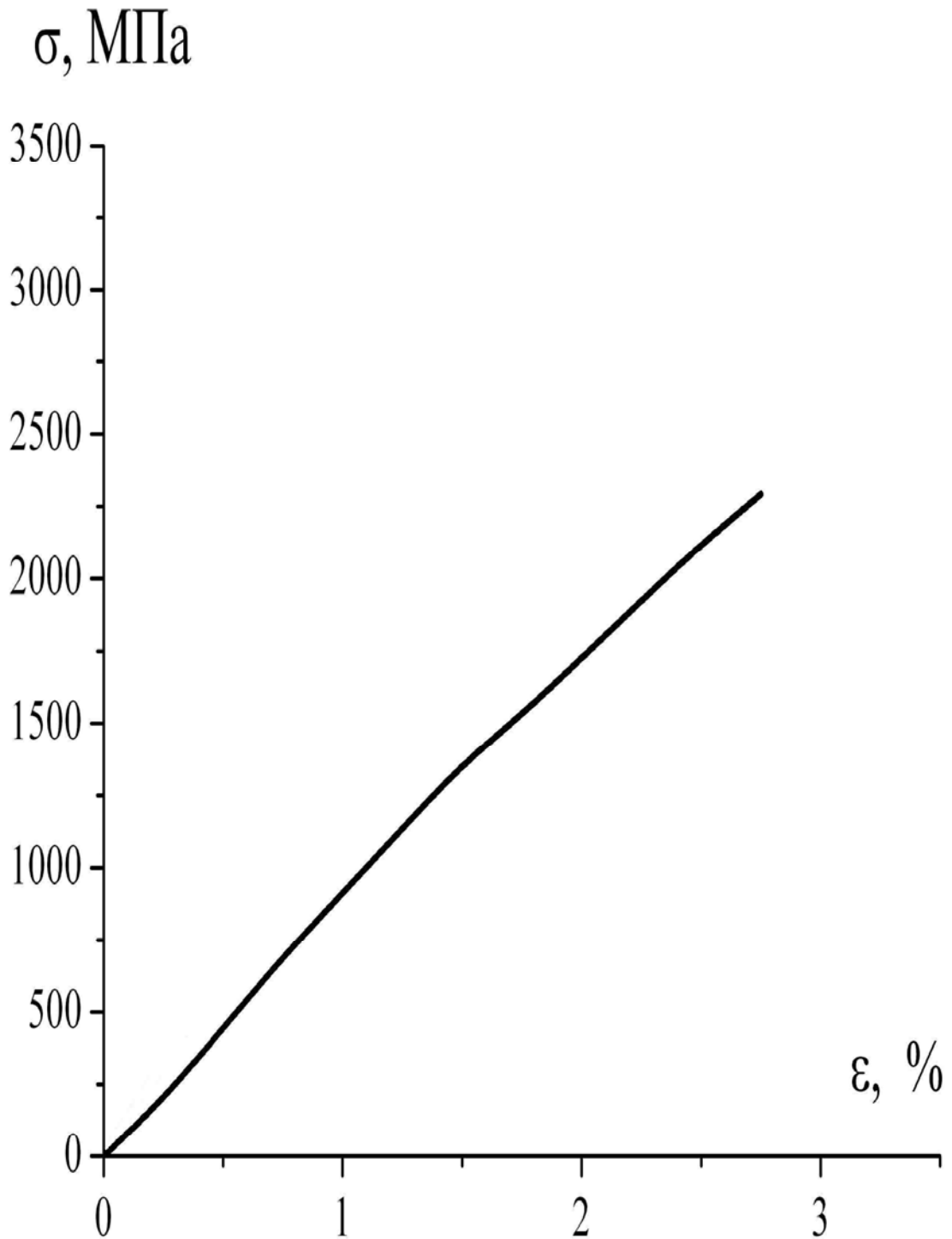


Рисунок 2.15 - Экспериментальная диаграмма растяжения АТМ терлон (Россия), при значениях  $\dot{\epsilon} = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ ,  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

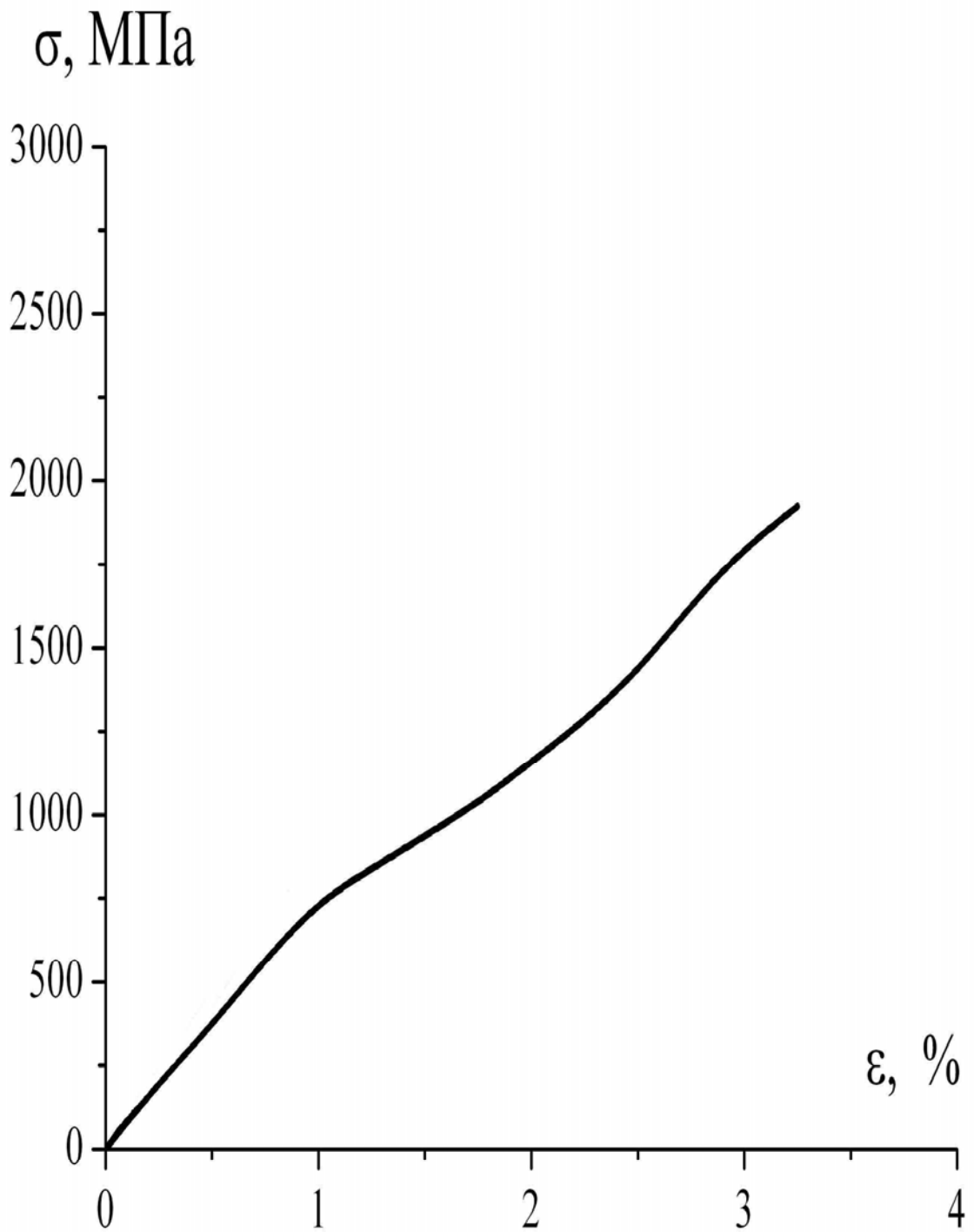


Рисунок 2.16 - Экспериментальная диаграмма растяжения АТМ армос (Россия), при значениях  $\dot{\epsilon} = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ ,  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

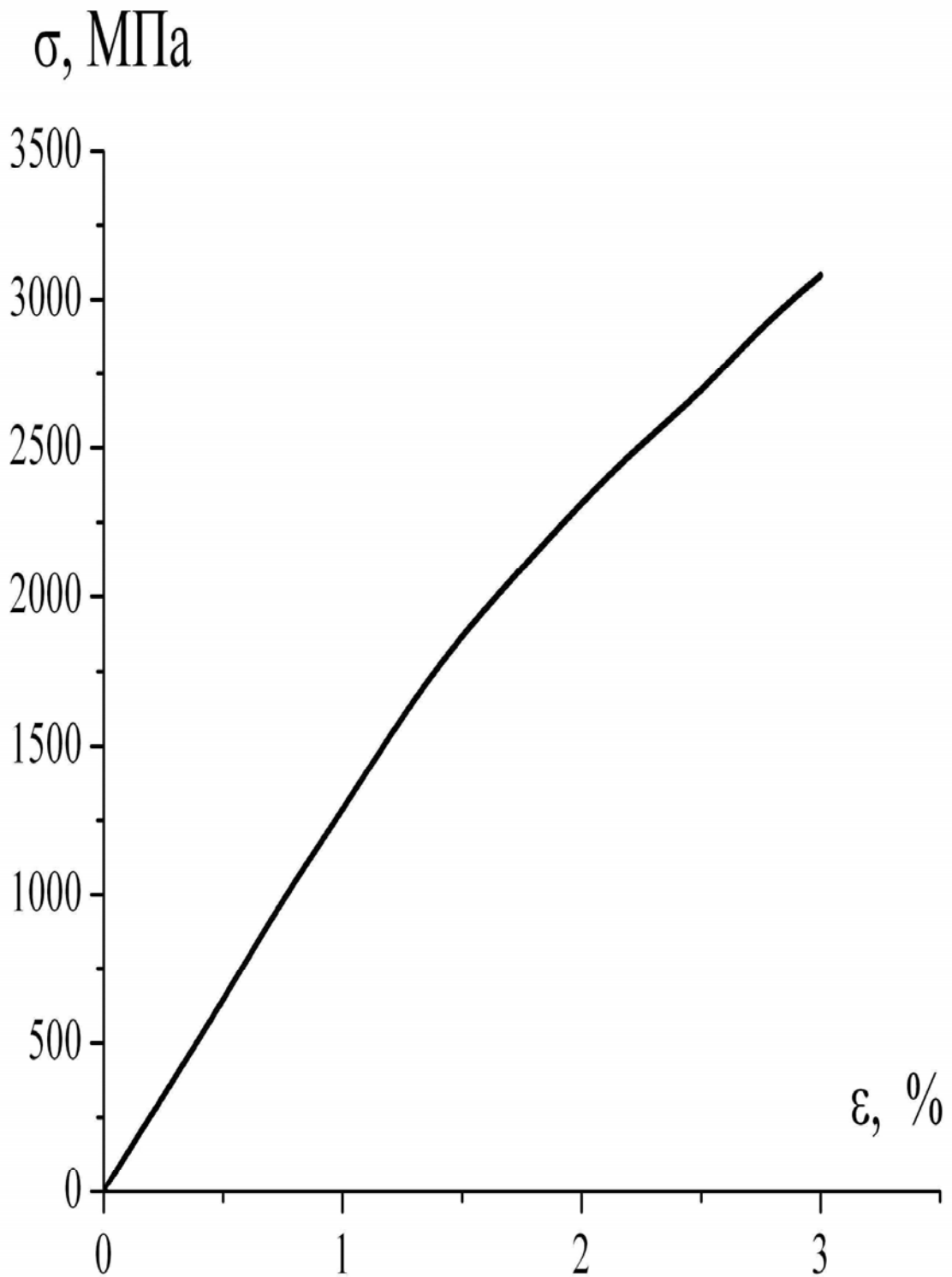


Рисунок 2.17 - Экспериментальная диаграмма растяжения АТМ русар (Россия), при значениях  $\dot{\epsilon} = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ ,  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

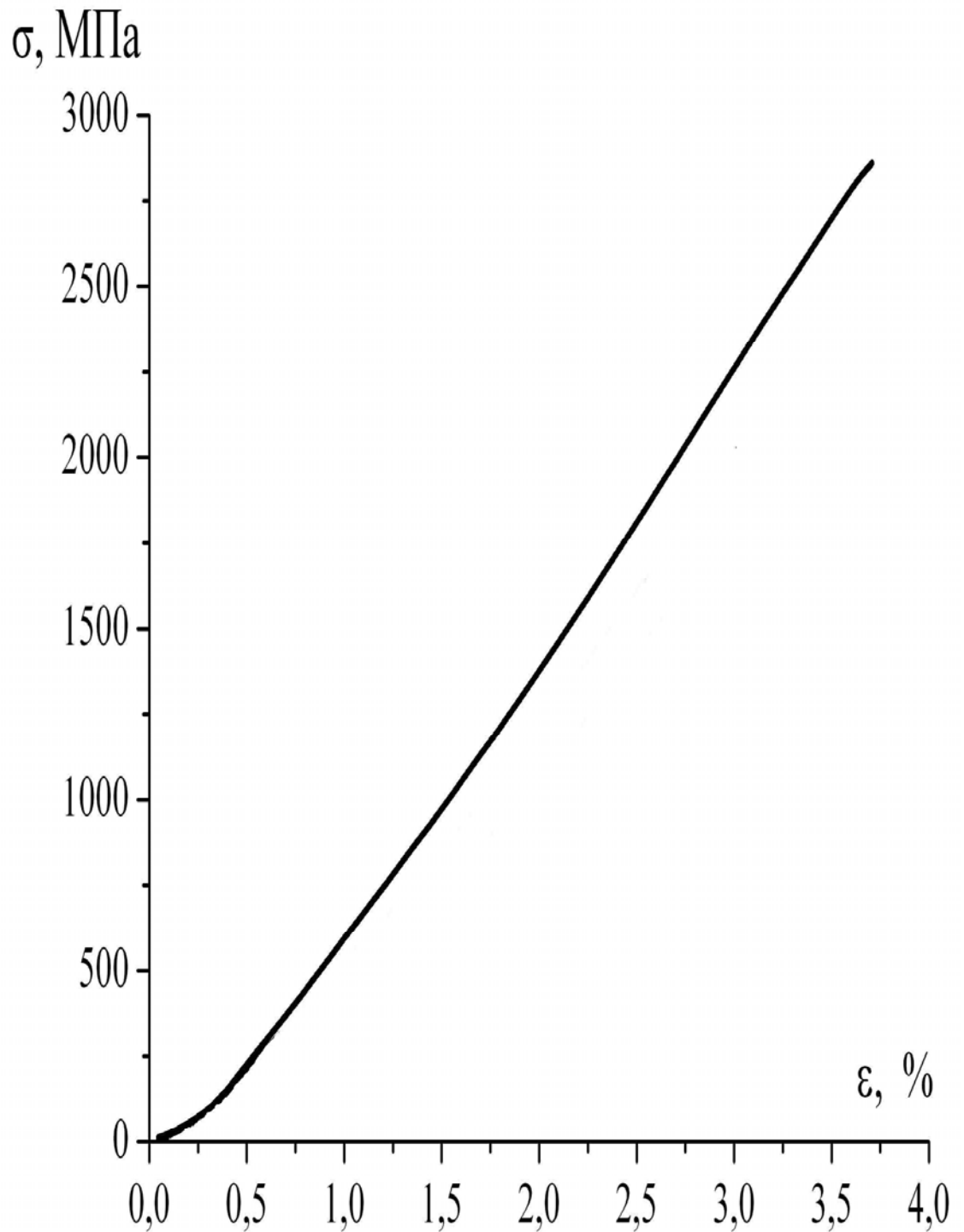


Рисунок 2.18 - Экспериментальная диаграмма растяжения АТМ СВМ (Россия), при значениях  $\dot{\epsilon} = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ ,  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$



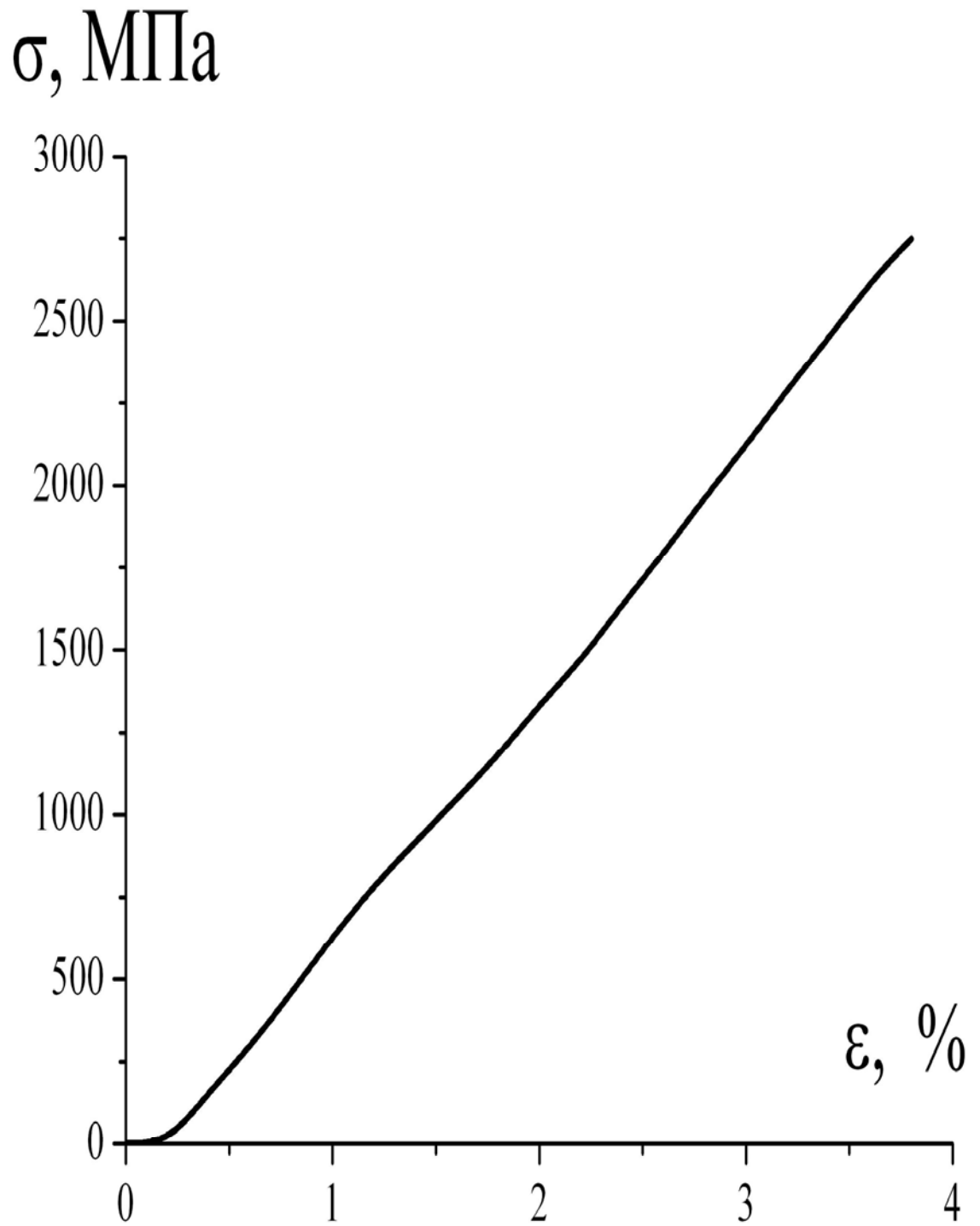


Рисунок 2.19 - Экспериментальная диаграмма растяжения АТМ технора (Нидерланды), при значениях  $\dot{\epsilon} = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ ,  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

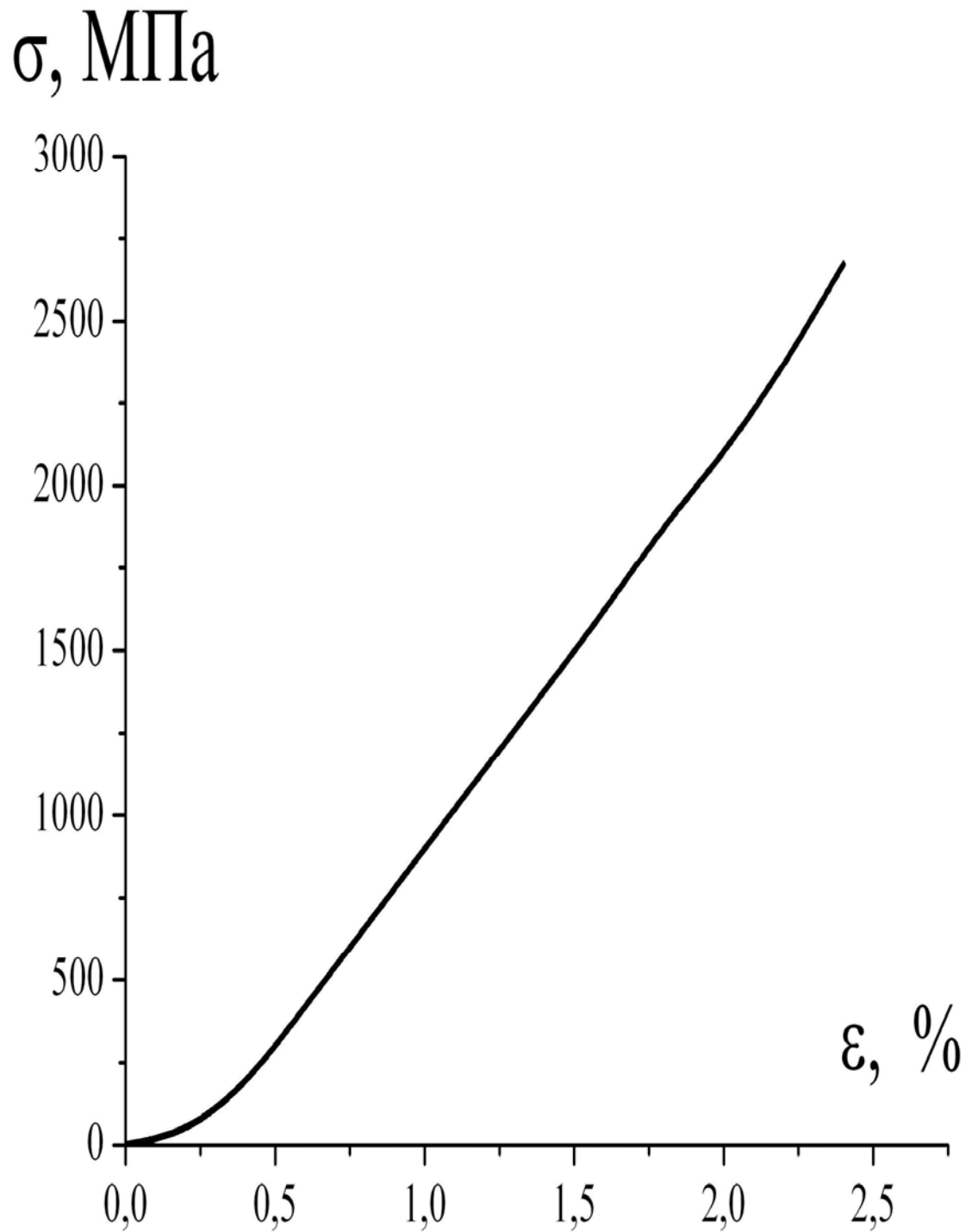


Рисунок 2.20 - Экспериментальная диаграмма растяжения АТМ тварон (Нидерланды), при значениях  $\dot{\epsilon} = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ ,  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

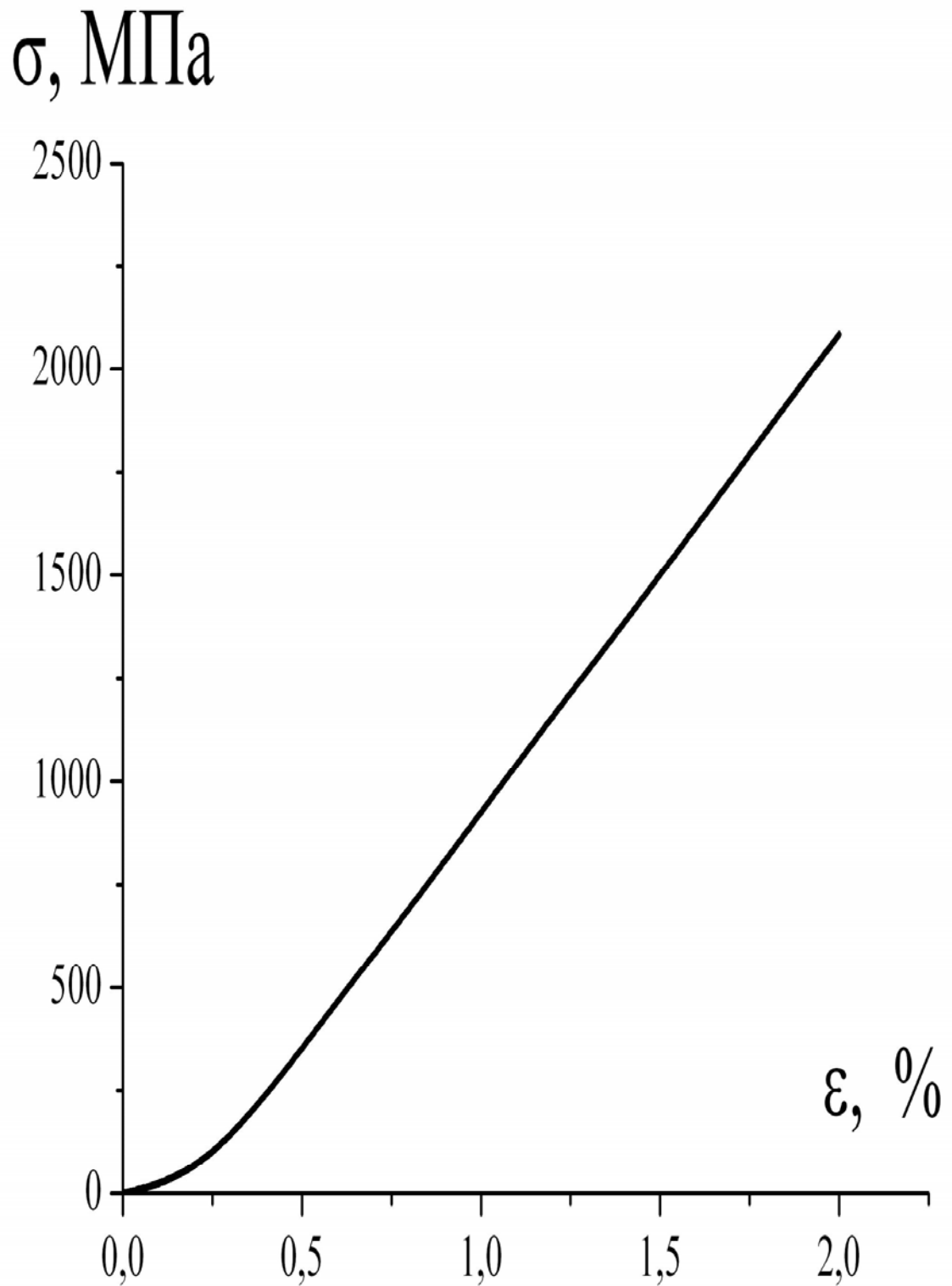


Рисунок 2.21 - Экспериментальная диаграмма растяжения АТМ кевлар (США), при значениях  $\dot{\epsilon} = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ ,  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

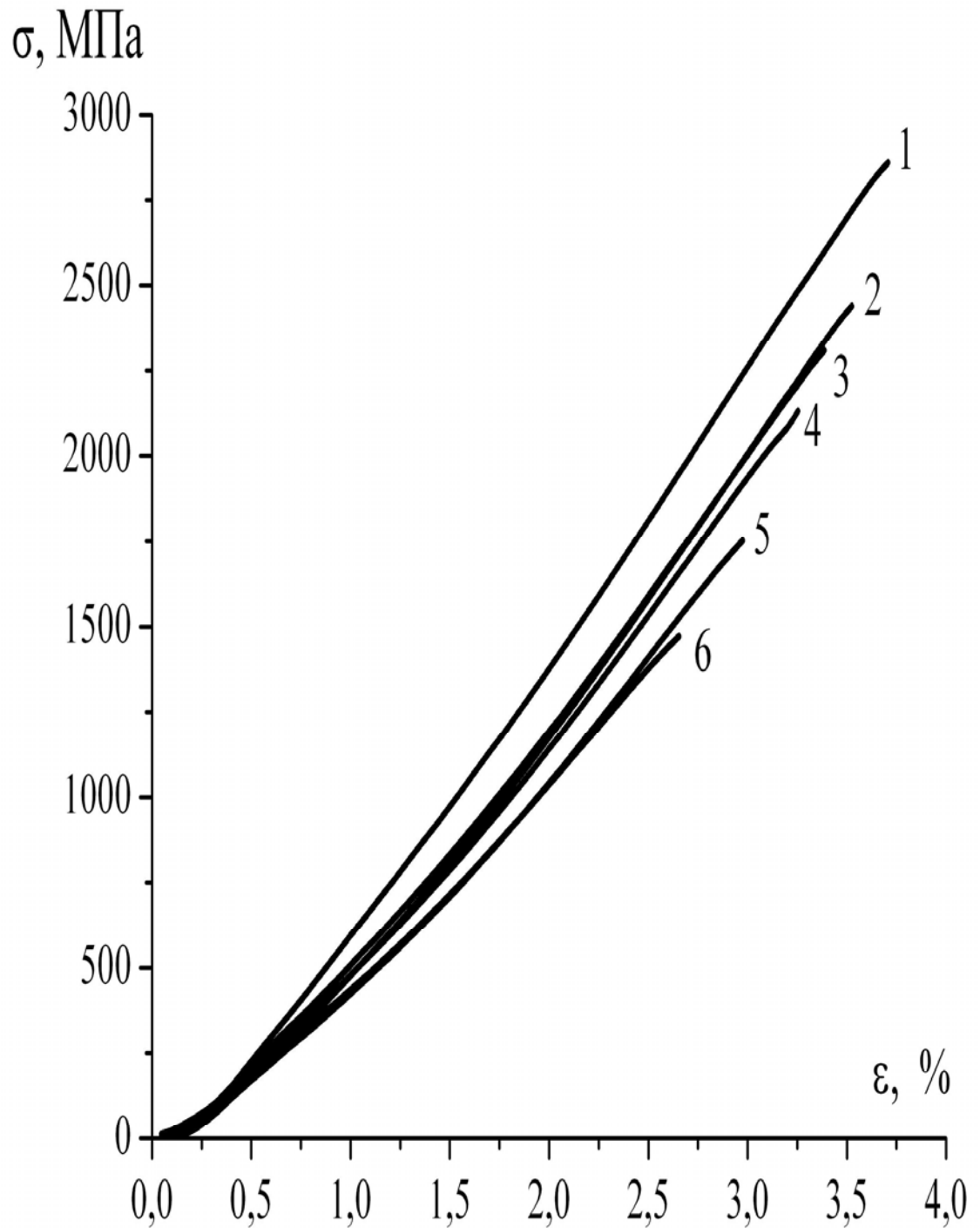


Рисунок 2.22 - Экспериментальная диаграмма растяжения АТМ СВМ, при значении  $\dot{\epsilon} = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$  для различных значений температуры  $T = 20$  (1),  $100$  (2),  $150$  (3),  $200$  (4),  $250$  (5),  $300$  (6) °C

Графики процессов растяжения АТМ СВМ при значении скорости деформации  $\dot{\epsilon} = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$  и различных значениях температуры  $T = 20, 100, 150, 200, 250, 300 \text{ } ^\circ\text{C}$  приведены на рис.2.22.

