

На правах рукописи

Колодин Алексей Анатольевич

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

Специальность:

2.6.17. Материаловедение

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург  
2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна"

Научный руководитель: **Переборова Нина Викторовна**, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна", профессор кафедры интеллектуальных систем и защиты информации

Официальные оппоненты: **Коновалов Александр Сергеевич**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения", профессор кафедры метрологического обеспечения инновационных технологий и промышленной безопасности

**Рымкевич Ольга Васильевна**, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации, доцент кафедры физики.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Костромской государственный университет"

Защита диссертации состоится 28 ноября 2023 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета 24.2.385.06 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна" по адресу: 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 18, ауд. 437.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна", <http://sutd.ru/>.

Автореферат разослан \_\_\_ октября 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.385.06  
кандидат технических наук, доцент

Вагнер Виктория Игоревна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 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 АТМ, 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 цифровой 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 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.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованной литературы (204 наименования) и приложений. Основное содержание диссертации изложено на 160 страницах машинописного текста, иллюстрировано 64 рисунками и содержит 12 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** сформулирована актуальность проводимого научного исследования, приведены также: степень разработанности темы исследования, цель работы, основные задачи исследования, методы исследования, соответствие диссертационной работы Паспорту научной специальности, научная новизна работы, теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, степень достоверности результатов. Приведена также информация об апробации результатов работы и о публикациях.

В **первой главе** дается 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.

В главе цитируются научные подходы к моделированию деформационных процессов АТМ и других полимерных материалов (Работнов Ю.Н., Колтунов М.А., Ржаницин А.Р.). Приведены различные варианты моделирования деформационных процессов АТМ (Кукин Г.Н., Николаев С.Д., Соловьев А.Н., Щербаков В.П.).

Особое внимание уделено описанию методов численного прогнозирования деформационных процессов АТМ (Больцман С., Вольтерра В., Максвелл Дж.).

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

С целью построения качественной картины упруго-вязкоупруго-пластических свойств АТМ, описаны возможные методы прогнозирования упругой, вязкоупругой и пластической компонент деформации указанных материалов (Сталевич А.М., Переборова Н.В.).

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 также основные методы вычисления параметров-характеристик для линейных и нелинейных деформационных процессов АТМ (Демидов А.В., Макаров А.Г., Климова Н.С.).

Во **второй главе** приведено описание объектов исследования - АТМ, как российского, так и зарубежного изготовления (табл. 1).

Таблица 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)

Математическое моделирование процессов релаксации и процессов ползучести образцов АТМ, приведенных в табл. 1, осуществлялось на основе аппроксимации экспериментальных семейств релаксации и семейств ползучести нормированной функцией арктангенс логарифма приведенного времени (НАЛ), имеющей вид:

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

в случае релаксации и

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

в случае ползучести.

Здесь:

$\tau_{\varepsilon}$  - время релаксации;

$\tau_{\sigma}$  - время запаздывания;

$b_{n\varepsilon}$  - интенсивность релаксации;

$b_{n\sigma}$  - интенсивность ползучести,

$t$  - время;  
 $\varepsilon$  - деформация;  
 $\sigma$  - напряжение.

Выбор для математического моделирования релаксации и ползучести функции НАЛ обоснован тем, что она характеризует вероятностное распределение Коши, близкое к нормальному распределению и обладающую свойством аддитивности - аналогом реологической структуры АТМ.

Учитывая выражения (1) и (2) математические модели деформационных процессов АТМ будут иметь вид:

$$E_{\varepsilon t} = E_0 - (E_0 - E_\infty) \cdot \varphi_{\varepsilon t} \quad (3)$$

в случае релаксации и

$$D_{\sigma t} = D_0 + (D_\infty - D_0) \cdot \varphi_{\sigma t} \quad (4)$$

в случае ползучести.

Здесь:

$E_{\varepsilon t} = \sigma / \varepsilon$  - моделируемое значение модуля релаксации;

$D_{\sigma t} = \varepsilon / \sigma$  - моделируемое значение податливости;

$E_0$  и  $E_\infty$  - асимптотические значения модуля релаксации;

$D_0$  и  $D_\infty$  - асимптотические значения податливости.

Графические примеры моделирования релаксации и ползучести АТМ (нить СВМ) приведены соответственно на рис. 1 и рис. 2.