Общее, что объединяет приведенные диаграммы растяжения АТМ, это достаточно большие значение разрывных напряжений (2,1 - 3,3 ГПа), а также не очень большие значения разрывных деформаций (2,2 - 4,0 %).

Указанное свойство всех изучаемых АТМ обусловлено большими значениями их деформационной жесткости.

При этом, численные значения у модулей упругости заключены в интервале 81 - 122 ГПа.

Немаловажное значение при изучении деформационных свойств АТМ имеет также изучение зависимостей величин их прочностей и модулей упругости в процессе изменения температуры.

С ростом температуры у АТМ уменьшаются разрывные значения напряжений и деформаций, что можно увидеть на примере графика экспериментальной диаграммы растяжения АТМ СВМ, при значении  $\dot{\epsilon} = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$  для различных значений температуры  $T = 20 (1), 100 (2), 150 (3), 200 (4), 250 (5), 300 (6) \text{ } ^\circ\text{C}$  (рис. 2.22).

Графически изменения с ростом температуры разрывных величин напряжений, а также моделей упругости АТМ можно наблюдать на рис. 2.23 - рис. 2.29:

- АТМ терлон (Россия) - рис. 2.23;
- АТМ армос (Россия) - рис. 2.24;
- АТМ русар (Россия) - рис. 2.25;

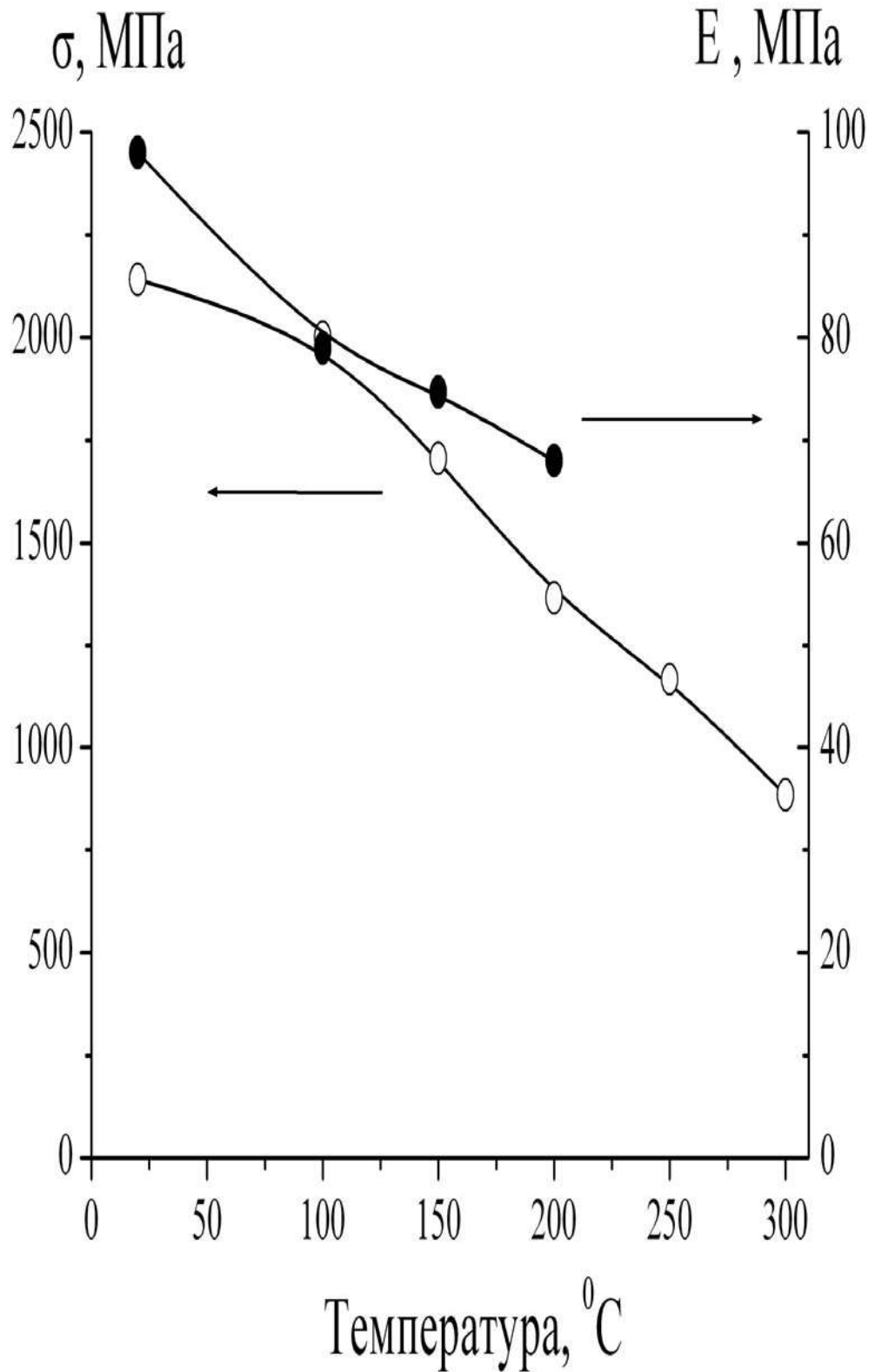


Рисунок 2.23 - График изменения прочности ( $\sigma$ ) и модуля упругости ( $E$ ) АТМ терлон (Россия) от температуры

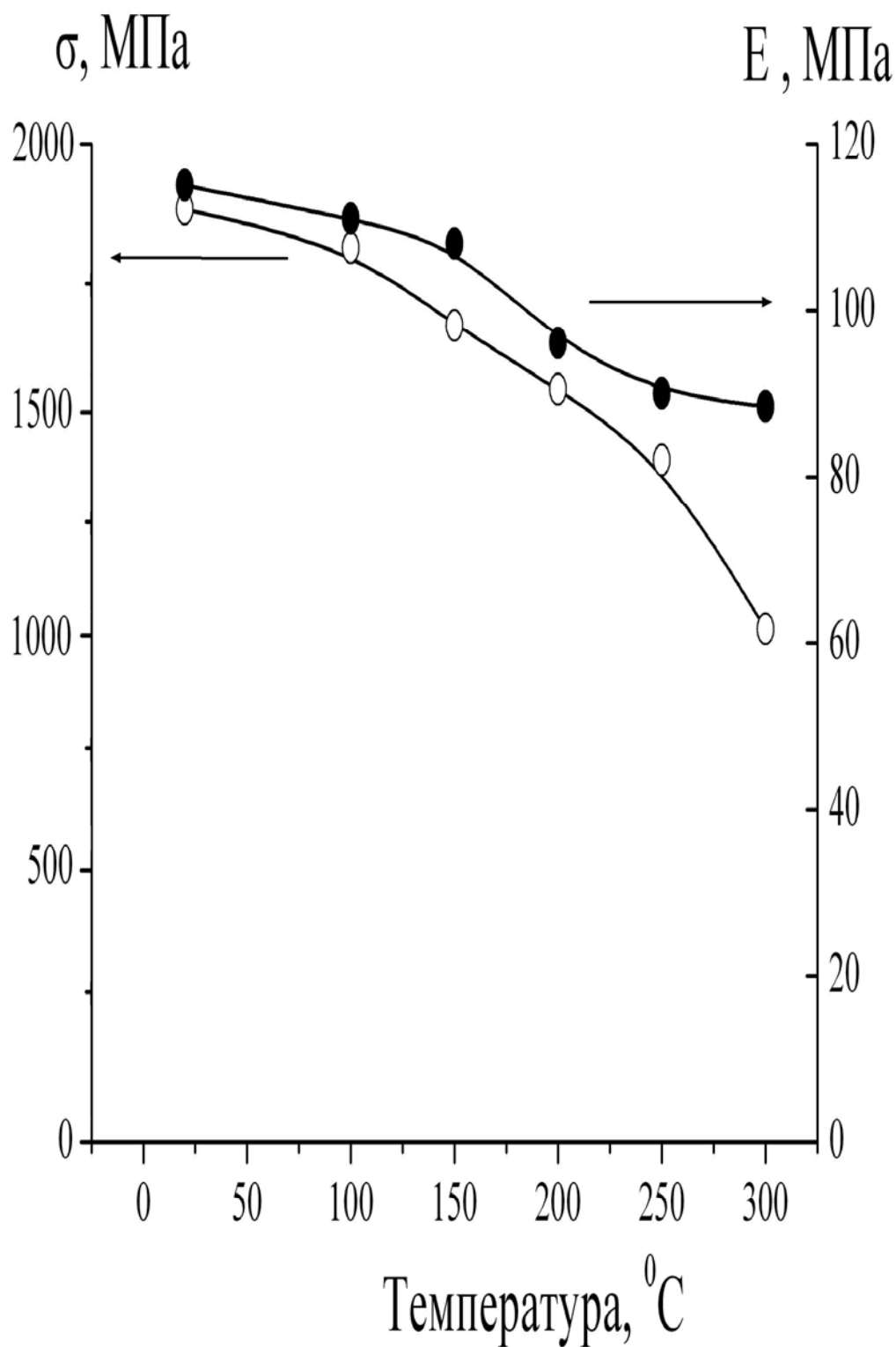


Рисунок 2.24 - График изменения прочности ( $\sigma$ ) и модуля упругости ( $E$ ) АТМ армос (Россия) от температуры

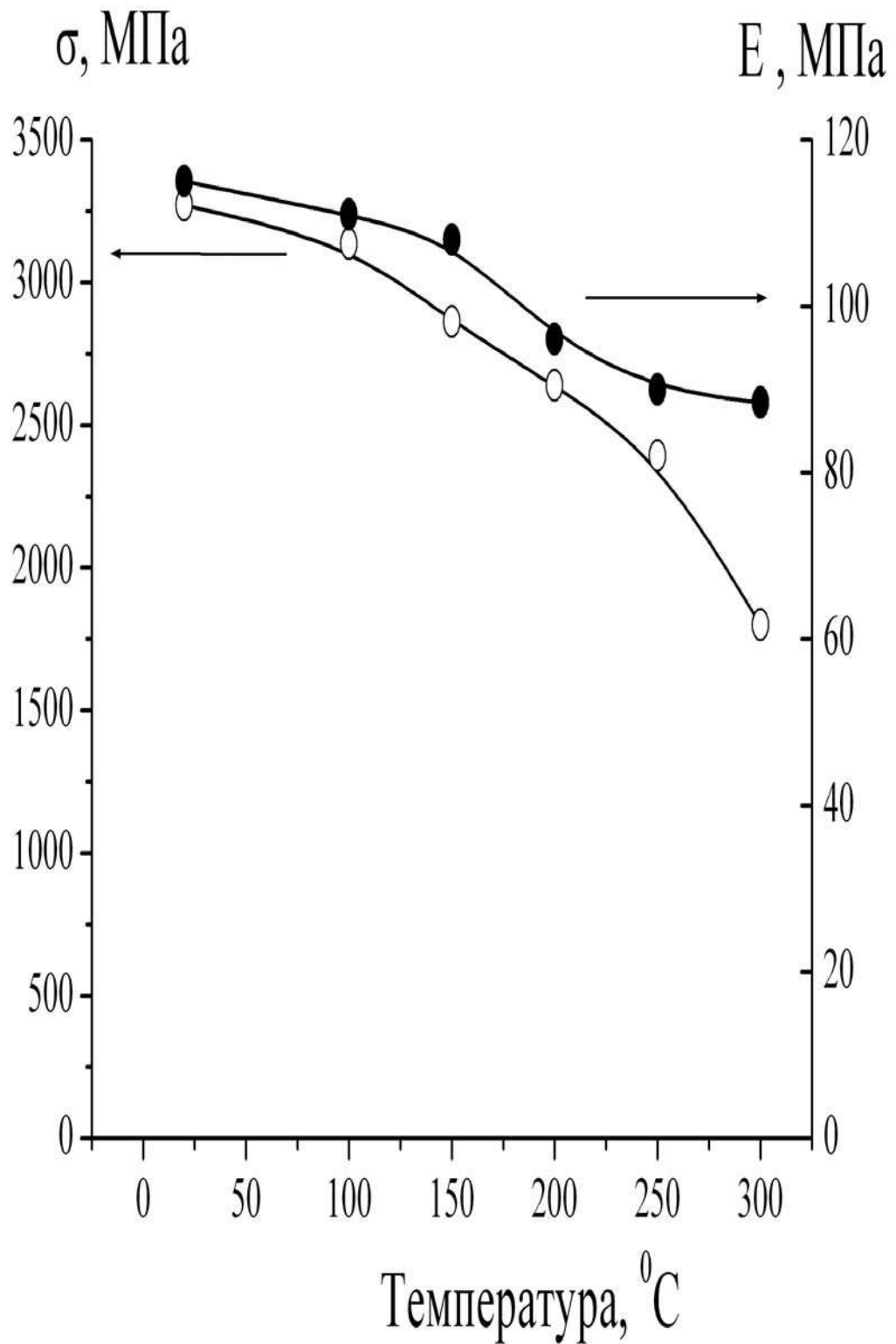


Рисунок 2.25 - График изменения прочности ( $\sigma$ ) и модуля упругости ( $E$ ) АТМ русар (Россия) от температуры



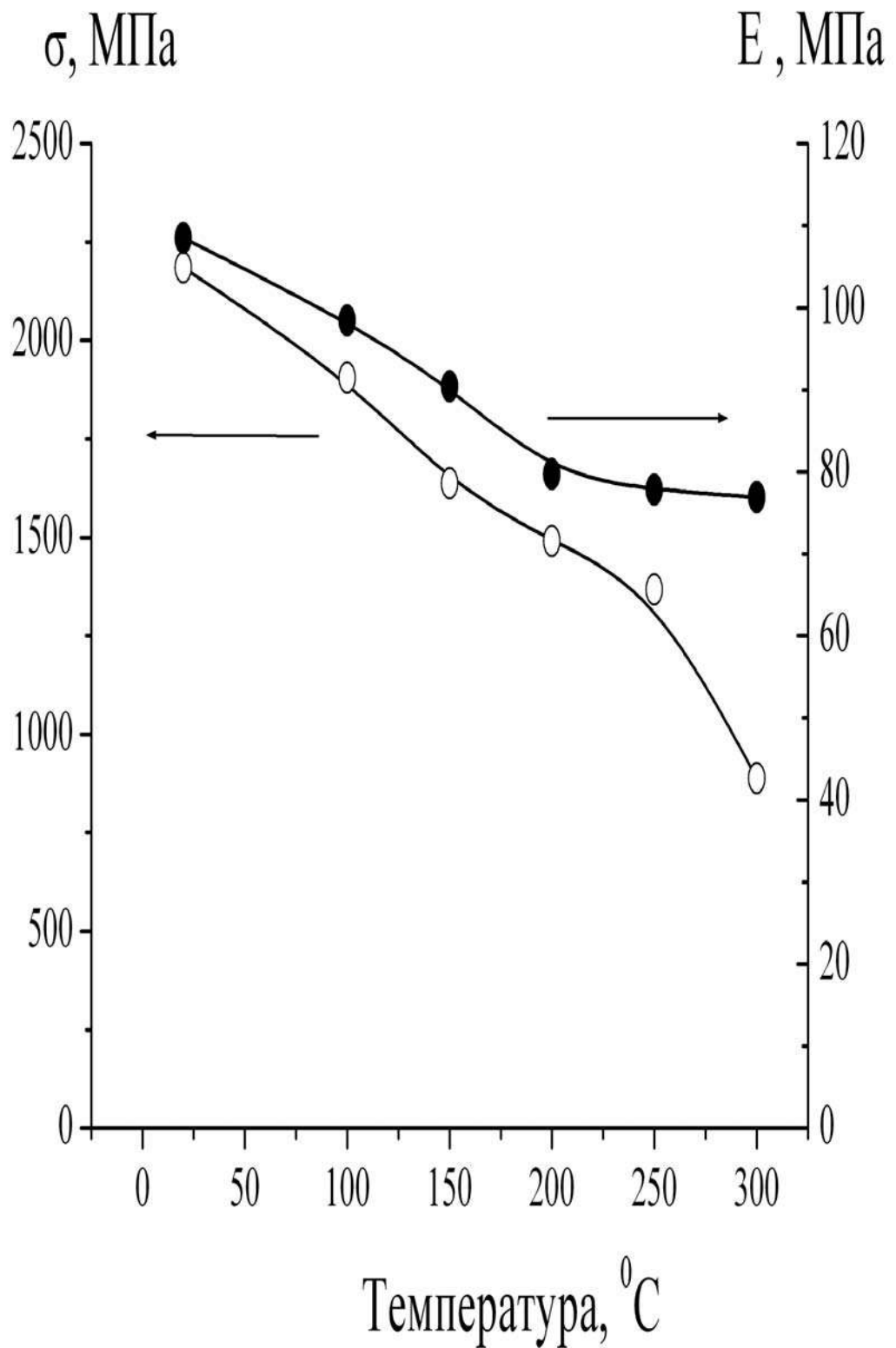


Рисунок 2.26 - График изменения прочности ( $\sigma$ ) и модуля упругости ( $E$ ) АТМ СВМ (Россия) от температуры

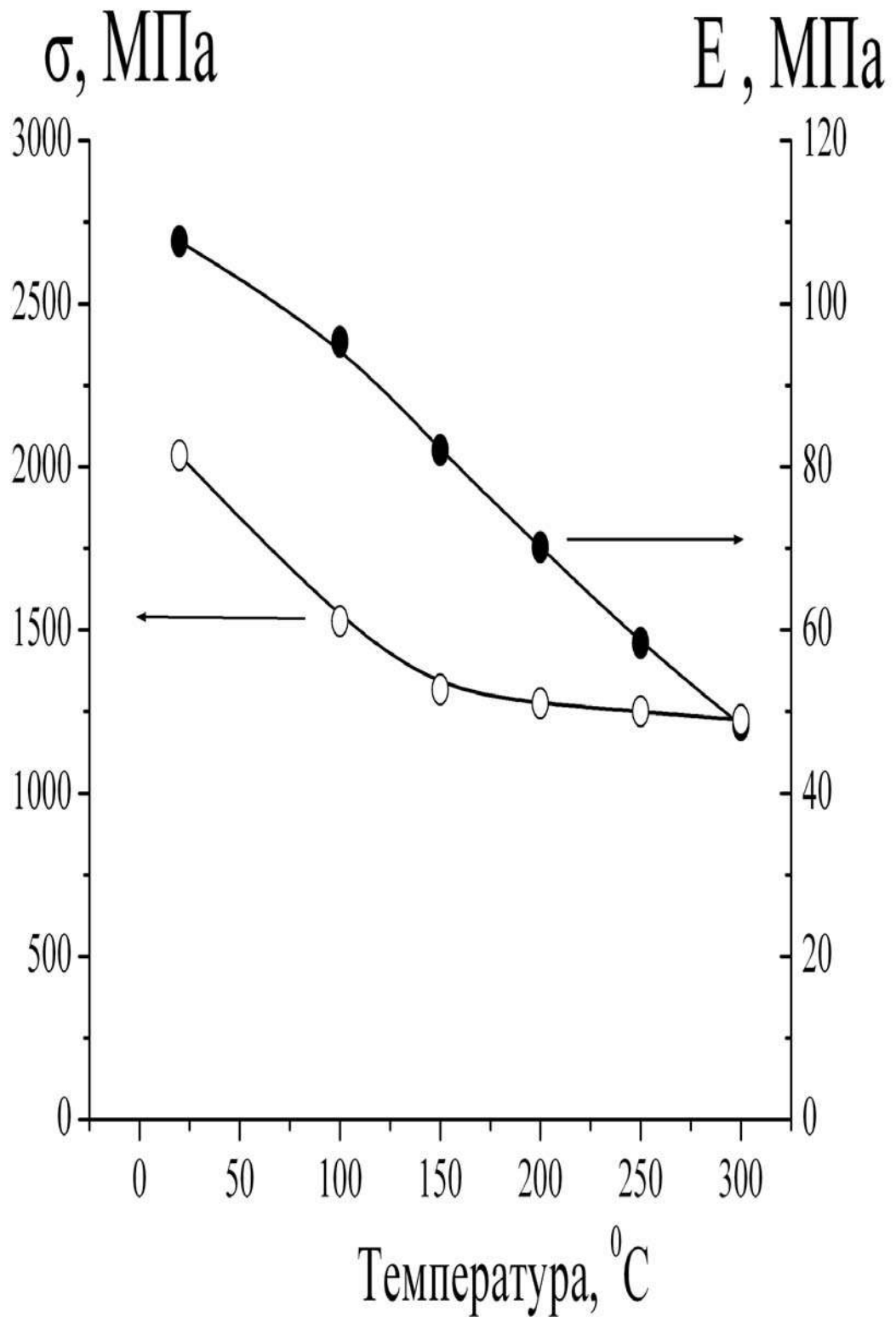


Рисунок 2.27 - График изменения прочности ( $\sigma$ ) и модуля упругости ( $E$ ) АТМ технора (Нидерланды) от температуры

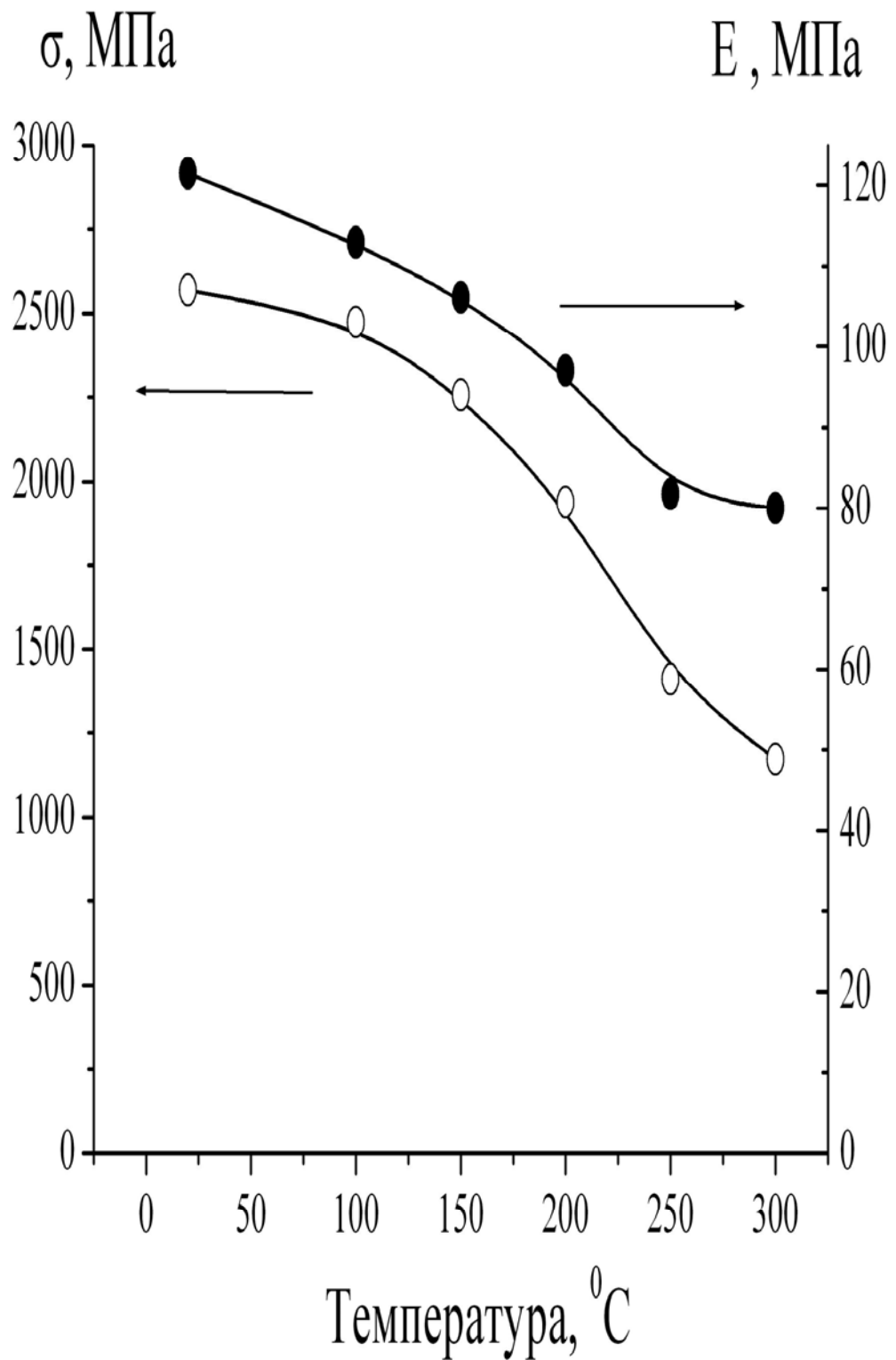


Рисунок 2.28 - График изменения прочности ( $\sigma$ ) и модуля упругости ( $E$ ) АТМ титанон (Нидерланды) от температуры

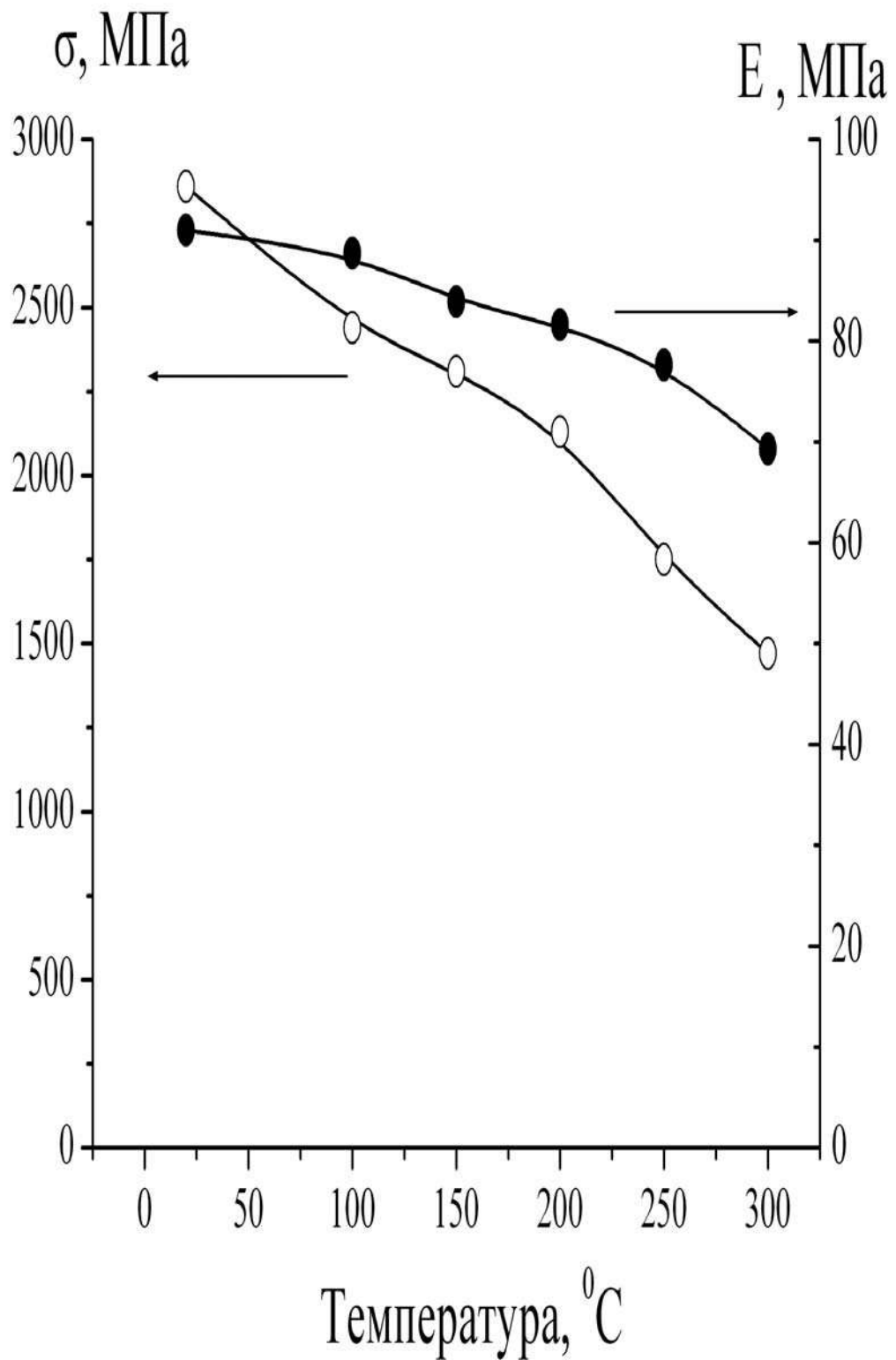


Рисунок 2.29 - График изменения прочности ( $\sigma$ ) и модуля упругости ( $E$ ) АТМ кевлар (США) от температуры

- АТМ СВМ (Россия) - рис. 2.26;
- АТМ техноора (Нидерланды) - рис. 2.27;
- АТМ тварон (Нидерланды) - рис. 2.28;
- АТМ кевлар (США) - рис. 2.29.

Экспериментальные диаграммы АТМ могут служить для определения таких характеристик, как:

- деформационная жесткость (или модуль упругости)  $E_0$ ;
- прочность (или значение разрывного напряжения)  $\sigma_{разр.}$ ;
- значение разрывной деформации  $\varepsilon_{разр.}$ .

При этом значения прочности и разрывной деформации определяются как координаты конечной точки диаграммы растяжения ( $\varepsilon_{разр.}$ ,  $\sigma_{разр.}$ ), а значение деформационной жесткости определяется как тангенс угла наклона касательной в начальной точке диаграммы растяжения:

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

Если исследовать диаграммы растяжения АТМ сложной макроструктуры типа шнуров, канатов, лент или тканей, то они выглядят несколько иначе, чем диаграммы растяжения АТМ простой структуры типа нитей.

Для диаграмм растяжения АТМ сложной макроструктуры свойственно наличие еще одного участка в самом начале диаграммы, имеющего более пологий вид, то есть АТМ в этом месте обладает меньшей деформационной жесткостью.

Это объясняется тем, что в начале процесса растяжения происходит деформация макроструктуры АТМ, а не самих арамидных нитей.

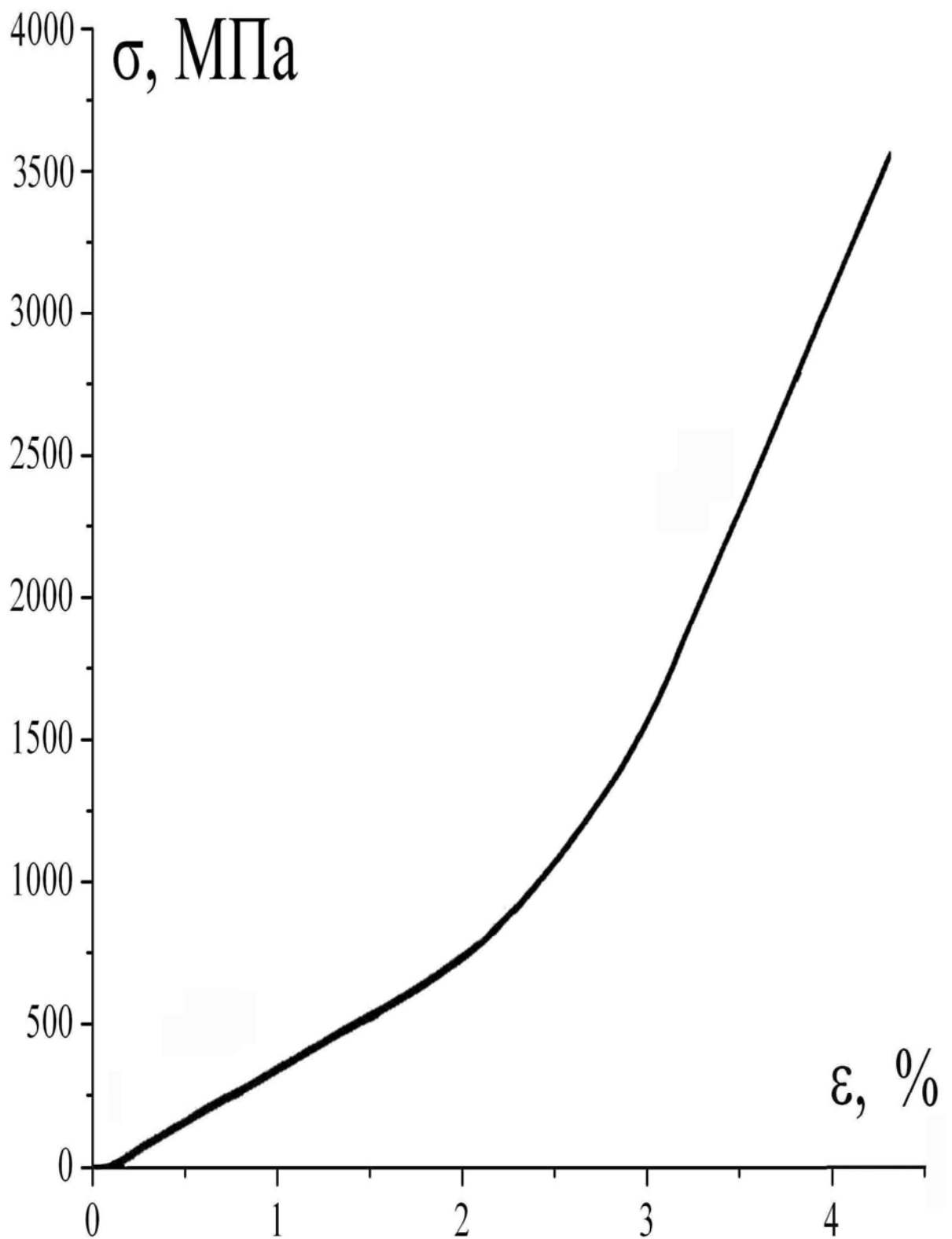


Рисунок 2.30 - Экспериментальная диаграмма растяжения огнестойкой АТМ ткани СВМ при значениях  $\dot{\epsilon} = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ ,  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

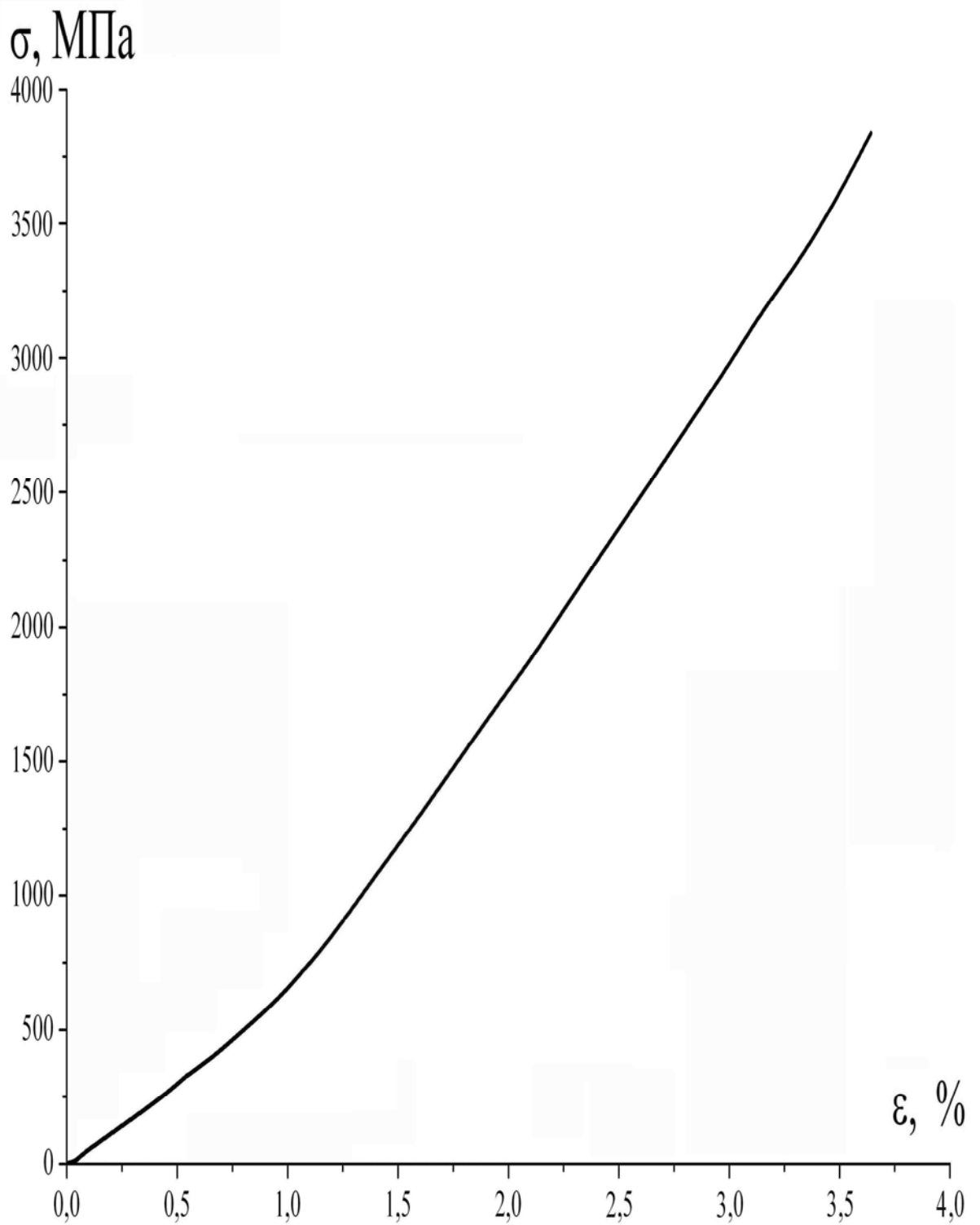


Рисунок 2.31 - Экспериментальная диаграмма растяжения бронезащитной АТМ ткани СВМ при значениях  $\dot{\epsilon} = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ ,  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

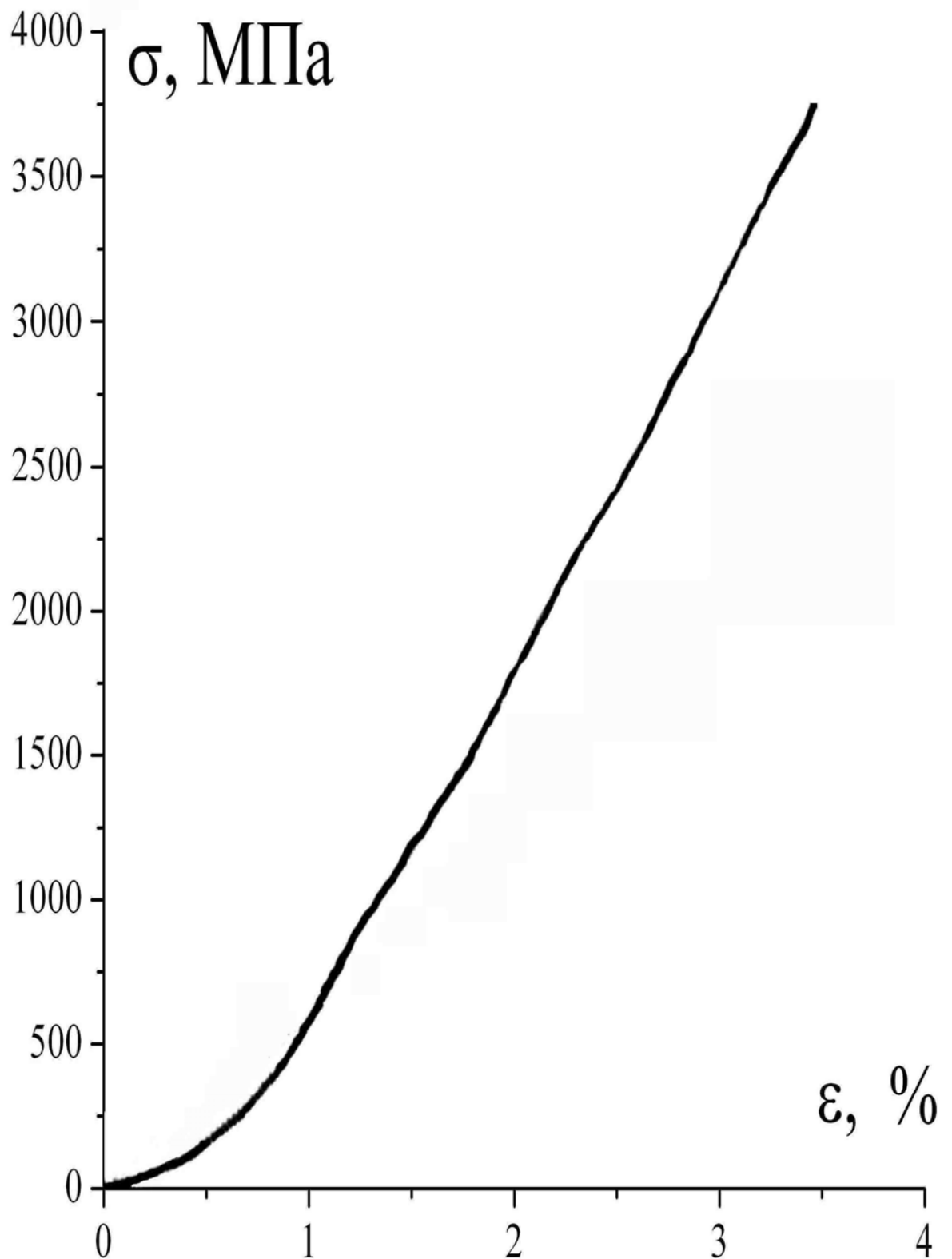


Рисунок 2.32 - Экспериментальная диаграмма растяжения АТМ шнура СВМ при значениях  $\dot{\epsilon} = 4,17 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$ ,  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$



Примеры диаграмм растяжения АТМ сложной макроструктуры приведены на рис. 2.30 - рис. 2.32:

- огнестойкой АТМ ткани СВМ (рис. 2.30);
- бронезащитной АТМ ткани СВМ (рис. 2.31);
- АТМ шнура СВМ (рис. 2.32).

Из экспериментальных диаграмм растяжения АТМ сложной макроструктуры можно сделать выводы:

- у них вязкоупруго-пластические свойства выражены более ярко, чем у АТМ простой макроструктуры;
- у них наблюдается снижение деформационной жесткости по сравнению с АТМ простой макроструктуры.

## **2.5. Исследование АТМ в режиме релаксации**

Как уже отмечалось выше, экспериментальные исследования АТМ в режимах релаксации проводились на релаксометрах напряжений (рис. 2.8, рис. 2.9).

В результате таких экспериментов были получены семейства релаксации, пример которых для АТМ СВМ приведен на рис. 2.33.

Для дальнейшего удобства построения математической модели релаксации АТМ указанные экспериментальные семейства релаксации путем деления на соответствующие значения приложенной деформации  $\varepsilon$  переводились в экспериментальные семейства модуля релаксации  $E_{\varepsilon t}$ , пример которого приведен на рис. 2.34.

Полученная при этом путем аппроксимации семейства модуля релаксации нормированными функциями математическая модель модуля релаксации АТМ имеет вид:

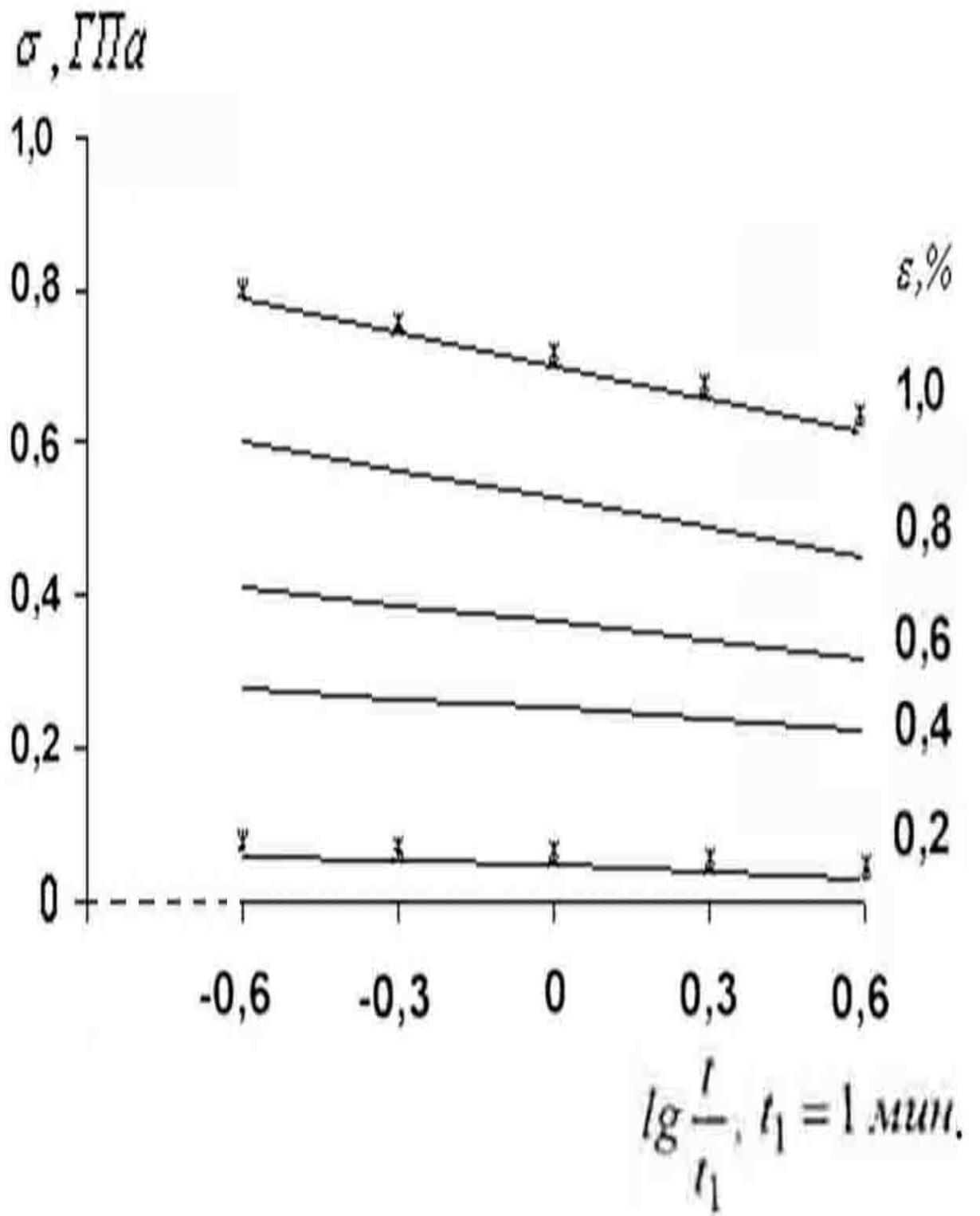


Рисунок 2.33 - Экспериментальное семейство релаксации АТМ СВМ (сплошные линии) при значении  $T = 20^\circ\text{C}$  и расчетные значения по математической модели релаксации АТМ (звездочки)

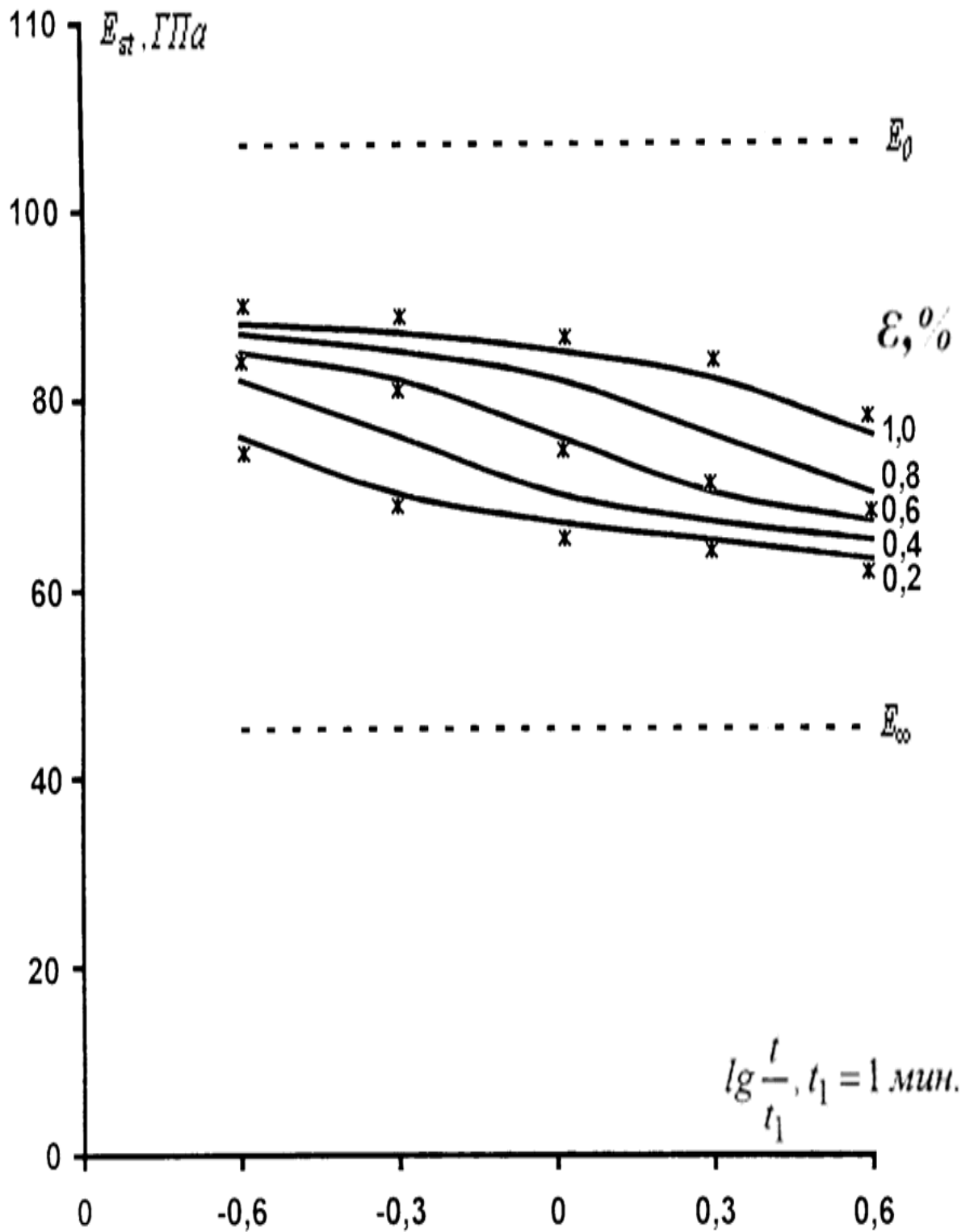


Рисунок 2.34 Экспериментальное семейство модуля релаксации АТМ СВМ (сплошные линии) при значении  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  и расчетные значения по математической модели релаксации АТМ (звездочки)

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

В качестве нормированной функции  $\varphi_{\varepsilon t}$  выбрана функция НАЛ, предложенная для такого моделирования Макаровым А.Г. и представляющая собой интегральную функцию вероятностного распределения Коши, обладающего свойством аддитивности:

$$\varphi_{\varepsilon t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} \right) \quad (2.4)$$

Здесь имеют место следующие обозначения:

- $E_{\varepsilon t} = \sigma/\varepsilon$  - модуль релаксации АТМ;
- $E_0$  - модуль упругости АТМ;
- $E_\infty$  - модуль вязкоупругости АТМ;
- $t$  - временное значение;
- $b_{n\varepsilon}$  - значение интенсивности релаксации АТМ;
- $\tau_\varepsilon$  - значение релаксационного времени АТМ.

Следует заметить, что:

- модуль упругости АТМ представляет собой верхнюю асимптоту экспериментального семейства модуля релаксации АТМ (рис.2.34);
- модуль вязкоупругости АТМ представляет собой нижнюю асимптоту экспериментального семейства модуля релаксации АТМ (рис.2.34);
- интенсивности релаксации АТМ характеризует скорость прохождения процесса релаксации АТМ;
- релаксационное время АТМ характеризует то, насколько быстро проходит релаксация АТМ.

Адекватность предложенного математического моделирования релаксации АТМ подтверждается тем, что расчетные значения для напряжения (рис. 2.33) и для модуля релаксации (рис. 2.34) располагаются достаточно близко от соответствующих экспериментальных кривых.

## 2.6. Исследование АТМ в режиме ползучести

Как уже отмечалось выше, экспериментальные исследования АТМ в режимах ползучести проводились на релаксометрах деформаций (рис. 2.10, рис. 2.11).

В результате таких экспериментов были получены семейства ползучести, пример которых для АТМ СВМ приведен на рис. 2.35.

Для дальнейшего удобства построения математической модели ползучести АТМ указанные экспериментальные семейства ползучести путем деления на соответствующие значения приложенного напряжения  $\sigma$  переводились в экспериментальные семейства податливости  $D_{\sigma t}$ , пример которого приведен на рис. 2.36.

Полученная при этом путем аппроксимации семейства податливости нормированными функциями математическая модель податливости АТМ имеет вид:

$$D_{\sigma t} = D_0 + (D_{\infty} - D_0) \cdot \varphi_{\sigma t}. \quad (2.5)$$

В качестве нормированной функции  $\varphi_{\sigma t}$  выбрана функция НАЛ, предложенная для такого моделирования Макаровым А.Г. и представляющая собой интегральную функцию вероятностного распределения Коши, обладающего свойством аддитивности:

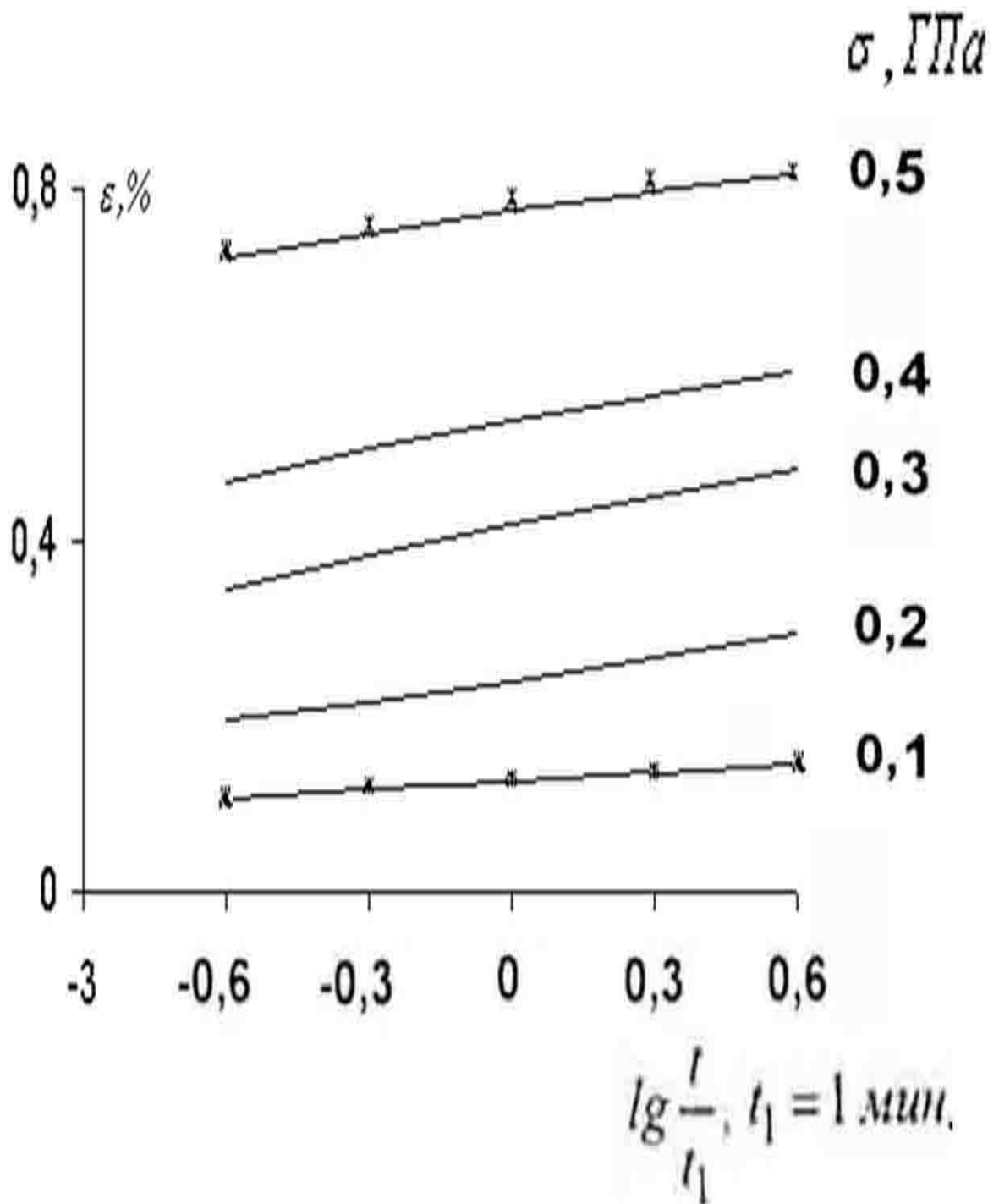


Рисунок 2.35 - Экспериментальное семейство ползучести АТМ СВМ (сплошные линии) при значении  $T = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$  и расчетные значения по математической модели ползучести АТМ (звездочки)

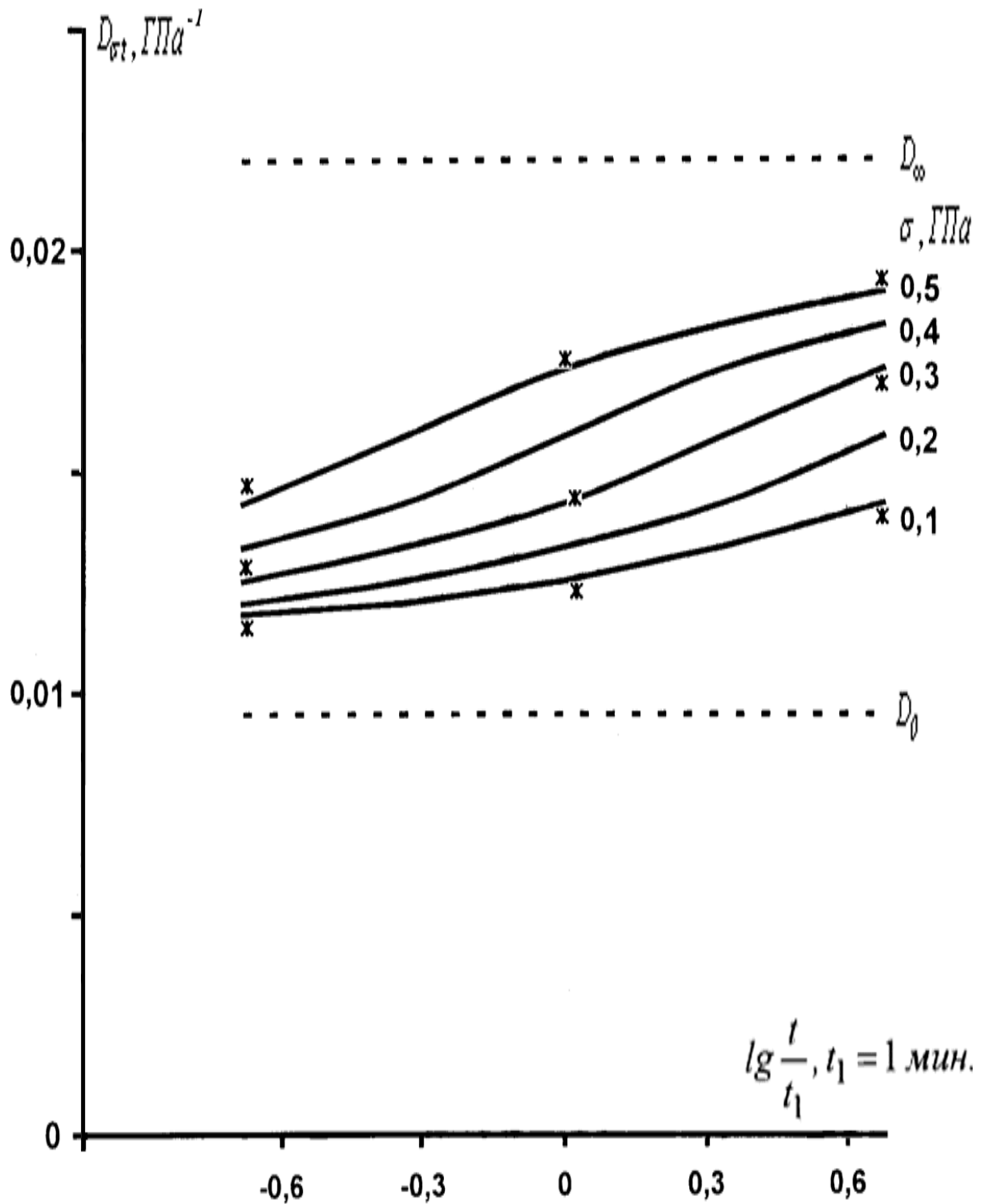


Рисунок 2.36 Экспериментальное семейство податливости АТМ СВМ (сплошные линии) при значении  $T = 20^\circ\text{C}$  и расчетные значения по математической модели ползучести АТМ (звездочки)

$$\varphi_{\sigma t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \ln \frac{t}{\tau_{\sigma}} \right). \quad (2.6)$$

Здесь имеют место следующие обозначения:

- $D_{\sigma t} = \varepsilon/\sigma$  - податливость АТМ;
- $D_0$  - начальная податливость АТМ;
- $D_{\infty}$  - конечная податливость АТМ;
- $t$  - временное значение;
- $b_{n\sigma}$  - значение интенсивности ползучести АТМ;
- $\tau_{\sigma}$  - значение деформационного времени АТМ.

Следует заметить, что:

- начальная податливость АТМ представляет собой нижнюю асимптоту экспериментального семейства податливости АТМ (рис.2.36);
- модуль вязкоупругости АТМ представляет собой верхнюю асимптоту экспериментального семейства податливости АТМ (рис.2.36);
- интенсивности ползучести АТМ характеризует скорость прохождения процесса ползучести АТМ;
- деформационное время АТМ характеризует то, насколько быстро проходит ползучесть АТМ.

Адекватность предложенного математического моделирования ползучести АТМ подтверждается тем, что расчетные значения для деформации (рис. 2.35) и для податливости (рис. 2.36) располагаются достаточно близко от соответствующих экспериментальных кривых.



## **2.7. Выводы по главе 2**

Таким образом, в главе приведена информация по производителям изучаемых АТМ, как по российским, так и по зарубежным.

В главе дано описание приборов для проведения экспериментальных исследований деформационных процессов АТМ.

Предложены математические модели процессов релаксации и процессов ползучести АТМ на основе аппроксимации одноименных экспериментальных семейств.

Показано, что предложенные математические модели релаксации АТМ и математические модели ползучести АТМ являются адекватными и позволяют прогнозировать, соответственно, расчетные значения напряжения и деформации с большой степенью точности.

### ГЛАВА 3. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ АТМ

В главе изучаются:

- прогнозирование релаксации АТМ;
- прогнозирование ползучести АТМ;
- прогнозирование восстановления АТМ;
- усадка АТМ.

Прогнозирование указанных процессов осуществляется на основе определяющих интегральных уравнений вязкоупругости АТМ типа Больцмана-Вольтерра с интегральными ядрами, соответствующими математическим моделям релаксации и ползучести АТМ, разработанными во второй главе.

#### 3.1. Прогнозирование релаксации АТМ

Прогнозирование релаксации АТМ будем проводить на основе определяющего интегрального уравнения типа Больцмана-Вольтерра, имеющего вид:

$$\sigma_t = E_0 \varepsilon_t - (E_0 - E_\infty) \cdot \int_0^t \varepsilon_\theta \cdot \varphi'_{\varepsilon, t-\theta} d\theta. \quad (3.1)$$

Здесь в качестве интегрального ядра  $\varphi'_{\varepsilon, t}$  выбрана логарифмическая производная нормированной функции НАЛ, предложенной в качестве основы математической модели релаксации АТМ во второй главе:

$$\varphi'_{\varepsilon, t} = \frac{\partial \varphi_{\varepsilon, t}}{\partial t}. \quad (3.2)$$

Учитывая то, что функция НАЛ в случае процесса релаксации АТМ имеет вид:

$$\varphi_{\varepsilon t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} \right), \quad (3.3)$$

получаем:

$$\varphi'_{\varepsilon,t} = \frac{\partial \varphi_{\varepsilon,t}}{\partial t} = \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon,t}^2} \cdot \frac{1}{t}, \quad (3.4)$$

где:

$$W_{\varepsilon,t} = \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \ln \frac{t}{\tau_\varepsilon} = \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \left( \ln \left( \frac{t}{t_1} \right) + \ln \left( \frac{t_1}{\tau_\varepsilon} \right) \right) - \quad (3.5)$$

подынтегральный аргумент-функционал.

Заменяя в (3.1)  $s = t - \theta$ , имеем:

$$\sigma_t = E_o \varepsilon_t - (E_o - E_\infty) \cdot \int_0^t \varepsilon_{t-s} \cdot \varphi'_{\varepsilon s} ds, \quad (3.6)$$

Тогда уравнение (3.6), (3.4) принимает вид

$$\sigma_t = E_o \varepsilon_t - (E_o - E_\infty) \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \int_0^t \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon s}^2} \cdot \frac{ds}{s}. \quad (3.7)$$

Или:

$$\sigma_t = E_o \varepsilon_t - (E_o - E_\infty) \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \int_0^t \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon s}^2} \cdot d(\ln s). \quad (3.8)$$

Обозначим последний интеграл через:

$$I = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \int_0^t \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon s}^2} \cdot d(\ln s). \quad (3.9)$$

Или:

$$I = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \int_0^{t_1} \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon s}^2} \cdot d(\ln s) + \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \int_{t_1}^t \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon s}^2} \cdot d(\ln s) \quad (3.10)$$

То есть:

$$I = I^* + \tilde{I}, \quad (3.11)$$

$$I^* = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \int_0^{t_1} \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon s}^2} \cdot d(\ln s), \quad (3.12)$$

$$\tilde{I} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \int_{t_1}^t \varepsilon_{t-s} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon s}^2} \cdot d(\ln s). \quad (3.13)$$

Интегралы  $I$  и  $I^*$  - несобственные в точке  $t = 0$ .

Вычислим интеграл (3.12) по теореме о среднем:

$$I^* \approx \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \varepsilon_{t-\xi} \cdot \varphi_{\varepsilon s} \Big|_0^{t_1}, \quad (3.14)$$

здесь:  $\xi \in (0; t_1]$ .

Для интеграла (3.13) имеем:

$$I^* \approx \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \varepsilon_{t-\xi} \cdot \int_0^{t_1} \frac{1}{1+W_{\varepsilon s}^2} \cdot d(\ln s). \quad (3.15)$$

Далее:

$$I^* \approx \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \varepsilon_{t-\xi} \cdot \varphi_{\varepsilon t_1}. \quad (3.16)$$

Для численного интегрирования разобьем равномерно область  $(0; t]$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} t_0 = 0, t_1 = \frac{t}{n}, \dots, t_k = \frac{kt}{n}, \dots, t_n = t, \\ \xi_k = \frac{t_k + t_{k-1}}{2}, \\ k = 1, \dots, n. \end{array} \right. \quad (3.17)$$

Формула

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{I}_1 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon\xi_k}^2} \cdot \Delta_k, \\ \Delta_k = \frac{\Delta}{\xi_k}, \\ \Delta = \frac{t}{n} \end{array} \right. \quad - \quad (3.18)$$

есть средняя интегральная сумма.

Или:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{I}_1 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \frac{t}{n} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon\xi_k}^2} \cdot \frac{1}{\xi_k}, \\ \xi_k = \frac{t_k - t_{k-1}}{2} = \frac{t}{2n}(2k-1), \\ \ln \xi_k = \ln\left(\frac{t}{2n}(2k-1)\right) = \ln t + \ln(2k-1) - \ln(2n). \end{array} \right. \quad . \quad (3.19)$$

Далее:

$$\tilde{I}_1 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot 2 \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon\xi_k}^2} \cdot \frac{1}{2k-1}. \quad (3.20)$$

$$I_1 = \varepsilon_{t-\xi_1} \cdot \varphi_{\varepsilon_1} + \frac{2}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon\xi_k}^2} \cdot \frac{1}{2k-1}. \quad (3.21)$$

Последняя формула (3.21) - приближенное значение интеграла (3.16) вычисленное по серединам отрезков разбиения.

Формула:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{I}_2 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon t_k}^2} \cdot \Delta_k, \\ \Delta_k = \frac{\Delta}{t_k}, \\ \Delta = \frac{t}{n}. \end{array} \right. \quad - \quad (3.22)$$

есть правая интегральная сумма.

Или:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{I}_2 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \frac{t}{n} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon t_k}^2} \cdot \frac{1}{t_k}, \\ t_k = \frac{kt}{n}, \\ \ln t_k = \ln\left(\frac{kt}{n}\right) = \ln t + \ln k - \ln n. \end{array} \right. \quad . \quad (3.23)$$

Далее:

$$\tilde{I}_2 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon t_k}^2} \cdot \frac{1}{k}. \quad (3.24)$$

$$I_2 = \varepsilon_{t-t_1} \cdot \varphi_{\varepsilon t_1} + \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon t_k}^2} \cdot \frac{1}{k}. \quad (3.25)$$

Последняя формула (3.25) - приближенное значение интеграла (3.16) вычисленное по правым границам отрезков разбиения.

Формула:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{I}_2 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon t_{k-1}}^2} \cdot \Delta_{k-1}, \\ \Delta_{k-1} = \frac{\Delta}{t_{k-1}}, \\ \Delta = \frac{t}{n}. \end{array} \right. \quad - \quad (3.26)$$

есть левая интегральная сумма.

Или:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{I}_3 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \frac{t}{n} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon t_{k-1}}^2} \cdot \frac{1}{t_{k-1}}, \\ t_{k-1} = \frac{(k-1) \cdot t}{n}, \\ \ln t_{k-1} = \ln \left( \frac{(k-1) \cdot t}{n} \right) = \ln t + \ln(k-1) - \ln n, \\ k \geq 2 \end{array} \right. \quad - \quad (3.27)$$

Далее:

$$\tilde{I}_3 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon t_{k-1}}^2} \cdot \frac{1}{k-1}. \quad (3.28)$$

$$I_3 = \varepsilon_t \cdot \varphi_{\varepsilon t_1} + \frac{1}{\pi \cdot b_{n\varepsilon}} \cdot \sum_{k=2}^n \varepsilon_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{1+W_{\varepsilon t_{k-1}}^2} \cdot \frac{1}{k-1}. \quad (3.29)$$

Последняя формула (3.29) - приближенное значение интеграла (3.16) вычисленное по левым границам отрезков разбиения.

Для оценки точности численного интегрирования и формул (3.21), (3.25) и (3.29) усредним правое и левое значение интеграла (3.11):

$$I = \frac{I_2 + I_3}{2} \pm \frac{I_2 - I_3}{2}. \quad (3.30)$$

Обозначая:

$$\alpha = \frac{I_2 + I_3}{2} - \quad (3.31)$$

получаем приближенное значение интеграла (3.11).

Величину доверительного интервала можно вычислить по формуле:

$$\beta = \pm \frac{I_2 - I_3}{2}. \quad (3.32)$$

Таким образом, численное значение интеграла (3.11) лежит в области:

$$I \in (\alpha - \beta, \alpha + \beta). \quad (3.33)$$

### 3.2. Прогнозирование ползучести АТМ

Прогнозирование ползучести АТМ будем проводить на основе определяющего интегрального уравнения типа Больцмана-Вольтерра, имеющего вид:

$$\varepsilon_t = D_0 \sigma_t + (D_\infty - D_0) \cdot \int_0^t \sigma_\theta \cdot \varphi'_{\sigma,t-\theta} d\theta. \quad (3.34)$$

Здесь в качестве интегрального ядра  $\varphi'_{\sigma,t}$  выбрана логарифмическая производная нормированной функции НАЛ, предложенной в качестве основы математической модели ползучести АТМ во второй главе:

$$\varphi'_{\sigma,t} = \frac{\partial \varphi_{\sigma,t}}{\partial t}. \quad (3.35)$$

Учитывая то, что функция НАЛ в случае процесса ползучести АТМ



имеет вид:

$$\varphi_{\sigma t} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \ln \frac{t}{\tau_{\sigma}} \right), \quad (3.36)$$

получаем:

$$\varphi'_{\sigma,t} = \frac{\partial \varphi_{\sigma,t}}{\partial t} = \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma,t}^2} \cdot \frac{1}{t}, \quad (3.37)$$

где:

$$W_{\sigma,t} = \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \ln \frac{t}{\tau_{\sigma}} = \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \left( \ln \left( \frac{t}{t_1} \right) + \ln \left( \frac{t_1}{\tau_{\sigma}} \right) \right) - \quad (3.38)$$

подынтегральный аргумент-функционал.

Заменяя в (3.34)  $s = t - \theta$ , имеем:

$$\varepsilon_t = D_o \sigma_t + (D_{\infty} - D_o) \cdot \int_0^t \sigma_{t-s} \cdot \varphi'_{\sigma;s} ds, \quad (3.39)$$

Тогда уравнение (3.39), (3.37) принимает вид

$$\varepsilon_t = D_o \sigma_t + (D_{\infty} - D_o) \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \int_0^t \sigma_{t-s} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma,t}^2} \cdot \frac{ds}{s}. \quad (3.40)$$

Или:

$$\varepsilon_t = D_o \sigma_t + (D_{\infty} - D_o) \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \int_0^t \sigma_{t-s} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma,t}^2} \cdot d(\ln s). \quad (3.41)$$

Обозначим последний интеграл через:

$$I = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \int_0^t \sigma_{t-s} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma,t}^2} \cdot d(\ln s). \quad (3.42)$$

Или:

$$I = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \int_0^{t_1} \sigma_{t-s} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma,t}^2} \cdot d(\ln s) + \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \int_{t_1}^t \sigma_{t-s} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma,t}^2} \cdot d(\ln s) \quad (3.43)$$

То есть:

$$I = I^* + \tilde{I}, \quad (3.44)$$

$$I^* = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \int_0^{t_1} \sigma_{t-s} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma t}^2} \cdot d(\ln s), \quad (3.45)$$

$$\tilde{I} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \int_{t_1}^t \sigma_{t-s} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma t}^2} \cdot d(\ln s). \quad (3.46)$$

Интегралы  $I$  и  $I^*$  - несобственные в точке  $t = 0$ .

Вычислим интеграл (3.45) по теореме о среднем:

$$I^* \approx \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \sigma_{t-\xi} \cdot \int_0^{t_1} \frac{1}{1+W_{\sigma t}^2} \cdot d(\ln s), \quad (3.47)$$

где  $\xi \in (0; t_1]$ .

Для интеграла (3.45) имеем:

$$I^* = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \int_0^{t_1} \sigma_{t-s} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma t}^2} \cdot d(\ln s). \quad (3.48)$$

Далее:

$$I^* \approx \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \sigma_{t-\xi} \cdot \varphi_{\sigma t_1}. \quad (3.49)$$

Для численного интегрирования разобьем равномерно область  $(0; t]$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} t_0 = 0, t_1 = \frac{t}{n}, \dots, t_k = \frac{kt}{n}, \dots, t_n = t, \\ \xi_k = \frac{t_k + t_{k-1}}{2}, \\ k = 1, \dots, n. \end{array} \right. \quad (3.50)$$

Формула

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{I}_1 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma\xi_k}^2} \cdot \Delta_k, \\ \Delta_k = \frac{\Delta}{\xi_k}, \\ \Delta = \frac{t}{n} \end{array} \right. \quad - \quad (3.51)$$

есть средняя интегральная сумма.

Или:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{I}_1 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \frac{t}{n} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma\xi_k}^2} \cdot \frac{1}{\xi_k}, \\ \xi_k = \frac{t_k - t_{k-1}}{2} = \frac{t}{2n}(2k-1), \\ \ln \xi_k = \ln\left(\frac{t}{2n}(2k-1)\right) = \ln t + \ln(2k-1) - \ln(2n). \end{array} \right. \quad \cdot \quad (3.52)$$

Далее:

$$\tilde{I}_1 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot 2 \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma\xi_k}^2} \cdot \frac{1}{2k-1}. \quad (3.53)$$

$$I_1 = \sigma_{t-\xi_1} \cdot \varphi_{\sigma t_1} + \frac{2}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-\xi_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma\xi_k}^2} \cdot \frac{1}{2k-1}. \quad (3.54)$$

Последняя формула (3.54) - приближенное значение интеграла (3.49) вычисленное по серединам отрезков разбиения.

Формула:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{I}_2 = \frac{l}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_k} \cdot \frac{l}{1+W_{\sigma t_k}^2} \cdot \Delta_k, \\ \Delta_k = \frac{\Delta}{t_k}, \\ \Delta = \frac{t}{n}. \end{array} \right. \quad - \quad (3.55)$$

есть правая интегральная сумма.

Или:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{I}_2 = \frac{l}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \frac{t}{n} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_k} \cdot \frac{l}{1+W_{\sigma t_k}^2} \cdot \frac{l}{t_k}, \\ t_k = \frac{kt}{n}, \\ \ln t_k = \ln\left(\frac{kt}{n}\right) = \ln t + \ln k - \ln n. \end{array} \right. \quad . \quad (3.56)$$

Далее:

$$\tilde{I}_2 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma t_k}^2} \cdot \frac{1}{k}. \quad (3.57)$$

$$I_2 = \sigma_{t-t_1} \cdot \varphi_{\sigma t_1} + \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_k} \cdot \frac{1}{1+W_{\sigma t_k}^2} \cdot \frac{1}{k}. \quad (3.58)$$

Последняя формула (3.58) - приближенное значение интеграла (3.49) вычисленное по правым границам отрезков разбиения.

Формула:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{I}_2 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{1+W^2_{\sigma t_{k-1}}} \cdot \Delta_{k-1}, \\ \Delta_{k-1} = \frac{\Delta}{t_{k-1}}, \\ \Delta = \frac{t}{n}. \end{array} \right. \quad - \quad (3.59)$$

есть левая интегральная сумма.

Или:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{I}_3 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \frac{t}{n} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{1+W^2_{\sigma t_{k-1}}} \cdot \frac{1}{t_{k-1}}, \\ t_{k-1} = \frac{(k-1) \cdot t}{n}, \\ \ln t_{k-1} = \ln \left( \frac{(k-1) \cdot t}{n} \right) = \ln t + \ln(k-1) - \ln n, \\ k \geq 2 \end{array} \right. \quad - \quad (3.60)$$

Далее:

$$\tilde{I}_3 = \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{1+W^2_{\sigma t_{k-1}}} \cdot \frac{1}{k-1}. \quad (3.61)$$

$$I_3 = \sigma_t \cdot \varphi_{\sigma t_1} + \frac{1}{\pi \cdot b_{n\sigma}} \cdot \sum_{k=2}^n \sigma_{t-t_{k-1}} \cdot \frac{1}{1+W^2_{\sigma t_{k-1}}} \cdot \frac{1}{k-1}. \quad (3.62)$$

Последняя формула (3.62) - приближенное значение интеграла (3.49) вычисленное по левым границам отрезков разбиения.

Для оценки точности численного интегрирования и формул (3.54), (3.58) и (3.62) усредним правое и левое значение интеграла (3.44):

$$I = \frac{I_2 + I_3}{2} \pm \frac{I_2 - I_3}{2}. \quad (3.63)$$

Обозначая:

$$\alpha = \frac{I_2 + I_3}{2} - \quad (3.64)$$

получаем приближенное значение интеграла (3.44).

Величину доверительного интервала можно вычислить по формуле:

$$\beta = \pm \frac{I_2 - I_3}{2}. \quad (3.65)$$

Таким образом, численное значение интеграла (3.44) лежит в области:

$$I \in (\alpha - \beta, \alpha + \beta). \quad (3.66)$$

### 3.3. Прогнозирование восстановления АТМ

Процессы восстановления АТМ разделяются на два вида:

- восстановление после полной силовой разгрузки;
- восстановление после частичной силовой разгрузки.

Восстановление АТМ после полной силовой разгрузки может быть описано формулой:

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_o, t \in [0; t_n] \\ 0, t \in [t_n; t] \end{cases} \quad (\text{ГПа}). \quad (3.67)$$

Условный график восстановления АТМ после полной силовой разгрузки приведен на рис. 3.1.

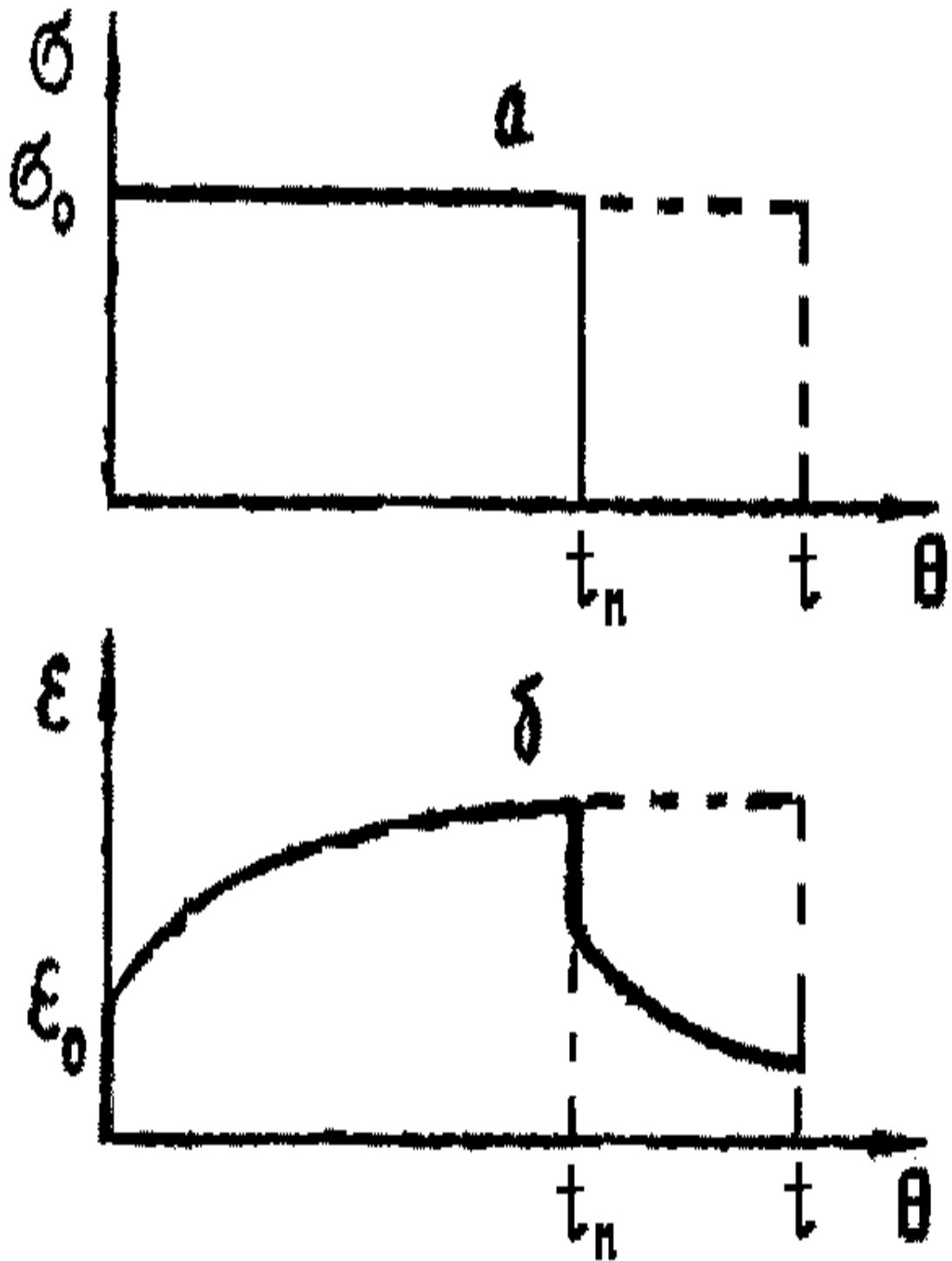


Рисунок 3.1 - Условный график восстановления АТМ после полной силовой разгрузки

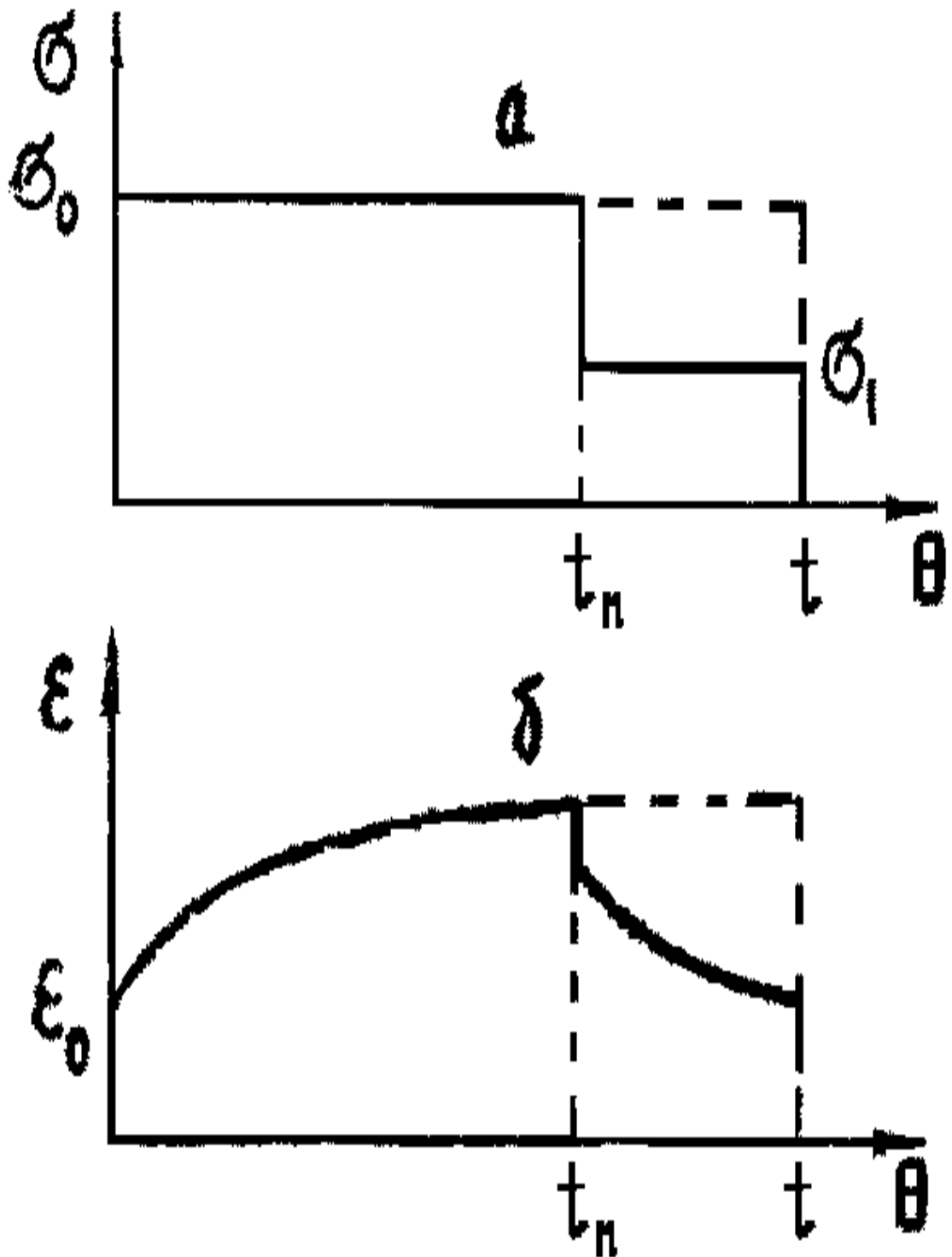


Рисунок 3.2 - Условный график восстановления АТМ после частичной силовой разгрузки



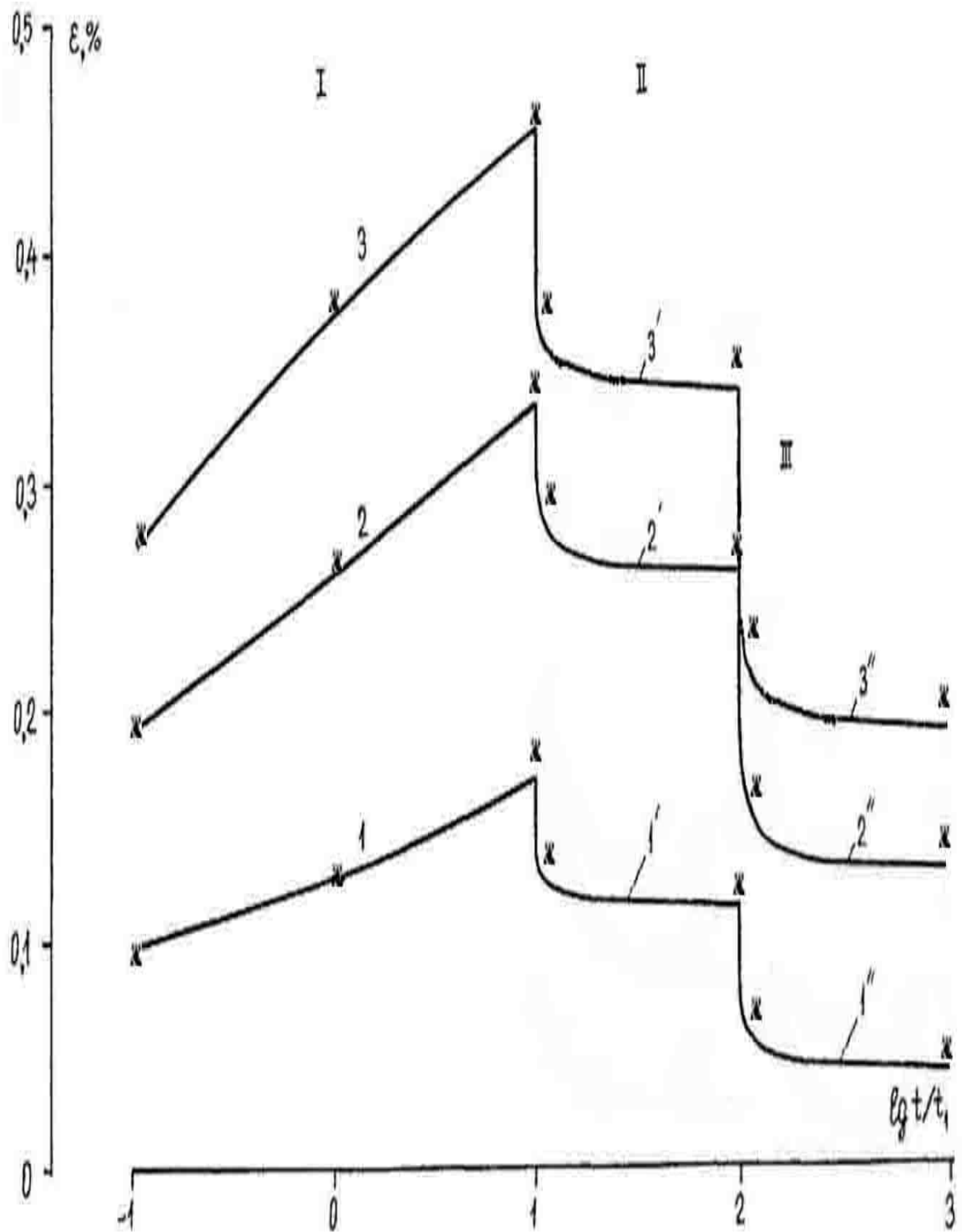


Рисунок 3.3 - Пример восстановительного процесса АТМ нить СВМ с полной и с частичной силовой разгрузкой

Восстановление АТМ после частичной силовой разгрузки может быть описано формулой:

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_0, t \in [0; t_n] \\ \sigma_1, t \in [t_n; t] \end{cases} \quad (\text{ГПа}). \quad (3.68)$$

Пример восстановительного процесса АТМ нить СВМ с полной и с частичной силовой разгрузкой приведен на рис. 3.3.

На рис.3.3 приняты следующие обозначения:

I - предварительное деформирование;

II - восстановление с половинной силовой разгрузкой;

III - восстановление с полной силовой разгрузкой.

Значения приложенного напряжения:

1 - 100 МПа;

2 - 200 МПа;

3 - 300 МПа;

1' - 50 МПа;

2' - 100 МПа;

3' - 150 МПа;

1'' - 0 МПа;

2'' - 0 МПа;

3'' - 0 МПа.

Значение базового времени:  $t_1 = 1 \text{ мин.}$

\* - обозначение расчетных точек.

### 3.4. Усадка АТМ

АТМ характеризуются еще одним важным свойством, заключающимся в их усадке с ростом температуры.

Если, например, металлы и другие материалы расширяются при нагревании, то с АТМ происходят при нагревании противоположные процессы усадки.

Дело в том, что при нормальной комнатной температуре макромолекулы АТМ представляют собой транс-конформацию или распрямленные отрезки.

При повышении температуры эти распрямленные отрезки макромолекул АТМ начинают скручиваться в клубки, представляющие собой цис-конформацию.

В то же время, усадка АТМ представляет собой обратимое явление, то есть при остывании их макромолекулы снова переходят в транс-конформацию.

На рис. 3.4 - рис. 3.7 приведены графические примеры усадки АТМ, полученные на разрывной машине "Instron - 1122":

- АТМ терлон (Россия) - рис. 3.4;
- АТМ армос (Россия) - рис. 3.5;
- АТМ русар (Россия) - рис. 3.6;
- АТМ СВМ (Россия) - рис. 3.7;

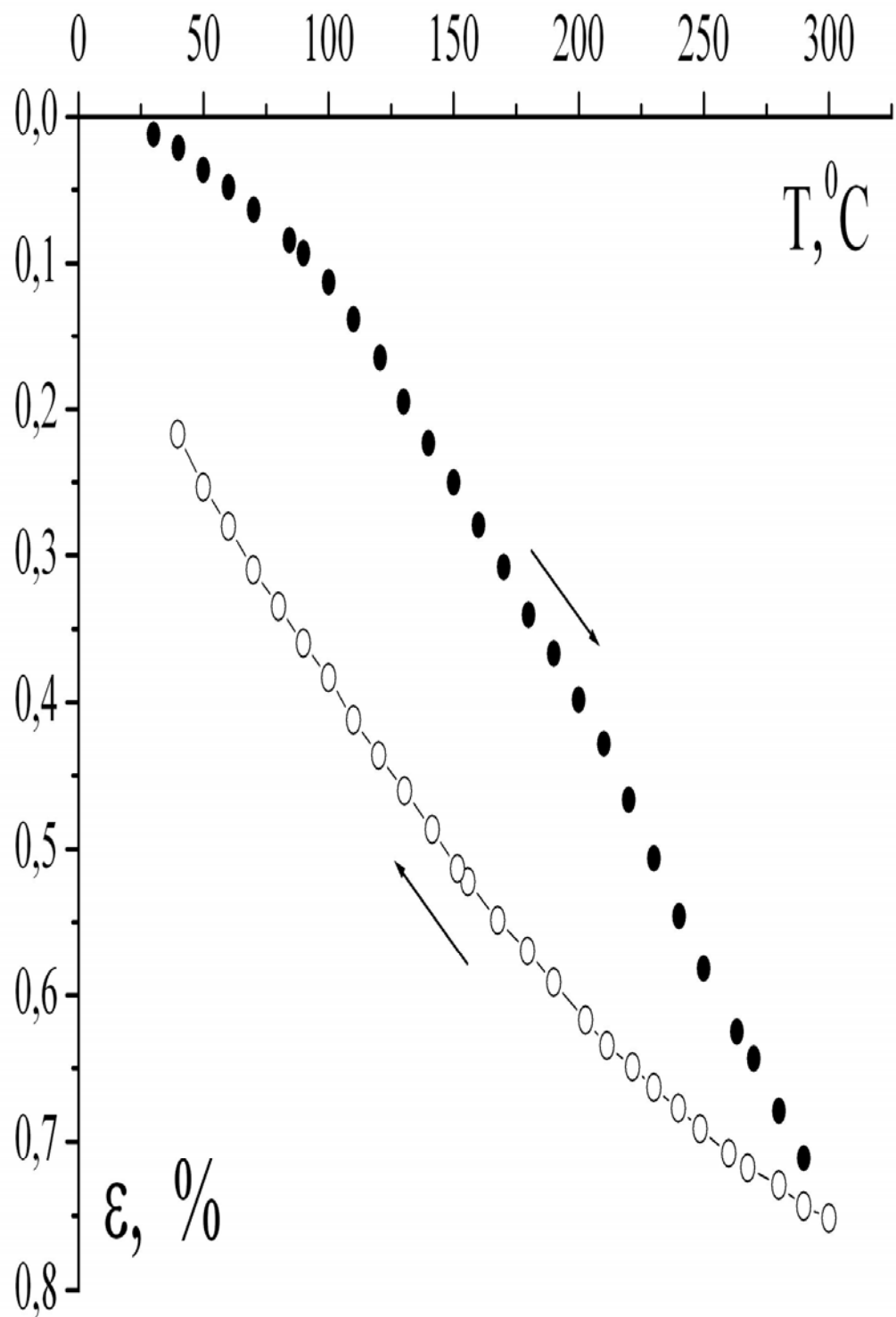


Рисунок 3.4 - График усадки и восстановления АТМ терлон (Россия)

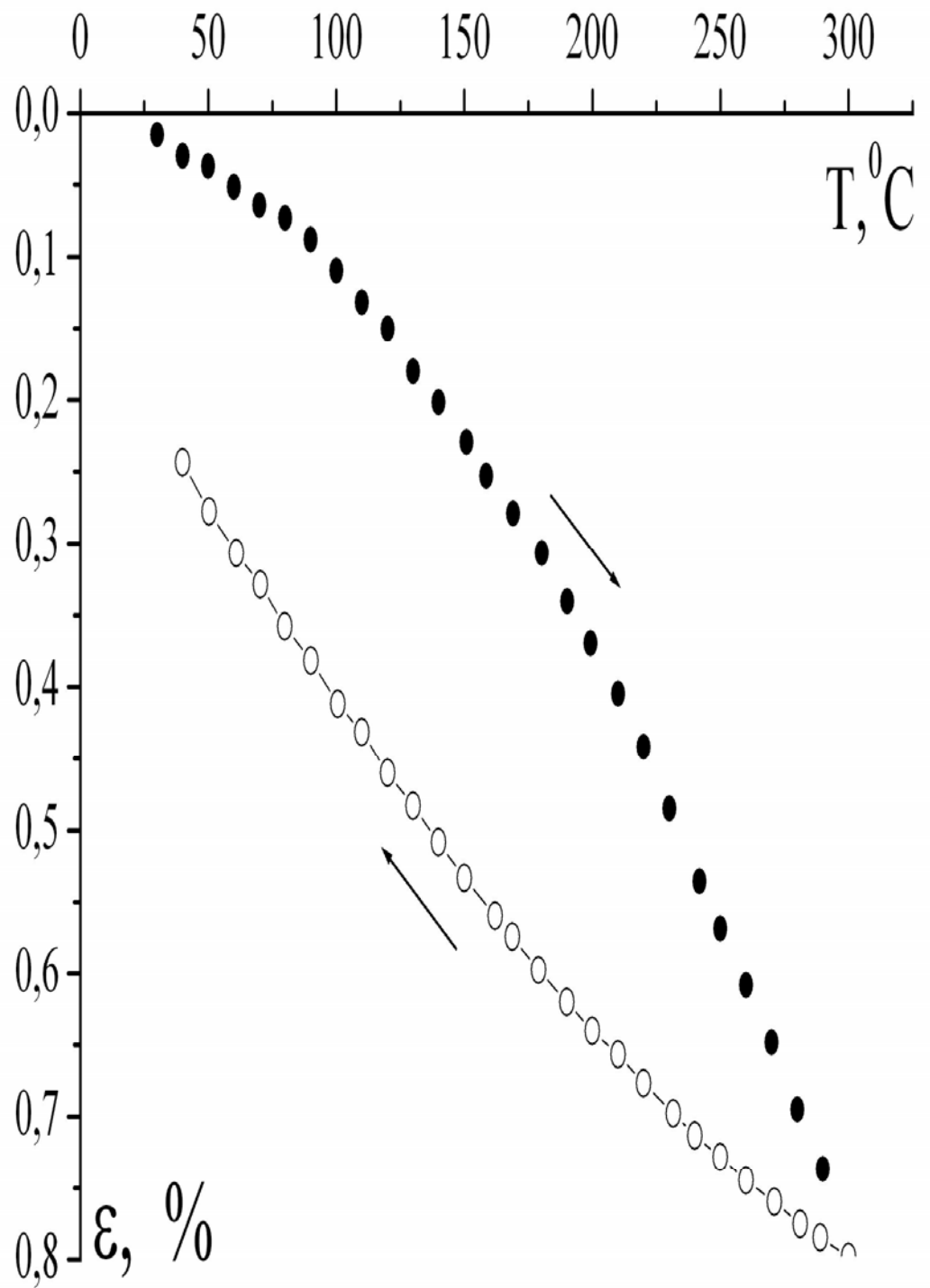


Рисунок 3.5 - График усадки и восстановления АТМ атмос (Россия)

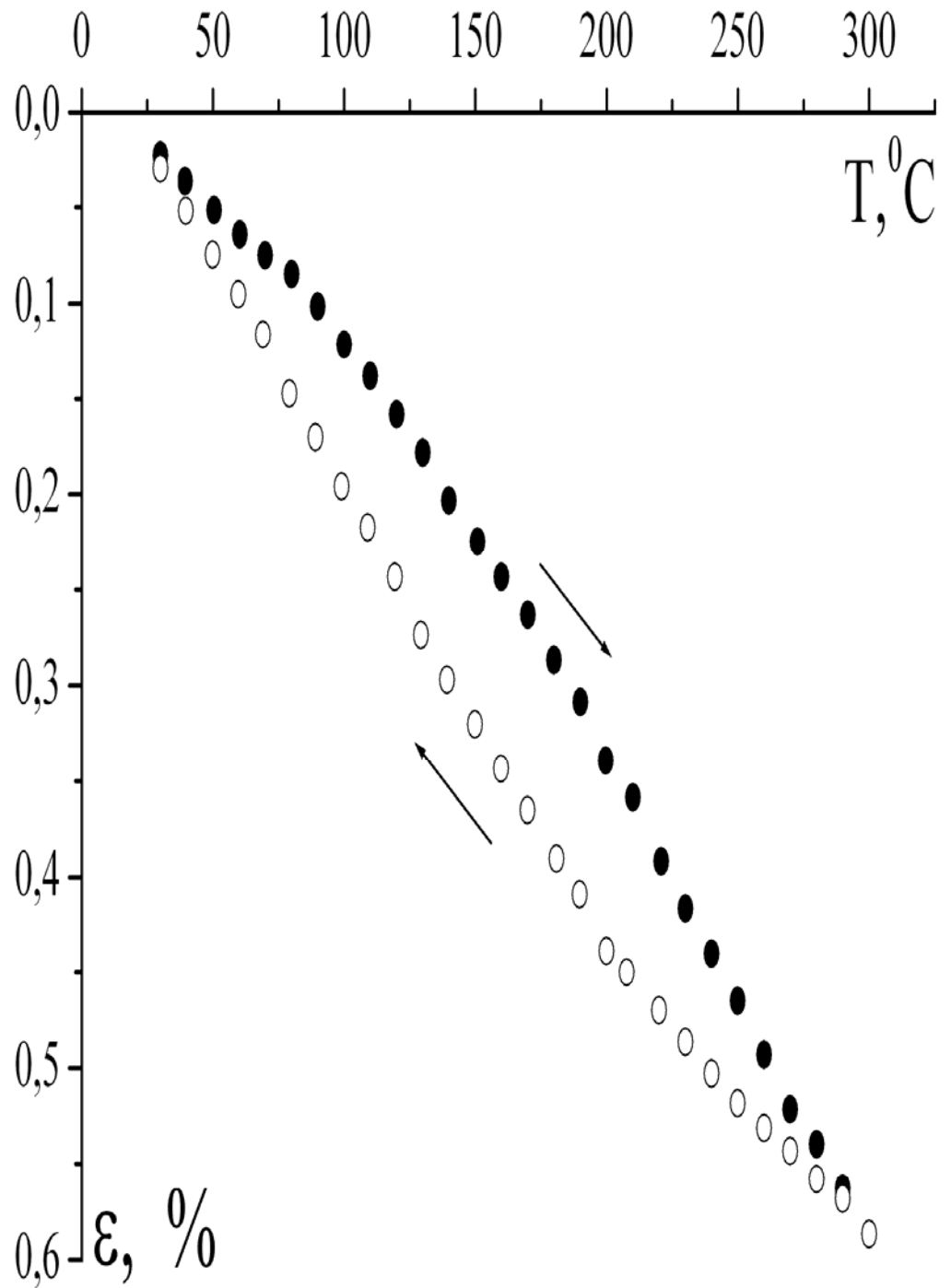


Рисунок 3.6 - График усадки и восстановления АТМ русар (Россия)

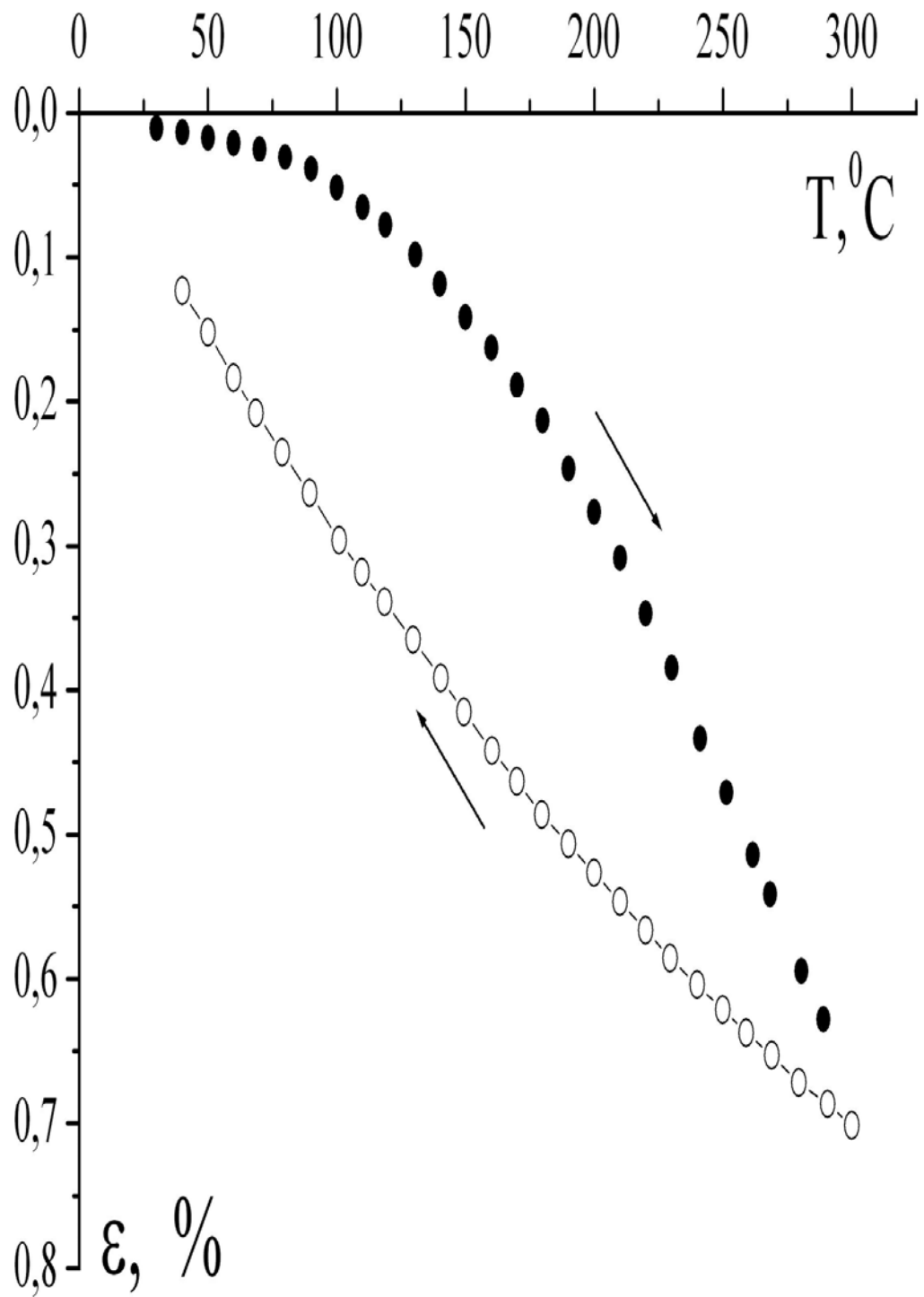


Рисунок 3.7 - График усадки и восстановления АТМ СВМ (Россия)

Исходя из графиков усадки АТМ (рис. 3.4 - рис. 3.7) видно, что полная обратимость после усадки свойственна только СВМ русар.

Другие исследованные АТМ (терлон, армос, СВМ) не обладают полной обратимостью после усадки.

### **3.5. Выводы по главе 3**

Таким образом, в главе приведены разработанные методы:

- прогнозирования релаксации АТМ;
- прогнозирования ползучести АТМ;
- прогнозирования восстановления АТМ;
- исследования на усадку АТМ.

Прогнозирование указанных процессов осуществляется на основе определяющих интегральных уравнений вязкоупругости АТМ типа Больцмана-Вольтерра с интегральными ядрами, соответствующими математическим моделям релаксации и ползучести АТМ, разработанными во второй главе.



#### **4. ЦИФРОВИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ-ХАРАКТЕРИСТИК ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ АТМ**

В главе приводятся компьютерные алгоритмы по расчету параметров-характеристик:

- релаксационных процессов АТМ;
- восстановительных процессов АТМ;
- деформационных процессов АТМ;
- вязкоупругих процессов АТМ.

На основе указанных компьютерных алгоритмов были разработаны соответствующие программы для ЭВМ.

##### **4.1. Цифровизация расчета параметров-характеристик релаксации АТМ**

Цифровизация расчета параметров-характеристик релаксации АТМ начинается с разработки соответствующего компьютерного алгоритма.

Разработанный алгоритм расчета параметров-характеристик релаксации АТМ позволяет рассчитать такие параметры, как:

- $E_0$  - модуль упругости АТМ;
- $E_\infty$  - модуль вязкоупругости АТМ;
- $b_{n\varepsilon}$  - значение интенсивности релаксации АТМ;
- $\tau_\varepsilon$  - значение релаксационного времени АТМ.

Указанный алгоритм состоит из двух частей и приведен на рис. 4.1, рис. 4.2.

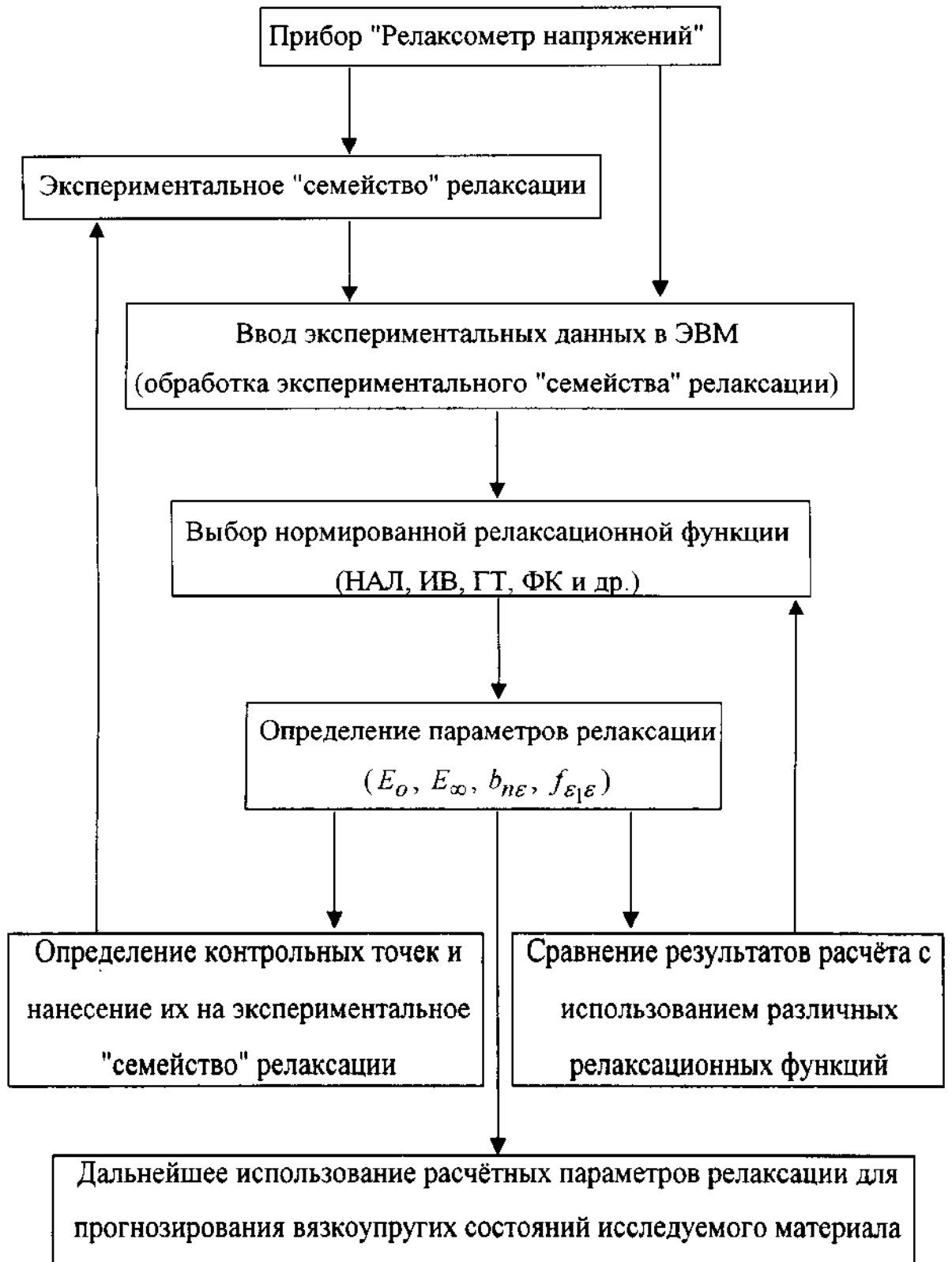


Рисунок 4.1 - Глобальный алгоритм расчета параметров-характеристик релаксации АТМ

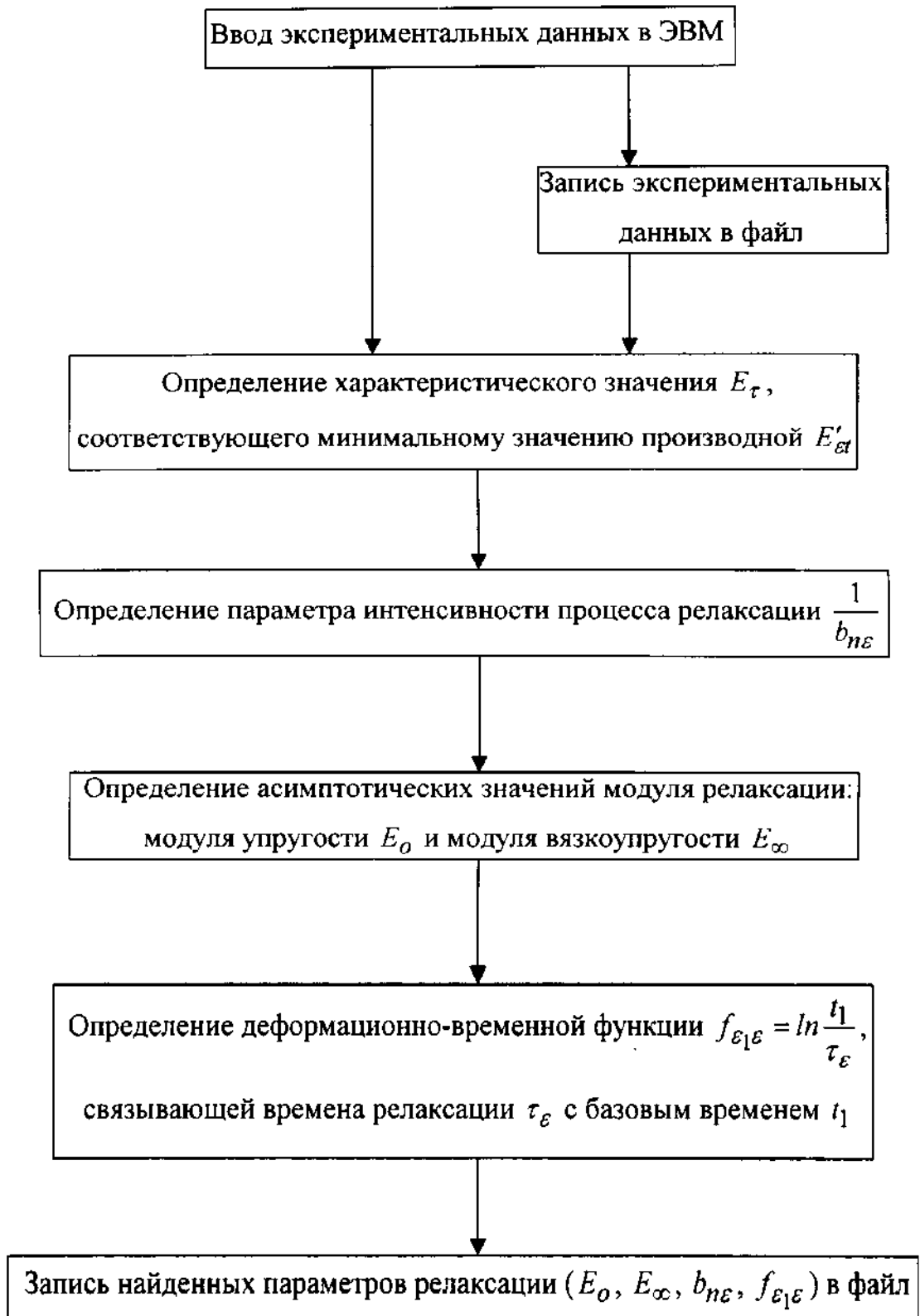


Рисунок 4.2 - Локальный алгоритм расчета параметров-характеристик релаксации АТМ



Рисунок 4.3 - Свидетельство на государственную регистрацию программы для ЭВМ по расчету параметров-характеристик математических моделей релаксационных процессов АТМ

Глобальный компьютерный алгоритм расчета параметров-характеристик релаксации АТМ, представленный на рис. 4.1, включает в себя, как составную часть, локальный компьютерный алгоритм расчета параметров-характеристик релаксации АТМ, представленный на рис. 4.2.

На основе представленных на рис. 4.1, рис. 4.2 алгоритмов была разработана программа для ЭВМ "Расчет параметров-характеристик математических моделей релаксационных процессов полимерных текстильных материалов", получившая государственную регистрацию 28.06.2023 за № 2023663835 (рис. 4.3).

#### **4.2. Цифровизация расчета параметров-характеристик ползучести АТМ**

Цифровизация расчета параметров-характеристик ползучести АТМ начинается с разработки соответствующего компьютерного алгоритма.

Разработанный алгоритм расчета параметров-характеристик ползучести АТМ позволяет рассчитать такие параметры, как:

- $D_0$  - начальную податливость АТМ;
- $D_\infty$  - конечную податливость АТМ;
- $b_{n\sigma}$  - значение интенсивности ползучести АТМ;
- $\tau_\sigma$  - значение деформационного времени АТМ.

Указанный алгоритм состоит из двух частей и приведен на рис. 4.4, рис. 4.5.

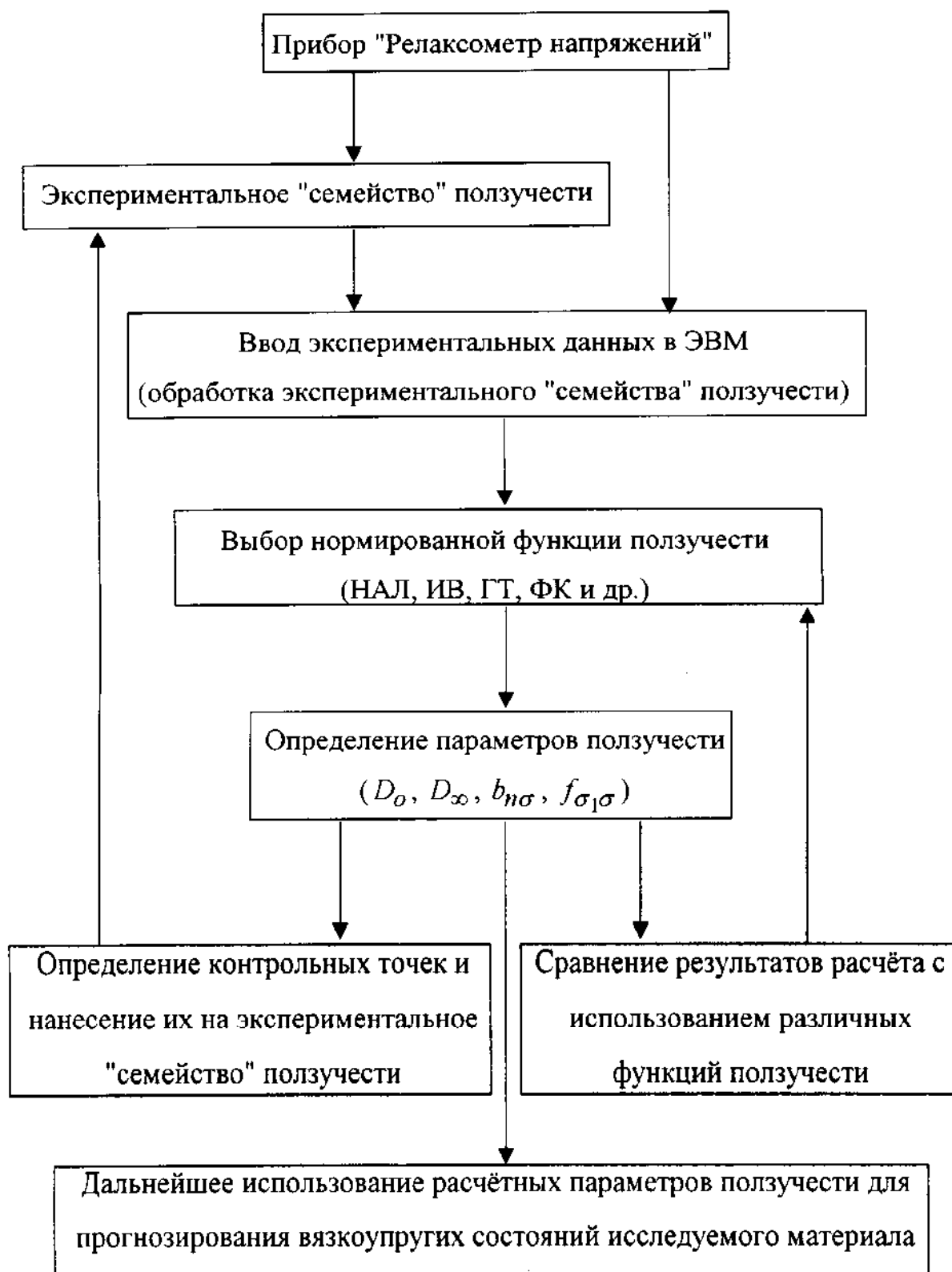


Рисунок 4.4 - Глобальный алгоритм расчета параметров-характеристик ползучести АТМ



Рисунок 4.5 - Локальный алгоритм расчета параметров-характеристик релаксации АТМ



Рисунок 4.6 - Свидетельство на государственную регистрацию программы для ЭВМ по расчету параметров-характеристик математических моделей деформационных процессов АТМ



Глобальный компьютерный алгоритм расчета параметров-характеристик ползучести АТМ, представленный на рис. 4.4, включает в себя, как составную часть, локальный компьютерный алгоритм расчета параметров-характеристик ползучести АТМ, представленный на рис. 4.5.

На основе представленных на рис. 4.4, рис. 4.5 алгоритмов была разработана программа для ЭВМ "Расчет параметров-характеристик математических моделей деформационных процессов полимерных текстильных материалов", получившая государственную регистрацию 28.06.2023 за № 2023663837 (рис. 4.6).

### **4.3. Цифровизация расчета параметров-характеристик восстановления АТМ**

Цифровизация расчета параметров-характеристик восстановления АТМ начинается с разработки соответствующего компьютерного алгоритма.

Так как процесс восстановления АТМ является разновидностью деформационного процесса, то основными параметрами этого процесса будут являться:

- $D_0$  - начальная податливость АТМ;
- $D_\infty$  - конечная податливость АТМ;
- $b_{n\sigma}$  - значение интенсивности восстановления АТМ;
- $\tau_\sigma$  - значение восстановительного времени АТМ.

Указанный алгоритм состоит из трех частей и приведен на рис. 4.7, рис. 4.8., рис. 4.9.

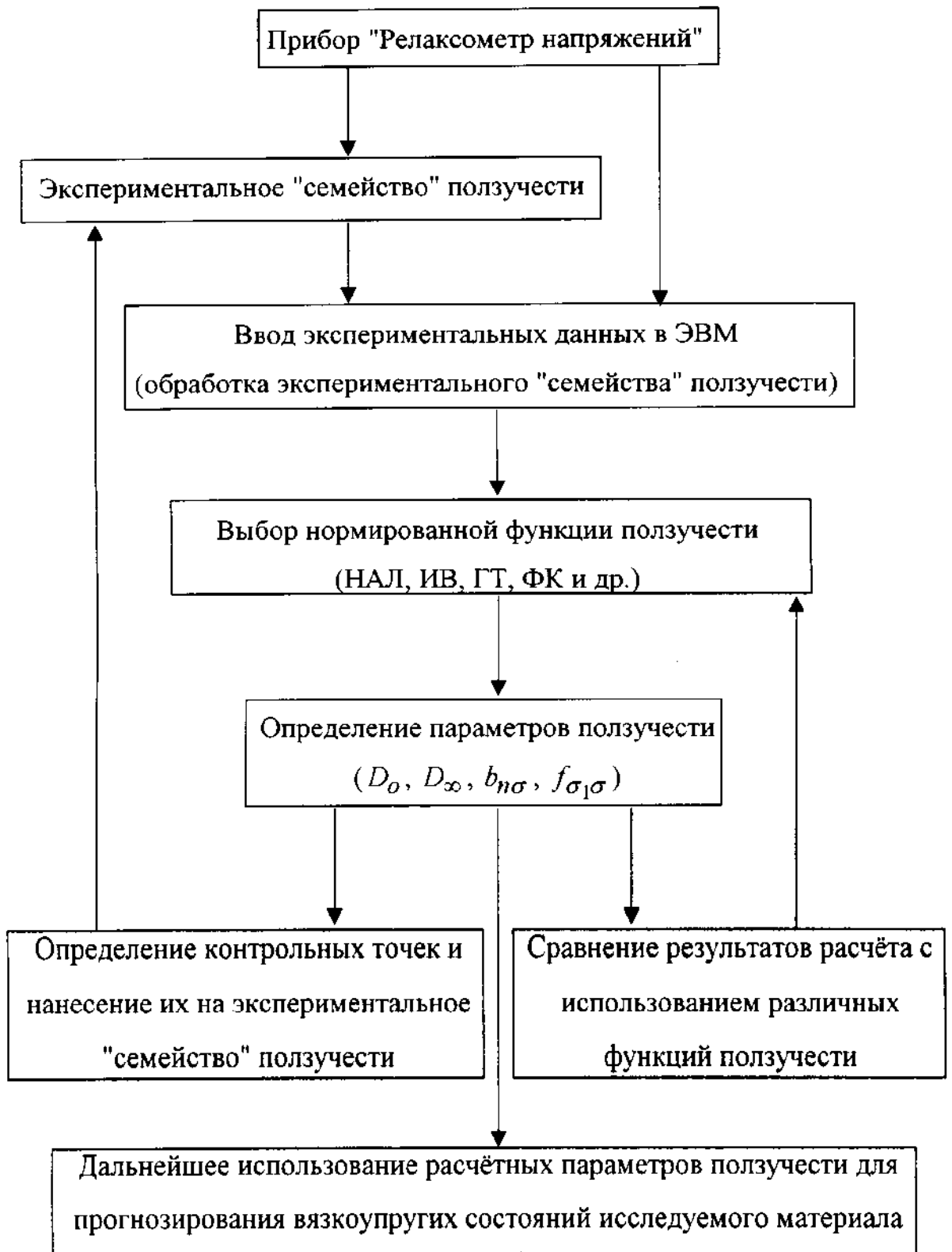


Рисунок 4.7 - Глобальный алгоритм расчета параметров-характеристик восстановления АТМ

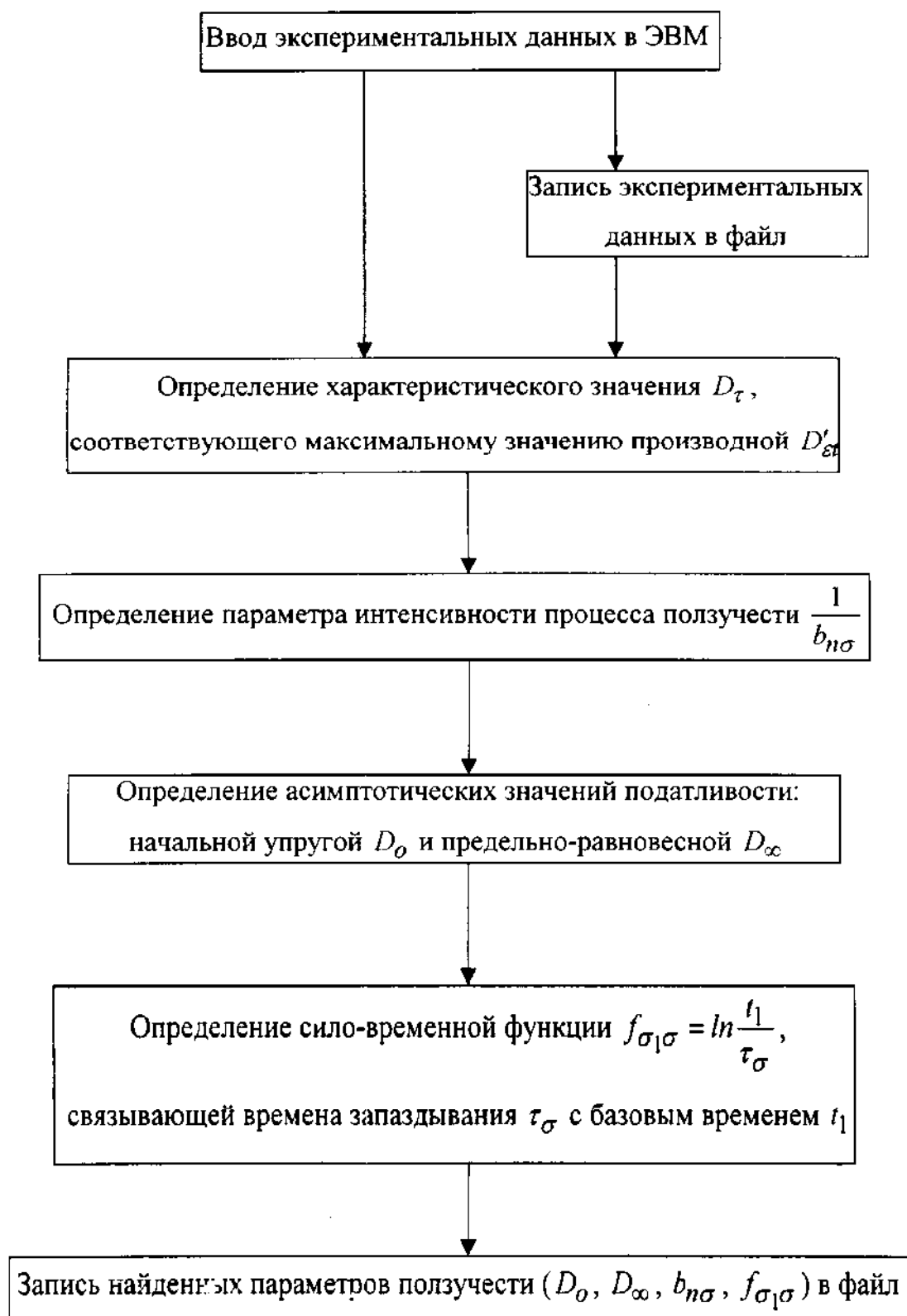


Рисунок 4.8 - Локальный алгоритм расчета параметров-характеристик восстановления АТМ

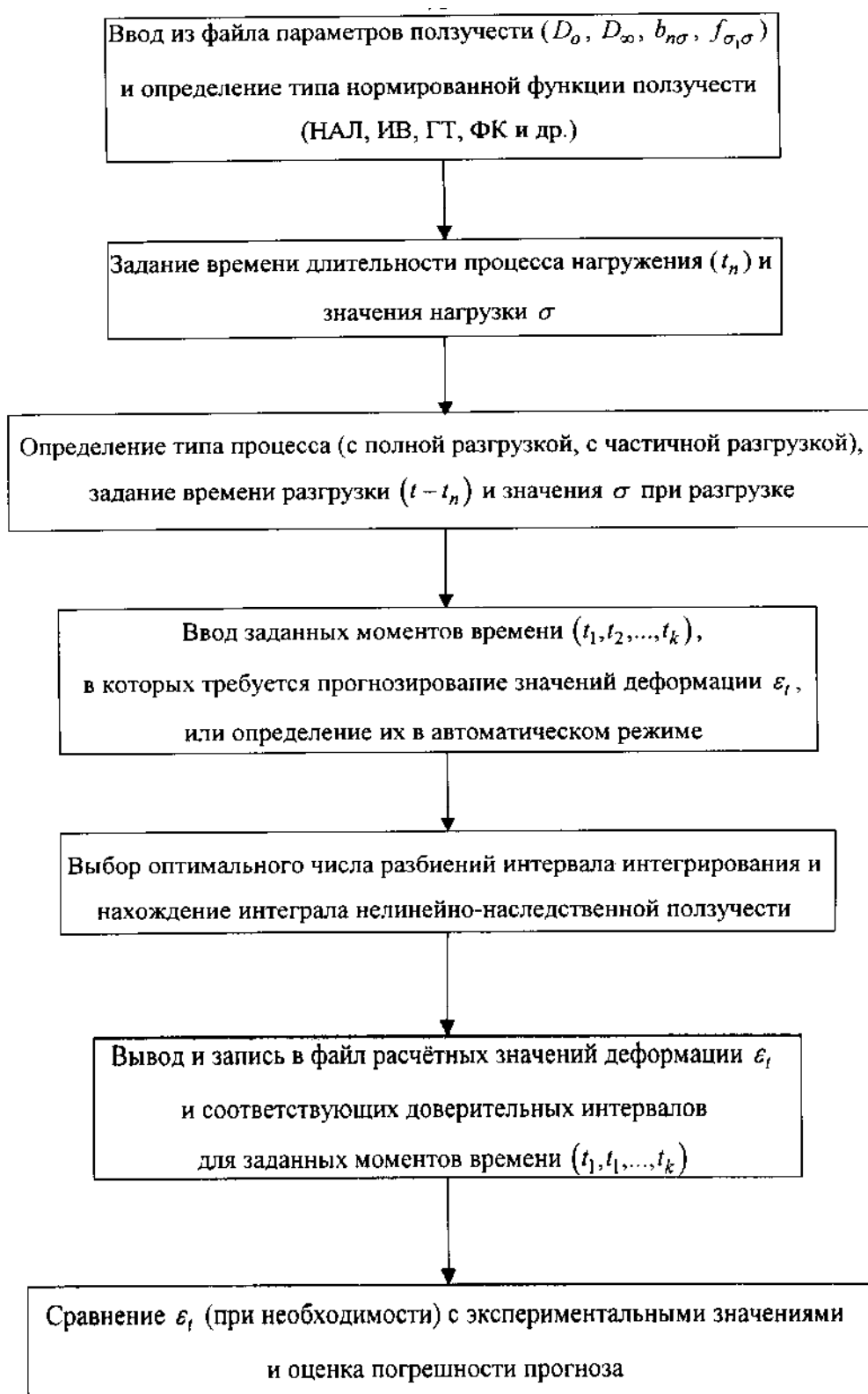


Рисунок 4.9 - Итоговый алгоритм расчета параметров-характеристик восстановления АТМ



Рисунок 4.10 - Свидетельство на государственную регистрацию программы для ЭВМ по расчету параметров-характеристик математических моделей восстановительных процессов АТМ

Глобальный компьютерный алгоритм расчета параметров-характеристик восстановления АТМ, представленный на рис. 4.7, включает в себя, как составную часть, локальный компьютерный алгоритм расчета параметров-характеристик восстановления АТМ, представленный на рис. 4.8.

Далее, оба представленных алгоритма алгоритм расчета параметров-характеристик восстановления АТМ - глобальный и локальный - включаются, как составные части в итоговый алгоритм расчета параметров-характеристик восстановления АТМ, приведенный на рис. 4.9.

На основе представленных на рис. 4.7, рис. 4.8, рис. 4.9 алгоритмов была разработана программа для ЭВМ "Расчет параметров-характеристик математических моделей восстановительных процессов полимерных текстильных материалов", получившая государственную регистрацию 27.06.2023 за № 2023663688 (рис. 4.10).

#### **4.4. Цифровизация расчета параметров-характеристик вязкоупругости АТМ**

Цифровизация расчета параметров-характеристик вязкоупругости АТМ начинается с разработки соответствующего компьютерного алгоритма.

В случае процесса вязкоупругости АТМ предполагается одновременное прохождение, но с разной интенсивностью, релаксации, ползучести и восстановления АТМ.

В случае сказанного, основными параметрами этого процесса будут являться все перечисленные в пунктах 4.1 - 4.3 параметры:

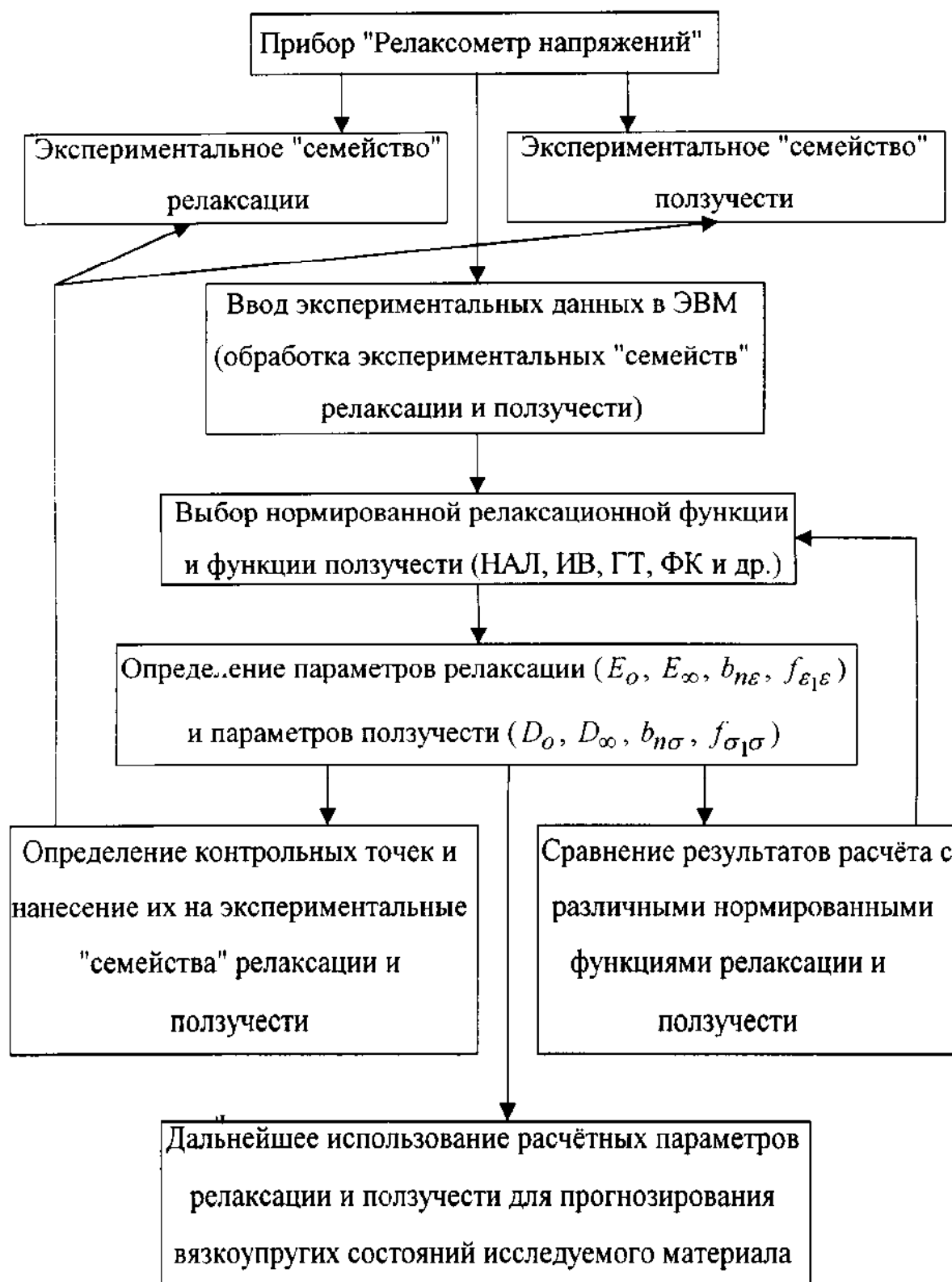


Рисунок 4.11 - Глобальный алгоритм расчета параметров-характеристик вязкоупругости АТМ

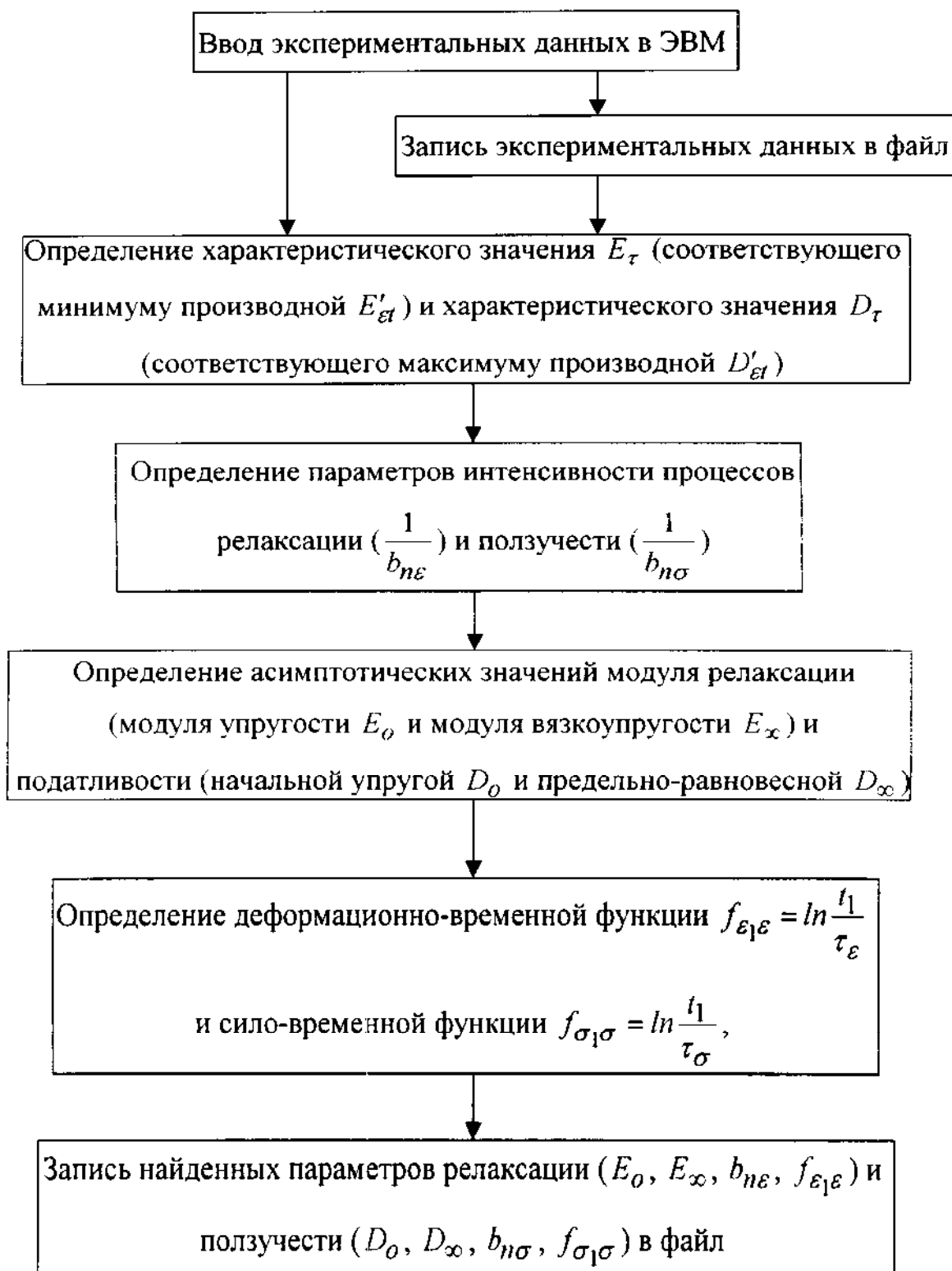


Рисунок 4.12 - Локальный алгоритм расчета параметров-характеристик релаксации АТМ





Рисунок 4.13 - Свидетельство на государственную регистрацию программы для ЭВМ по расчету параметров-характеристик математических моделей вязкоупругих процессов АТМ

- $E_0$  - модуль упругости АТМ;
- $E_\infty$  - модуль вязкоупругости АТМ;
- $b_{n\varepsilon}$  - значение интенсивности релаксации АТМ;
- $\tau_\varepsilon$  - значение релаксационного времени АТМ;
- $D_0$  - начальная податливость АТМ;
- $D_\infty$  - конечная податливость АТМ;
- $b_{n\sigma}$  - значение интенсивности восстановления АТМ;
- $\tau_\sigma$  - значение восстановительного времени АТМ;
- $b_{n\sigma}$  - значение интенсивности восстановления АТМ;
- $\tau_\sigma$  - значение восстановительного времени АТМ.

Указанный алгоритм состоит из двух частей и приведен на рис. 4.11, рис. 4.12.

Глобальный компьютерный алгоритм расчета параметров-характеристик вязкоупругости АТМ, представленный на рис. 4.11, включает в себя, как составную часть, локальный компьютерный алгоритм расчета параметров-характеристик вязкоупругости АТМ, представленный на рис. 4.12.

На основе представленных на рис. 4.11, рис. 4.12 алгоритмов была разработана программа для ЭВМ "Расчет параметров-характеристик математических моделей вязкоупругих процессов полимерных текстильных материалов", получившая государственную регистрацию 28.06.2023 за № 2023663839 (рис. 4.13).

#### **4.5. Выводы по главе 4**

Таким образом, были разработаны компьютерные алгоритмы по расчету параметров-характеристик:

- релаксационных процессов АТМ;
- восстановительных процессов АТМ;
- деформационных процессов АТМ;
- вязкоупругих процессов АТМ.

На основе указанных компьютерных алгоритмов созданы соответствующие программы для ЭВМ.

## **5. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ, ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ЦИФРОВОЙ ОЦЕНКИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ АТМ**

В главе приводится практическое применение методов моделирования, прогнозирования и цифровой оценки деформационных процессов АТМ, разработанных в диссертации.

Приведены также практические рекомендации по проектированию АТМ и изделий из них, обладающими необходимыми эксплуатационными свойствами.

### **5.1. Применение методов цифровой оценки релаксации АТМ**

Методы цифровой оценки релаксации АТМ имеют важное практическое значение при проектировании указанных материалов и изделий из них, так как позволяют ответить на ряд вопросов в части эксплуатационных свойств указанных материалов.

Расчетные параметры-характеристики интенсивности релаксации ( $b_{n\varepsilon}$ ) АТМ приведены в табл. 5.1.

Зная значения параметров-характеристик интенсивностей процессов релаксации для различных АТМ (табл. 5.1), получаем информацию о том, насколько быстро проходят у них указанные процессы.

Самый медленный процесс релаксации наблюдается у АТМ, с наибольшим значением параметра-характеристики интенсивности релаксации  $b_{n\varepsilon}$ , т.е. у тварона.

В этом случае:

$$b_{n\varepsilon} = 12,8.$$

Таблица 5.1 - Расчетные параметры-характеристики интенсивности релаксации ( $b_{n\varepsilon}$ ) АТМ

Марка	Интенсивность релаксации ( $b_{n\varepsilon}$ )
Терлон	8,14
Армос	10,2
Русар	11,4
СВМ	9,32
Технора	7,56
Тварон	12,8
Кевлар	9,74

В таб. 5.2 приведены асимптотические параметры-характеристики релаксации АТМ.

Таблица 5.2 - Расчетные асимптотические параметры-характеристики релаксации ( $E_0$  и  $E_\infty$ ) АТМ

Марка	$E_0$ , ГПа	$E_\infty$ , ГПа
Терлон	98	47
Армос	94	43
Русар	115	54
СВМ	105	48
Технора	81	38
Тварон	122	61
Кевлар	109	46

Самый быстрый процесс релаксации наблюдается у АТМ, имеющего наименьшее значение параметра-характеристики интенсивности релаксации  $b_{н\epsilon}$ .

В нашем случае, это АТМ технора.

У нее значение параметра-характеристики интенсивности релаксации:

$$b_{н\epsilon} = 7,56.$$

Зная асимптотические параметры-характеристики релаксации АТМ (табл. 5.2) можно определить соответствующие коэффициенты степени релаксации:

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

У АТМ, имеющего наибольшее значение коэффициента степени релаксации наблюдается наивысшая степень прохождения этого процесса.

В табл. 5.3 приведены расчетные коэффициенты степени релаксации АТМ.

Таблица 5.3 - Расчетные коэффициенты степени релаксации АТМ

Марка	Коэффициент степени релаксации $k_{рел.}, \%$
Герлон	52
Армос	54
Русар	53
СВМ	54
Технора	53
Тварон	50
Кевлар	58

Из табл. 5.3 видно, что наиболее полно (на 58%) процесс релаксации проходит у кевлара, а наименее полно (на 50%) - у тварона

Следует также заметить, что практическое применение методов оценки релаксационных свойств АТМ упрощается именно благодаря цифровизации.

## 5.2. Применение методов цифровой оценки ползучести АТМ

Методы цифровой оценки ползучести АТМ имеют важное практическое значение при проектировании указанных материалов и изделий из них, так как позволяют ответить на ряд вопросов в части эксплуатационных свойств указанных материалов.

Расчетные параметры-характеристики интенсивности ползучести ( $b_{n\sigma}$ ) АТМ приведены в табл. 5.4.

Зная значения параметров-характеристик интенсивностей процессов ползучести для различных АТМ (табл. 5.4), получаем информацию о том, насколько быстро проходят у них указанные процессы.

Самый медленный процесс ползучести наблюдается у АТМ, с наибольшим значением параметра-характеристики интенсивности ползучести  $b_{n\sigma}$ , т.е. у тварона.

В этом случае:

$$b_{n\sigma} = 8,93.$$

Самый быстрый процесс ползучести наблюдается у АТМ, имеющего наименьшее значение параметра-характеристики интенсивности ползучести  $b_{n\sigma}$ .

В нашем случае, это АТМ технора.

Таблица 5.4 - Расчетные параметры-характеристики интенсивности ползучести ( $b_{n\sigma}$ ) АТМ

Марка	Интенсивность ползучести ( $b_{n\sigma}$ )
Терлон	5,91
Армос	7,39
Русар	7,92
СВМ	6,74
Технора	5,87
Тварон	8,93
Кевлар	6,72

Таблица 5.5 - Расчетные асимптотические параметры-характеристики ползучести ( $D_0$  и  $D_\infty$ ) АТМ

Марка	$D_0$ , ГПа <sup>-1</sup>	$D_\infty$ , ГПа <sup>-1</sup>
Терлон	0,010	0,021
Армос	0,011	0,023
Русар	0,0087	0,019
СВМ	0,0095	0,021
Технора	0,012	0,026
Тварон	0,0082	0,016
Кевлар	0,0092	0,022

У нее значение параметра-характеристики интенсивности ползучести:

$$b_{n\sigma} = 5,87.$$



Зная асимптотические параметры-характеристики ползучести АТМ (табл. 5.5) можно определить соответствующие коэффициенты степени ползучести:

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

У АТМ, имеющего наибольшее значение коэффициента степени ползучести наблюдается наивысшая степень прохождения этого процесса.

В табл. 5.6 приведены расчетные коэффициенты степени ползучести АТМ.

Таблица 5.6 - Расчетные коэффициенты степени степени ползучести АТМ

Марка	Коэффициент степени ползучести $k_{полз.}, \%$
Терлон	52
Армос	52
Русар	54
СВМ	55
Технора	54
Тварон	50
Кевлар	58

Из табл. 5.6 видно, что наиболее полно (на 58%) процесс ползучести проходит у кевлара, а наименее полно (на 50%) - у тварона

Следует также заметить, что практическое применение методов оценки деформационных свойств АТМ упрощается именно благодаря цифровизации.

### 5.3. Применение методов цифровой оценки вязкоупругости АТМ

Методы цифровой оценки вязкоупругости АТМ имеют важное практическое значение при проектировании указанных материалов и изделий из них, так как позволяют ответить на ряд вопросов в части эксплуатационных свойств указанных материалов.

При этом предполагается, что здесь имеют место одновременно все три вида вязкоупругих процессов АТМ: релаксации, ползучести и восстановления.

Расчетные параметры-характеристики интенсивности вязкоупругости ( $b_{n\varepsilon}$  и  $b_{n\sigma}$ ) АТМ приведены в табл. 5.7.

Таблица 5.7 - Расчетные параметры-характеристики интенсивности вязкоупругости ( $b_{n\varepsilon}$  и  $b_{n\sigma}$ ) АТМ

Марка	Интенсивность релаксации ( $b_{n\varepsilon}$ )	Интенсивность ползучести ( $b_{n\sigma}$ )
Терлон	8,14	5,91
Армос	10,2	7,39
Русар	11,4	7,92
СВМ	9,32	6,74
Технора	7,56	5,87
Тварон	12,8	8,93
Кевлар	9,74	6,72

Зная значения параметров-характеристик интенсивностей вязкоупругости для различных АТМ (табл. 5.7), получаем информацию о

том, насколько быстро проходят у них вязкоупругие процессы.

Самые медленные вязкоупругие процессы наблюдаются у АТМ, с наибольшим значением параметров-характеристик интенсивностей вязкоупругости, т.е. у тварона:

$$\begin{cases} b_{n\varepsilon} = 12,8 \\ b_{n\sigma} = 8,93 \end{cases}$$

Самые быстрые вязкоупругие процессы наблюдаются у АТМ, с наименьшим значением параметров-характеристик интенсивностей вязкоупругости, т.е. у техноры:

$$\begin{cases} b_{n\varepsilon} = 7,56 \\ b_{n\sigma} = 5,87 \end{cases}$$

Таблица 5.8 - Расчетные асимптотические параметры-характеристики вязкоупругости ( $E_0, E_\infty, D_0$  и  $D_\infty$ ) АТМ

Марка	$E_0$ , ГПа	$E_\infty$ , ГПа	$D_0$ , ГПа <sup>-1</sup>	$D_\infty$ , ГПа <sup>-1</sup>
Терлон	98	47	0,010	0,021
Армос	94	43	0,011	0,023
Русар	115	54	0,0087	0,019
СВМ	105	48	0,0095	0,021
Технора	81	38	0,012	0,026
Тварон	122	61	0,0082	0,016
Кевлар	109	46	0,0092	0,022

Зная асимптотические параметры-характеристики вязкоупругости АТМ (табл. 5.8) можно определить коэффициенты степени вязкоупругости:

$$\begin{cases} k_{рел.} = \frac{E_0 - E_\infty}{E_0} \cdot 100\% \\ k_{полз.} = \frac{D_\infty - D_0}{D_\infty} \cdot 100\% \end{cases} \quad (5.3)$$

У АТМ, имеющего наибольшие значения коэффициентов степени вязкоупругости наблюдается наивысшая степень прохождения этих процессов.

В табл. 5.9 приведены расчетные коэффициенты степени вязкоупругости АТМ.

Таблица 5.9 - Расчетные коэффициенты степени степени вязкоупругости ( $k_{рел.}$  и  $k_{полз.}$ ) АТМ

Марка	Коэффициент степени релаксации $k_{рел.}, \%$	Коэффициент степени ползучести $k_{полз.}, \%$
Терлон	52	52
Армос	54	52
Русар	53	54
СВМ	54	55
Технора	53	54
Тварон	50	50
Кевлар	58	58

Из табл. 5.9 видно, что наиболее полно (на 58%) процессы вязкоупругости проходят у кевлара, а наименее полно (на 50%) - у тварона

Следует также заметить, что практическое применение методов оценки вязкоупругости АТМ упрощается именно благодаря цифровизации.

#### **5.4. Выводы по главе 5**

Приведенные в главе практические аспекты методов моделирования, прогнозирования и цифровой оценки деформационных процессов АТМ, находят свое применение, как в научных исследованиях функциональных и эксплуатационных свойств АТМ, так и при проектировании новых АТМ и изделий из них с заданными характеристиками.

Практические рекомендации по проектированию АТМ и изделий из них, обладающими необходимыми эксплуатационными свойствами, полученные в пятой главе позволяют провести технологический отбор АТМ, обладающих требуемыми эксплуатационными свойствами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработанные математические модели основополагающих деформационных процессов АТМ - релаксации и ползучести с большой степенью точности моделируют соответствующие режимы эксплуатации этих материалов.

2. Разработанные цифровые методы прогнозирования основополагающих деформационных процессов АТМ позволяют осуществлять указанное прогнозирование в соответствии с временной спецификой этих процессов.

3. Разработанные методы качественной оценки эксплуатационных параметров-характеристик АТМ позволяют проводить указанную оценку по параметрам соответствующих математических моделей релаксации и ползучести этих материалов.

4. Разработанное программное обеспечение, объединенное общим интерфейсом в единый комплекс программ, позволяет осуществлять качественную оценку эксплуатационных свойств АТМ.

5. Проведение качественной оценки эксплуатационных свойств АТМ позволяет прояснить реологический характер деформационных процессов этих материалов, состоящий в том, что основу деформирования составляют структурные изменения геометрического характера.

6. Разработанные в диссертации методы цифровой качественной оценки эксплуатационных свойств АТМ опробованы на большой группе указанных материалов с положительным эффектом, что позволяет считать их универсальными и рекомендовать для проведения аналогичных оценок других групп полимерных текстильных материалов.

**Библиографический список использованной литературы**

1. Бартенев Г.М., Зеленев Ю.В. Физика и механика полимеров. М.: Высшая школа. 1993. - 392 с.
2. Вундерлих Б. Физика макромолекул. М.: Мир. 1996. - 624 с.
3. Физика полимеров. Перевод с английского. М.: Мир. 1999. - 322 с.
4. Джейл Ф.К. Полимерные монокристаллы. Л.: Химия. 1988. - 552 с.
5. Бартенев Г.М., Френкель С.Я. Физика полимеров. Л.: Химия. 1990. - 430с.
6. Уорд И. Механические свойства твёрдых полимеров. М.:Химия, 1995. - 350с.
7. Рабинович А.Л. Введение в механику армированных полимеров. М.: Наука. 1990. - 482 с.
8. Бартенев Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров. М.: Химия. 1994. - 280 с.
9. Ван Кревелен Д.В. Свойства и химическое строение полимеров. М.: Химия. 1996. -416 с.
10. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твёрдых тел. М.: Наука. 1974. - 560 с.
11. Ростиашвили В.Г., Иржак В.И., Розенберг Б.А. Стеклование полимеров. Л.: Химия. 1987. - 188с.
12. Бирштейн Т.М., Птицин О.Б. Конформации макромолекул. М.: Наука. 1994. -392с.
13. Бартенев Г.М. Структура и релаксационные свойства эластомеров. М.: Химия. 1999. - 288с.
14. Перепелкин К. Е. Структурная обусловленность механических свойств высокоориентированных волокон. М.: НИИТЭХИМ. 1990. - 72 с.



15. Бартенев Г.М., Зеленев Ю. В. Курс физики полимеров. М.: Химия. 1996. - 288 с.
16. Перепелкин К.Е. Физическое материаловедение ориентированных полимерных волокон//Механические свойства и износостойкость текстильных материалов. Вильнюс. 1991. С. 7-14.
17. Рейнер М. Реология. Перевод с английского. М.: Наука. 1995. - 224 с.
18. Начинкин О.И. О форме поперечного сечения химических волокон//Химические волокна. 1993. № 2. С. 28-30.
19. Овчинников В.А., Жоров В.А., Баскаев З.П. Упругость кристаллической решетки полиэтилентерефталата//Механика полимеров. 1992. № 6. С. 982 - 986.
20. Носов М.П., Пахомова Л.Н. О радиальной неоднородности капроновых волокон//Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 1994. № 2. С. 73-78.
21. Волькенштейн М.В. Конформационная статистика полимерных цепей. М.-Л.: Изд-во АН СССР. 1989. - 468 с.
22. Вульфсон С.З. Температурные напряжения в бетонных массивах с учётом ползучести бетона//Известия АН СССР. Механика и машиностроение. 1990. №1. С. 162-165.
23. Ginzburg V.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.
24. Герасимова Л.С., Семенова Т.П. Макроструктура синтетических нитей, сформованных из расплава полимера. М.: НИИТЭХИМ. 1989. - 22 с.
25. 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.

26. Годовский Ю.К. Теплофизика полимеров. М.: Химия. 1982. - 280 с.
27. Готлиб Ю.Я., Даринский А.А., Светлов Ю.Е. Физическая кинетика макромолекул. Л.: Химия. 1986. - 272 с.
28. Гросберг А.Ю., Хохлов А.Р. Статистическая физика макромолекул. М.: Наука, 1989, 344 с.
29. Журков С. Н; Томашевский Э. К. Некоторые проблемы прочности твердого тела. М.: Изд-во АН СССР. 1989. С. 68-75.
30. Гольберг И.И. Механическое поведение полимерных материалов. М.: Химия. 1970. - 192 с.
31. Ержанов Ж.С. Теория ползучести горных пород и её приложения. Алма-Ата. 1984. - 175 с.
32. Гольдман А.Я. Прогнозирование деформационно-прочностных свойств полимерных и композиционных материалов. Л.: Химия. 1988. - 272с.
33. Кобеко П.П. Аморфные вещества. Л.: Изд. АН СССР. 1982. - 432 с.
34. Каргин В.А., Слонимский Г.Л. Краткие очерки по физико-химии полимеров. М.: Химия. 1987. - 232 с.
35. Мак-Келви Д.М. Переработка полимеров. М.: Химия. 1965. - 444 с.
36. Кацнельсон М.Ю., Балаев Г.А. Полимерные материалы. Л.: Химия. 1982. - 317 с.
37. Манин В.Н., Громов А.Н. Физико-химическая стойкость полимерных материалов в условиях эксплуатации. Л.: Химия. 1990. - 248 с.
38. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. Перевод с английского. М.: Наука. 1998. - 780 с.
39. Манделькern Л. Кристаллизация полимеров. М.-Л.: Химия, 1986. - 336 с.
40. Марихин В.А., Мясникова Л.П. Надмолекулярная структура полимеров. Л.: Химия. 1977. – 240 с.

41. Мешков С.И. Вязкоупругие свойства металлов. М. 1974. - 192с.
42. Москвитин В.В. Сопротивление вязкоупругих материалов применительно к зарядам ракетных двигателей на твёрдом топливе. М.: Наука. 1972. - 327 с.
43. Носов М.П. Динамическая усталость полимерных нитей. Киев: Гостехиздат УССР. 1983. - 196 с.
44. Мортон В.Е., Херл Д.В. Механические свойства текстильных волокон. М.: Легкая индустрия. 1991. - 184с.
45. Нильсон Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций. М.: Химия. 1998. - 312 с.
46. Рысюк Б.Д., Носов М.П. Механическая анизотропия полимеров. Киев: Наукова думка. 1988. - 232 с.
47. Носов М.П., Теплицкий С.С. Усталость нитей. Киев: Техника. 1990. - 176 с.
48. Саркисов В.Ш., Тиранов В.Г. Нелинейная вязкоупругость в механических моделях. Астрахань: АГТУ. 2001. - 240 с.
49. Перепечко И.И. Акустические методы исследования полимеров. М.: Химия. 1973. - 296 с.
50. Сакурада Н., Ито Т., Накамае К. Модули упругости кристаллических решеток полимеров//Химия и технология полимеров. 1984. № 10. С. 19-36.
51. Сверхвысокомодульные полимеры. Под ред. А.Чиффери и И.Уорда. Перевод с английского. Л.: Химия. 1983. - 272 с.
52. Тамупс В.П., Куксенко В.С. Микромеханика разрушения полимерных материалов. Рига: Зинатне. 1988. - 294 с.
53. Тагер А.А. Физико-химия полимеров. М.: Химия. 1998. - 544 с.
54. Трелоар Л. Физика упругости каучука. Перевод. с английского. Л.: ИЛД. - 240 с.

55. Тобольский А. Свойства и структура полимеров. Перевод с английского. М.: Химия. 1964. - 322с.
56. Флори П. Статистическая механика цепных молекул. М.: Мир. 1971. - 440 с.
57. Хопкинс И., Керкджиан К. Физическая акустика. Перевод с английского. М.: ИЛ. 1989. - 110 с.
58. Труевцев Н.Н., Легезина Г.И., Петрова Л.Н., Галахов А.В. Исследование деформационных свойств льносодержащей пряжи различных способов прядения//Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2002, № 2. С.20 - 22.
59. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: ФМ. 1993. - 848 с.
60. Хёрл Д.В.С., Петерс Р.Х. Структура волокон. М.:Химия. 1969. – 400 с.
61. Перепелкин К.Е. Межмолекулярные взаимодействия в волокнообразующих линейных полимерах и их некоторые механические свойства//Механика полимеров. 1991. № 5. С. 790 - 795.
62. Цветков В.Н. Жесткоцепные полимерные молекулы. Л.: Наука. 1985. - 380 с.
63. Перепелкин К.Е. Основные закономерности ориентирования и релаксации химических волокон на основе гибко- и жесткоцепных полимеров. М.: НИИТЭХИМ. 1987. - 48 с.
64. Аскадский А.А., Матвеев Ю.И. Химическое строение и физические свойства полимеров. М.: Химия, 1993. - 248 с.
65. Перепелкин К. Е. Физико-химические основы процессов формирования химических волокон. М.: Химия. 1978. - 320 с.
66. Победря Б.Е. Механика композиционных материалов. М.: Изд-во Московск. ун-та. 1984. - 336 с.

67. Аскадский А.А. Деформация полимеров. М.: Химия. 1973. - 448 с.
68. Перепелкин К.Е. Самопроизвольное (спонтанное) ориентирование и удлинение химических волокон и пленок. М.: НИИТЭХИМ. 1990. - 56 с.
69. Перепелкин К.Е. Структура и свойства волокон. –М.: Химия, 1985. – 208 с.
70. Аскадский А.А. Структура и свойства теплостойких полимеров. М.: Химия. 1981. - 320 с.
71. Попов Л.Н., Маланов А.Г., Слуцкер Г.Я., Сталевич А.М. Вязкоупругие свойства технических тканей//Химические волокна. 1993. №3. С. 42 - 44.
72. Сорокин Е.Я., Перепелкин К.Е. Неравномерность свойств химических волокон. М: НИИТЭХИМ. 1985. - 34 с.
73. Шермергор Т.Д. Теория упругости микронеоднородных сред. М. 1997. - 400 с.
74. Уржумцев Ю.С. Прогнозирование длительного сопротивления полимерных материалов. М.: Наука. 1982. - 222 с.
75. Бреслер С.Е., Ерусалимский Б.Л. Физика и химия макромолекул. М.: Наука. 1965. - 512 с.
76. Уржумцев Ю.С., Максимов Р.Д. Прогностика деформативности полимерных материалов. Рига: Знание. 1985. - 416 с.
77. Слонимский Г.Л. О законе деформации высокоэластичных полимерных тел//Доклады АН СССР. 1961. Т.140. С. 343.
78. Шермергор Т.Д. Реологические характеристики упруго-вязких материалов, обладающих асимметричным релаксационным спектром//Инженерный журнал. 1997. №5. С. 73-83.
79. Слонимский Г.Л. Релаксационные процессы в полимерах и пути их описания//Высокомолекулярные соединения. Сер.А. 1971. Т.13. №2. С. 450 - 460.

80. Ильюшин А.А. Пластичность. Уруго-пластические деформации. М.:Л.: Гостехиздат. 1988. - 376 с.
81. Ильюшин А.А., Победря Б.Е. Основы математической теории термовязко-упругости. М. 1990. - 280с.
82. Бленд Д. Теория линейной вязкоупругости. М. 1995. - 199 с.
83. Колтунов М.А. Ползучесть и релаксация. М. 1997. - 277 с.
84. Кристенсен Р. Введение в теорию вязкоупругости. М. 1994. - 338 с.
85. Бугаков И.И. Ползучесть полимерных материалов. М.: Наука. 2003. - 288 с.
86. Ферри Дж. Вязкоупругие свойства полимеров. М.: ИЛ. 1993. - 535 с.
87. Арутюнян Н.Х. Некоторые вопросы теории ползучести. М.-Л.: Гостехиздат. 1982. - 323 с.
88. Смит Т.Л. Эмпирические уравнения для вязкоупругих характеристик и вычисления релаксационных спектров. Вязкоупругая релаксация в полимерах. М.: Мир. 1994. - 270 с.
89. Кукин Г.Н., Соловьев А.Н. Текстильное материаловедение. М.: Легпромбытиздат. 1985. Т. 1. - 214 с.
90. Кукин Г.Н., Соловьев А.Н., Кобляков А.И. Текстильное материаловедение. М.: Легпромбытиздат. 1989. Т. 2. - 350 с.
91. Кукин Г.Н., Соловьев А.Н., Кобляков А.И. Текстильное материаловедение. М.: Легпромбытиздат. 1992. Т. 3. - 272 с.
92. Щербаков В.П., Коган В.М. Уточнение и дополнение к решению задачи о равновесии упругой нити на цилиндре// Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2003. №2. С. 86 - 91.
93. Щербаков В.П. Прикладная механика нити. М.: РИО МГТУ им. А.Н. Косыгина. 2001. - 124 с.

94. Феодоровский Г.Д. Определяющие уравнения реологически сложных полимерных сред//Вестник Ленингр. ун-та. Математика, механика, астрономия. 1990. №15. Вып.3. - С. 87-91.
95. Щербаков В.П., Цыганов И.Б., Заваруев В.А. Расчет упругих модулей и прочности крученной нити методами теории упругости анизотропного тела// Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2003. №6. С. 81-86.
96. Бугаков И.И. Определяющие уравнения для материалов с фазовым переходом//Механика твёрдого тела. 1999. №3. с. 111 - 117.
97. Щербаков В.П., Цыганов И.Б., Заваруев В.А. Контактное взаимодействие скрученных нитей// Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2003. №3. С. 91 - 94.
98. Бугаков И.И. О принципе сложения как основе нелинейных определяющих уравнений для сред с памятью//Механика твёрдого тела. 1989. №5. С. 83 - 89.
99. Шермергор Т.Д. Описание наследственных свойств материала при помощи суперпозиции операторов// Механика деформируемых тел и конструкций. М. 1975. С. 528 - 532.
100. Бугаков И.И. О связи уравнений Гуревича с уравнениями наследственного типа//Вестник Ленингр. ун-та. Математика, механика, астрономия. 1996. №1. С. 78 - 80.
101. Александров А.П. Морозостойкость высокомолекулярных соединений// Труды I и II конференций по высокомолекулярным соединениям. М.-Л.: Изд-во АН СССР. 1945. - С. 49 - 50.
102. Бугаков И.И., Чеповецкий М.А. Исследование уравнения Работнова//Известия АН СССР. Механика твёрдого тела. 1988. №3. - С. 172 - 175.

103. Сталевич А.М. Кинетический смысл релаксационных функций у высокоориентированных полимеров// Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 1980. №3. С. 106-107.
104. Александров А.П., Журков С.Н. Явление хрупкого разрыва. М.: Гостехтеориздат. 1933. - 52 с.
105. Аскадский А.А. Новые возможные типы ядер релаксации//Механика композитных материалов. 1997. №3. С. 403 - 409.
106. Volterra V. Legens sur les fonctions de lignes. Paris 1983. - 230 p.
107. Вольтерра В. Теория функционалов, интегральных и интегро-дифференциальных уравнений. М.: Наука. 1982. - 304 с.
108. Гуревич Г.И. О законе деформации твёрдых и жидких тел//Журнал технической физики. 1987. №12. С. 1491 - 1502.
109. Navriliak S., Negami S. A complex plan representation of dielectric and mechanical relaxation processes in some polymers//Polymer. 1987. V.8. №4. P. 161 - 210.
110. Екельчик В.С. О выборе ядер определяющих уравнений теории наследственной упругости//Вопросы судостроения. Технология судостроения. 1979. Вып. 23. С. 75 - 79.
111. Гаврильяк С., Негами С. Анализ  $\alpha$ -дисперсии в некоторых полимерных системах методом комплексных переменных// Переходы и релаксационные явления в полимерах. М. 1968. С. 118 - 137.
112. Persoz B. Le Principe de Superposition de Boltzmann// Cahier Groupe Franc. Etudees Rheol. 1987. V.2. P. 18 - 39.
113. Екельчик В.С., Рябов В.М. Об использовании одного класса наследственных ядер в линейных уравнениях вязкоупругости//Механика композитных материалов. 1991. №3. С. 393 - 404.



114. Екельчик В.С., Ривкид В.Н. Аналитическое описание линейной анизотропной ползучести тканевых стеклопластиков различных схем армирования// Свойства полиэфирных стеклопластиков и методы их контроля. 1970. Вып.2. С. 151 - 167.
115. Работнов Ю.Н., Паперник Л.Х., Степанычев Е.И. Описание ползучести композиционных материалов при растяжении и сжатии//Механика полимеров. 1973. №5. С. 779 - 785.
116. Работнов Ю.Н. Равновесие упругой среды с последствием//Прикладная математика и механика. 1948. Т. 12. №1. С. 53 - 62.
117. Ржаницын А.Р. Некоторые вопросы механики систем, деформирующихся во времени. М. 1989. - 252 с.
118. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов и конструкций. М. 1966. - 752 с.
119. Работнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твёрдых тел. М.: Наука. 1977. - 384 с.
120. Сталевич А.М. Деформирование ориентированных полимеров. СПб.: СПГУТД. 2002. - 250 с.
121. Работнов Ю.Н. Введение в механику разрушения. М.: Наука. 1987. - 80 с.
122. Сталевич А.М. Деформирование высокоориентированных полимеров. Теория линейной вязкоупругости. СПб: СПГУТД. 1995. - 80 с.
123. Ржаницын А.Р. Теория ползучести. М.: Стройиздат. 1968. - 416 с.
124. Сталевич А.М. Деформирование высокоориентированных полимеров. Теория нелинейной вязкоупругости. - СПб: СПГУТД. 1997. - 197 с.
125. Макаров А.Г., Демидов А.В., Сталевич А.М. Вариант математического моделирования деформационных процессов синтетических нитей//Химические волокна. 2007. № 6. С. 55 - 58.

126. 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.
127. Макаров А.Г., Демидов А.В., Сталевич А.М. Вариант моделирования нелинейно-наследственной вязкоупругости полимерных материалов//Механика твердого тела. 2009. № 1. С. 155 - 165.
128. Макаров А.Г., Слуцкер Г.Я., Дроботун Н.В., Васильева В.В. Диаграммы растяжения ориентированных волокон полипропилена при вариации скорости растяжения//Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2014. Т. 25. № 3. С. 47 - 50.
129. Макаров А.Г., Слуцкер Г.Я., Дроботун Н.В., Васильева В.В. Анализ диаграмм растяжения ориентированных волокон полипропилена//Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2014. Т. 26. № 4. С. 57 - 63.
130. Рымкевич П.П., Головина В.В., Горшков А.С., Макаров А.Г., Романова А.А. Осреднение физических величин методом нормального распределения//Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2015. Т. 28. № 2. С. 98 - 103.
131. Макаров А.Г., Шванкин А.М. Сравнительный анализ физико-механических свойств арамидных материалов//Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2016. Т. 31. № 1. С. 22 - 27.
132. Макаров А.Г., Демидов А.В. Прогнозирование деформационно-восстановительного процесса полимерных материалов//Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2016. Т. 32. № 2. С. 5 - 9.

133. Рымкевич П.П., Головина В.В., Макаров А.Г., Романова А.А., Шахова Е.А. Уравнение состояния материалов текстильной и легкой промышленности//Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2016. Т. 34. №. 4. С. 30-33.
134. Рымкевич О.В., Романова А.А., Суржигов В.Ф., Макаров А.Г. Влияние температурных режимов на удельное сопротивление текстильного термоусаживаемого полотна с эффектом памяти формы//Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2016. Т. 33. № 3. С. 5-9.
135. Рымкевич П.П., Головина В.В., Макаров А.Г., Романова А.А., Рымкевич О.В., Шахова Е.А. Особенности влияния надмолекулярной структуры на спектр времен релаксации полимерных текстильных материалов// Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2017. № 3 (37). С. 79 - 85.
136. Переборова Н.В. Критерии качественной оценки релаксационных процессов полимерных текстильных материалов с целью оценки их эксплуатационных свойств//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1: Естественные и технические науки. 2020. № 1. С. 80 - 88.
137. Переборова Н.В. Разработка инновационных методов контроля эксплуатационных свойств и повышения качества материалов текстильной и легкой промышленности//Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2015. Т. 29. № 3. С. 11 - 19.
138. Переборова Н.В. Разработка критериев качественной оценки функционально-потребительских свойств продукции текстильной и легкой промышленности с целью управления качеством продукции//Материалы. Дизайн. Технология. 2015. № 4 (39). С. 84 - 92.

139. Переборова Н.В. Применение критериев качественной оценки релаксационных свойств полимерных текстильных материалов для оценки их функциональности//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2020. № 1. С. 101 - 110.
140. Переборова Н.В. Разработка методов качественной оценки эксплуатационных процессов материалов текстильной и легкой промышленности с целью повышения их функциональности//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2020. № 2. С. 144 - 155.
141. Переборова Н.В. Методология компьютерного моделирования деформационно-релаксационных процессов полимерных текстильных материалов// Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2017. № 2 (30). С. 33 - 42.
142. Переборова Н.В. Повышение конкурентоспособности арамидных текстильных материалов на основе качественного анализа их эксплуатационно-деформационных свойств// Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2017. № 4 (32). С. 123 - 132.
143. Переборова Н.В. Критерии качественной оценки релаксационных свойств полимерных текстильных материалов// Химические волокна. 2021. № 2. С. 74-78.
144. Переборова Н.В. Разработка стратегической программы создания инжинирингового центра текстильной и легкой промышленности//Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2015. Т. 29. № 3. С. 35 - 42.

145. Переборова Н.В. Повышение качества продукции текстильной и легкой промышленности на основе внедрения информационных технологий в научные исследования//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2015. № 4. С. 53 - 62.
146. Киселев С.В., Переборова Н.В., Титова Л.В., Климова Н.С. Влияние степени крутки швейных полиэфирных нитей на их деформационные свойства// Химические волокна. 2021. № 3. С. 23 - 27.
147. Переборова Н.В. Критерии качественной оценки релаксационно-восстановительных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения//Химические волокна. 2020. № 3. С. 39 - 42.
148. Егорова М.А., Егоров И.М., Переборова Н.В., Демидов А.В. Разработка методов улучшения функционально-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов//Химические волокна. 2020. № 3. С. 64 - 67.
149. Переборова Н.В. Критерии качественной оценки деформационно-функциональных свойств полимерных текстильных материалов технического назначения//Химические волокна. 2020. № 4. С. 37 - 40.
150. Демидов А.В., Переборова Н.В., Макарова А.А., Чистякова Е.С. Разработка метода учета влияния температуры при прогнозировании сложных деформационных процессов полимерных текстильных материалов //Химические волокна. 2020. № 4. С. 47 - 49.
151. Переборова Н.В. Критерии качественной оценки релаксационных процессов полимерных текстильных материалов с целью оценки их эксплуатационных свойств//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2020. № 1. С. 80 - 88.

152. Егорова М.А., Егоров И.М., Переборова Н.В., Макарова А.А. Разработка методов математического моделирования и системного анализа функционально-эксплуатационных свойств полиамидных тканей для парашютостроения// Дизайн. Материалы. Технология. 2020. № 3. С. 111 - 117.
153. Переборова Н.В., Киселев С.В., Макарова А.А., Чалова Е.И. Математическое моделирование, прогнозирование и системный анализ функциональных свойств полимерных материалов для парашютостроения// Дизайн. Материалы. Технология. 2020. № 4. С. 119 - 125.
154. Переборова Н.В., Макарова А.А., Чалова Е.И., Александрова М.И. Методология расчетного прогнозирования деформационно-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов//Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2020. № 1. С. 5-19.
155. Переборова Н.В., Макарова А.А., Чалова Е.И., Александрова М.И. Разработка методов спектрального анализа и прогнозирования вязкоупругой ползучести геотекстильных нетканых материалов//Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2020. № 2. С. 51 - 63.
156. Макаров А.Г., Демидов А.В., Переборова Н.В. Оценка степени достоверности математического моделирования и прогнозирования вязкоупругопластических процессов полимерных текстильных материалов//Химические волокна. 2023. № 2. С. 11 - 13.
157. Вагнер В.И., Переборова Н.В. Исследования вязкоупругих свойств арамидных текстильных материалов //Химические волокна. 2023. № 2. С. 57 - 59.
158. Егоров И.М., Егорова М.А., Переборова Н.В., Киселев С.В.

Применение системного анализа деформационных свойств полимерных парашютных строп с целью оценки их функциональности //Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2020. № 2. С. 5-15.

159. Переборова Н.В., Киселев С.В., Вагнер В.И., Козлов А.А., Каланчук О.Э. Компьютерное прогнозирование и системный анализ деформационных процессов текстильных материалов// Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2020. № 3. С. 5 - 15.

160. Переборова Н.В., Климова Н.С., Малюков Ю.А., Зурахов В.С. Математическое моделирование деформационных и релаксационных процессов полимерной пряжи// Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2020. № 4. С. 5-11.

161. Переборова Н.В., Вагнер В.И., Киселев С.В., Козлов А.А. Компьютерное прогнозирование релаксационных процессов полимерных текстильных материалов//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2020. № 1. С. 89 - 100.

162. Демидов А.В., Макаров А.Г., Переборова Н.В. Методы повышения точности численного прогнозирования деформационных режимов эксплуатации полимерных текстильных материалов//Химические волокна. 2023. № 2. С. 71 - 73.

163. Макаров А.Г., Демидов А.В., Переборова Н.В. Вычисление энергии активации релаксационных и деформационных процессов полимерных текстильных материалов // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2023. № 1. С. 67-71.

164. Егорова М.А., Егоров И.М., Переборова Н.В., Макарова А.А. Методы повышения конкурентоспособности полимерных текстильных материалов на стадии организации их производства//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2020. № 1. С. 43 - 52.
165. Переборова Н.В. Применение критериев качественной оценки релаксационных свойств полимерных текстильных материалов для оценки их функциональности//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2020. № 1. С. 101 - 110.
166. Переборова Н.В., Чалова Е.И. Применение системного анализа для исследования деформационных свойств полиамидных тканей для парашютов//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2020. № 2. С. 60 - 70.
167. Переборова Н.В., Чалова Е.И. Проведение качественного анализа релаксационных и деформационных свойств полиамидных тканей для куполов парашютов при организации их производства//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2020. № 2. С. 24 - 34.
168. Макаров А.Г., Демидов А.В., Переборова Н.В. Повышение точности моделирования и прогнозирования процессов эксплуатации текстильных материалов // Дизайн. Материалы. Технология. 2023. № 1. С. 143 - 148.
169. Вагнер В.И., Переборова Н.В. Цифровое прогнозирование деформационных процессов тканей для парашютных куполов //Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2023. № 1. С. 5 - 9.



170. Переборова Н.В. Разработка методов качественной оценки эксплуатационных процессов материалов текстильной и легкой промышленности с целью повышения их функциональности//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2020. № 2. С. 144 - 155.
171. Переборова Н.В., Киселев С.В., Вагнер В.И., Козлов А.А. Математическое моделирование вязкоупругости полимерного волокнистого материала сложного строения//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2020. № 3. С. 107 - 117.
172. Переборова Н.В., Киселев С.В., Козлов А.А., Зурахов В.С. Математическое моделирование и численное прогнозирование вязкоупруго-пластических процессов полимерных волокнистых материалов//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2020. № 3. С. 5 - 18.
173. Егоров И.М., Козлов А.А. Моделирование релаксации текстильных эластомеров для имплантологии // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2023. № 1. С. 98 - 102.
174. Егорова М.А., Киселев С.В. Системный анализ эксплуатационных свойств арамидных текстильных материалов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2023. № 1. С. 10 - 14.
175. Козлов А.А. Исследования деформационных процессов медицинских текстильных эластомеров // Дизайн. Материалы. Технология. 2023. № 2. С. 133 - 138.

176. Переборова Н.В., Ананичев Е.А., Антонова И.А., Коробовцева А.А., Федорова С.В. Методология моделирования и компьютерного прогнозирования деформационно-эксплуатационных свойств полимерных текстильных материалов//Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2019. № 1. С. 136 - 145.
177. Переборова Н.В., Абрамова И.В., Ананичев Е.А., Антонова И.А., Коробовцева А.А. Разработка методов повышения конкурентоспособности арамидных текстильных материалов на основе компьютерного прогнозирования их релаксационно-деформационных свойств//Дизайн. Материалы. Технология. 2019. № 2 (54). С. 83 - 89.
178. Переборова Н.В., Ананичев Е.А., Антонова И.А., Каланчук О.Э., Абрамова И.В. Разработка методов повышения конкурентоспособности арамидных текстильных материалов на основе компьютерного прогнозирования их релаксационно-деформационных свойств//Дизайн. Материалы. Технология. 2019. № 2 (54). С. 106 - 112.
179. Переборова Н.В., Ананичев Е.А., Антонова И.А., Коробовцева А.А. Вариант прогнозирования усадки и восстановления арамидных текстильных материалов//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2019. № 1. С. 87 - 97.
180. Киселев С.В. Проведение теоретических и экспериментальных исследований процессов эксплуатации медицинских текстильных эластомеров // Дизайн. Материалы. Технология. 2023. № 2. С. 139 - 144.
181. Егоров И.М., Козлов А.А. Математическое моделирование релаксационных режимов эксплуатации медицинских текстильных эластомеров для имплантологии // Дизайн. Материалы. Технология. 2023. № 2. С. 145 - 150.

182. Переборова Н.В., Абрамова И.В., Ананичев Е.А., Антонова И.А., Коробовцева А.А. Варианты моделирования деформационно-эксплуатационных свойств полимерных волокнистых материалов сложного строения//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2019. № 1. С. 98 - 107.
183. Козлов А.А., Переборова Н.В., Каланчук О.Э., Ананичев Е.А., Антонова И.А. Использование компьютерного прогнозирования деформационных свойств полимерных парашютных строп для их качественной оценки при организации производства с целью повышения функциональности и конкурентоспособности//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2019. № 1. С. 20-30.
184. Вагнер В.И., Переборова Н.В., Антонова И.А., Ананичев Е.А., Каланчук О.Э. Разработка методов оптимизации и улучшения функциональности полимерных текстильных материалов на стадии организации их производства с целью повышения конкурентоспособности//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2019. № 1. С. 31-41.
185. Егорова М.А., Киселев С.В. Проведение системного и качественного анализа эксплуатационных процессов арамидных текстильных материалов // Дизайн. Материалы. Технология. 2023. № 2. С. 88 - 93.
186. Киселев С.В. Расчетное прогнозирование деформационных процессов полимерных текстильных материалов //Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2023. № 1. С. 21 - 26.

187. Переборова Н.В., Антонова И.А., Вьюгина Н.А., Колодин А.А., Павличенко Д.В., Петрова И.Н. Системный анализ эксплуатационных свойств полиэфирных нитей различной степени крутки//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2019. № 1. С. 71 - 81.
188. Переборова Н.В., Ананичев Е.А., Антонова И.А., Коробовцева А.А., Каланчук О.Э. Разработка методов системного анализа упруго-деформационных свойств полимерных текстильных канатов//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2019. № 1. С. 82 - 92.
189. Егорова М.А., Переборова Н.В., Антонова И.А., Егоров И.М. Расчетное прогнозирование деформационных процессов геотекстильных нетканых полотен на стадии их проектирования и организации производства с целью повышения конкурентоспособности// Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2019. № 2. С. 5 - 16.
190. Переборова Н.В., Егорова М.А., Абрамова И.В., Чистякова Е.С. Методы проведения качественной оценки деформационных и восстановительных свойств медицинских текстильных эластомеров на стадии их производства// Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2019. № 2. С. 17 - 27.
191. Переборова Н.В., Антонова И.А., Вьюгина Н.А., Колодин А.А., Павличенко Д.В., Петрова И.Н. Системный анализ эксплуатационных свойств полиэфирных нитей различной степени крутки//Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4. Промышленные технологии. 2019. № 1. С. 71-81.

192. Демидов А.В., Макаров А.Г., Переборова Н.В., Колодин А.А. Повышение достоверности цифрового прогнозирования деформационных процессов полимерных текстильных материалов // Дизайн. Материалы. Технология, 2023. № 3. С. 128 - 134.
193. Переборова Н.В., Томашевич Я.С., Колодин А.А. Цифровизация прогнозирования процессов вязкоупругости полимерных текстильных материалов// Дизайн. Материалы. Технология. 2023. № 2. С. 151 - 156.
194. Вагнер В.И., Переборова Н.В., Томашевич Я.С., Колодин А.А. Исследование вязкоупругих свойств арамидных текстильных материалов// Дизайн. Материалы. Технология. 2023. № 2. С. 127 - 132.
195. Колодин А.А. Методы прогнозирования деформационных и релаксационных свойств полимерных морских канатов// Дизайн. Материалы. Технология. 2023. № 3. С. 139 - 145.
196. Колодин А.А. Методы моделирования вязкоупругости арамидных текстильных материалов// Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2023. № 2. С. 24 - 30.
197. Вагнер В.И., Чистякова Е.С., Томашевич Я.С., Колодин А.А. Вариант оценки эксплуатационных и функциональных свойств полимерных текстильных нитей// Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2023. № 2. С. 51 - 55.
198. Переборова Н.В., Колодин А.А., Павличенко Д.В., Петрова И.Н., Вьюгина Н.А. Применение компьютерного прогнозирования вязкоупруго-пластических свойств с целью качественной оценки эксплуатационных характеристик полимерных канатов при их производстве //Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. 2018. № 1. С. 27-38.

199. Переборова Н.В., Томашевич Я.С., Колодин А.А. Разработка методов прогнозирования вязкоупругих режимов эксплуатации полимерных текстильных материалов// Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1. Естественные и технические науки. 2023. № 2. С. 55 - 59.
200. 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. № 2. С. 5 - 8.
201. Колодин А.А. Расчет параметров-характеристик математических моделей деформационных процессов полимерных текстильных материалов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663837 от 28.06.2023.
202. Переборова Н.В., Колодин А.А., Климова Н.С. Расчет параметров-характеристик математических моделей релаксационных процессов полимерных текстильных материалов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663835 от 28.06.2023.
203. Переборова Н.В., Колодин А.А., Климова Н.С. Расчет параметров-характеристик математических моделей вязкоупругих процессов полимерных текстильных материалов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663839 от 28.06.2023.
204. Колодин А.А. Расчет параметров-характеристик математических моделей восстановительных процессов полимерных текстильных материалов. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023663688 от 27.06.2023.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**

**СВИДЕТЕЛЬСТВА О РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММ ДЛЯ ЭВМ**



Рисунок А.1 - Свидетельство от 28.06.2023 № 2023663835 на государственную регистрацию программы для ЭВМ "Расчет параметров-характеристик математических моделей релаксационных процессов полимерных текстильных материалов"





Рисунок А.2 - Свидетельство от 28.06.2023 № 2023663837 на государственную регистрацию программы для ЭВМ "Расчет параметров-характеристик математических моделей деформационных процессов полимерных текстильных материалов"



Рисунок А.3 - Свидетельство от 27.06.2023 № 2023663688 на государственную регистрацию программы для ЭВМ "Расчет параметров-характеристик математических моделей восстановительных процессов полимерных текстильных материалов"



Рисунок А.4 - Свидетельство от 28.06.2023 № 2023663839 на государственную регистрацию программы для ЭВМ "Расчет параметров-характеристик математических моделей вязкоупругих процессов полимерных текстильных материалов"

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б.**  
**АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ**  
**РАБОТЫ**



### АКТ О ВНЕДРЕНИИ

**результатов диссертационной работы Колодина Алексея Анатольевича**  
**"Разработка методов моделирования, прогнозирования и цифровой оценки**  
**деформационных процессов арамидных текстильных материалов"**

Разработанные в диссертации методы моделирования, прогнозирования и цифровой оценки деформационных процессов арамидных текстильных материалов применялись в ООО "СЕВЕРНЫЙ ТЕКСТИЛЬ", как на стадии проектирования, так и на стадии производства текстильной продукции.

По результатам внедрения предлагаемых Колодиным А.А. методов были даны рекомендации по отбору образцов текстильных материалов, обладающих определенными релаксационными и деформационными характеристиками, в зависимости от их компонентного состава, структуры, линейной и поверхностной плотности, с целью улучшению эксплуатационных характеристик и повышения функциональности выпускаемой текстильной продукции.

Компьютерная реализация методов моделирования, прогнозирования и цифровой оценки деформационных процессов арамидных текстильных материалов, предложенных в диссертационной работе Колодина А.А. послужили

Рисунок Б.1 - Копия акта о внедрении ООО "СЕВЕРНЫЙ ТЕКСТИЛЬ" (начало)

практической основой для улучшения качества указанных материалов и повышения их конкурентоспособности.

Благодаря компьютеризации цифровых методов прогнозирования деформационных процессов арамидных текстильных материалов появился действенный механизм их практического применения с целью оценки степени соответствия и уровня качества исследуемых материалов задачам эксплуатации, что способствует решению актуальной задачи российской экономики по импортозамещению текстильной продукции в период продолжающихся международных санкций.

Главный инженер



О. Е. Бледных

Рисунок Б.2 - Копия акта о внедрении ООО "СЕВЕРНЫЙ ТЕКСТИЛЬ" (окончание)

**"УТВЕРЖДАЮ"**

Проректор по научной работе

СПбГУПТД

доктор технических наук, профессор

Макаров А.Г.

"15"

2023 г.



## **АКТ О ВНЕДРЕНИИ**

**результатов диссертационной работы Колодина А.А.**

**"Разработка методов моделирования, прогнозирования и цифровой  
оценки деформационных процессов арамидных текстильных  
материалов"**

Диссертационная работа Колодина А.А. "Разработка методов моделирования, прогнозирования и цифровой оценки деформационных процессов арамидных текстильных материалов" выполнялась на кафедре интеллектуальных систем и защиты информации в рамках базовой части государственного задания министерства науки и высшего образования Российской Федерации 2023 - 2025 гг. № FSEZ-2023-0003 по теме: "Разработка научных основ и критериев качественной оценки функционально-эксплуатационных свойств одноосно ориентированных полимерных материалов, в том числе двойного назначения, применяемых в технике и медицине, на основе математического моделирования, системного анализа и цифрового прогнозирования этих свойств", а также в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной

Рисунок Б.3 - Копия акта о внедрении СПбГУПТД (начало)

поддержки ведущих научных школ Российской Федерации № НШ-5349.2022.4 по теме: "Разработка и применение методов цифровой экономики по повышению функциональности и конкурентоспособности полимерных текстильных материалов и проектированию материалов оптимальной макроструктуры".

По результату проведенных исследований были разработаны:

- математическая модель прогнозирования релаксационных процессов арамидных текстильных материалов;
- математическая модель прогнозирования деформационных процессов арамидных текстильных материалов;
- цифровые методы прогнозирования релаксационных процессов арамидных текстильных материалов;
- цифровые методы прогнозирования деформационных процессов арамидных текстильных материалов;
- компьютерные алгоритмы и программы ЭВМ для прогнозирования эксплуатационных процессов арамидных текстильных материалов.
- проведение системного и сравнительного анализа эксплуатационных процессов арамидных текстильных материалов.

Все разработанные методы и результаты проведенных исследований получили компьютерную реализацию в виде зарегистрированных программ для ЭВМ, которые 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, кандидат технических наук,  
доцент



Зурахов В.С.