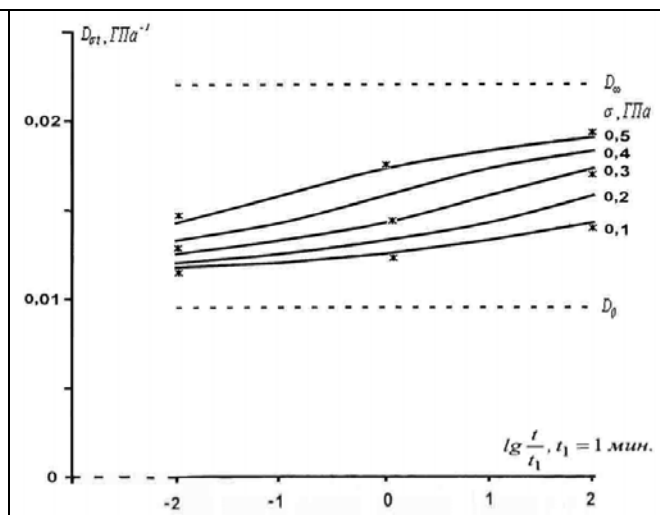
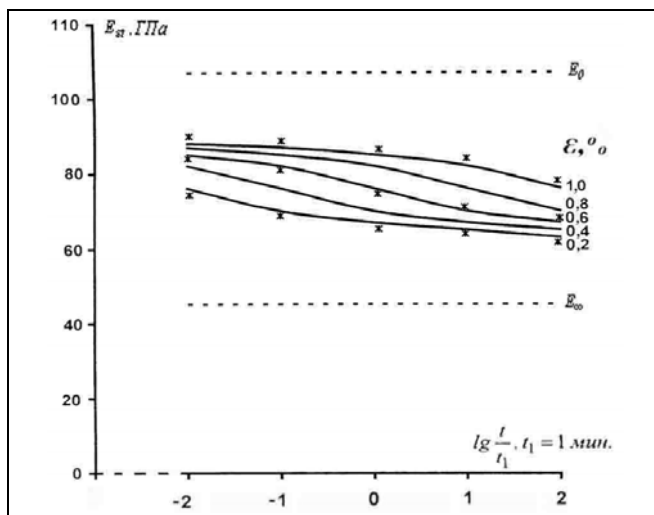


Рисунок 1 - Моделирование релаксации нити СВМ; сплошные линии - эксперимент, звездочки - расчетные значения по формуле (3).

Рисунок 2 - Моделирование ползучести нити СВМ; сплошные линии - эксперимент, звездочки - расчетные значения по формуле (4).

Из рис. 1 и рис. 2 видно, что расчетные значения модуля релаксации и податливости достаточно близки к соответствующим экспериментальным значениям.

**Третья глава** посвящена разработке методов цифрового прогнозирования процесса релаксации и процесса ползучести АТМ с использованием определяющих интегральных уравнений Больцмана-Вольтерра:

$$\sigma_t = E_0 \varepsilon_t - (E_0 - E_\infty) \cdot \int_0^t \varepsilon_\theta \cdot \varphi'_{\varepsilon, t-\theta} d\theta, \quad (5)$$

в случае релаксации и

$$\varepsilon_t = D_0 \sigma_t + (D_\infty - D_0) \cdot \int_0^t \sigma_\theta \cdot \varphi'_{\sigma, t-\theta} d\theta. \quad (6)$$

в случае ползучести.

Здесь:

$$\varphi'_{\varepsilon t} = \frac{\partial \varphi_{\varepsilon t}}{\partial t} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\varepsilon}} \cdot \frac{1}{1 + W_{\varepsilon t}^2} \cdot \frac{1}{t} \quad (7)$$

интегральное ядро релаксации АТМ;

$$\varphi'_{\sigma t} = \frac{\partial \varphi_{\sigma t}}{\partial t} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{b_{n\sigma}} \cdot \frac{1}{1 + W_{\sigma t}^2} \cdot \frac{1}{t} \quad (8)$$

интегральное ядро ползучести АТМ.

Использование интегральных уравнений (5), (6) с интегральными ядрами (7), (8) позволяет проводить достаточно точное цифровое прогнозирование процессов релаксации и процессов ползучести АТМ для любых законов их деформирования и нагружения.

В **четвертой главе** разрабатываются компьютерные алгоритмы и программы для ЭВМ:

- по расчету параметров-характеристик математических моделей релаксационных и восстановительных процессов АТМ (рис. 3);
- по расчету параметров-характеристик математических моделей деформационных и вязкоупругих (г) процессов полимерных текстильных материалов.

Были разработаны четыре программы для ЭВМ (свидетельство № 2023663837 от 28.06.2023; свидетельство № 2023663835 от 28.06.2023; свидетельство № 2023663839 от 28.06.2023; свидетельство № 2023663688 от 27.06.2023).



**а**



**б**

Рисунок 3 - Свидетельства на государственную регистрацию программ для ЭВМ по расчету параметров-характеристик математических моделей релаксационных (а) и восстановительных (б) процессов АТМ



**а**



**б**

Рисунок 4 - Свидетельства на государственную регистрацию программ для ЭВМ по расчету параметров-характеристик математических моделей деформационных (а) и вязкоупругих (б) процессов АТМ

В пятой главе разрабатываются методы качественной оценки эксплуатационных свойств АТМ на основе системного анализа соответствующих параметров-характеристик процессов релаксации и процессов ползучести.

Даются практические рекомендации в части проектирования АТМ и изделий из них, обладающими необходимыми эксплуатационными свойствами.

Зная значения параметров-характеристик интенсивностей процессов релаксации и ползучести АТМ (табл. 2), получаем информацию о том, насколько быстро проходят указанные процессы.

Таблица 2 - Расчетные параметры-характеристики интенсивностей процессов релаксации ( $b_{n\varepsilon}$ ) и ползучести ( $b_{n\sigma}$ ) 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

Самый медленный процесс релаксации и процесс ползучести наблюдается у АТМ, имеющего наибольшие значения параметров-характеристик интенсивностей, т.е. у тварона.

Самый быстрый процесс релаксации и процесс ползучести наблюдается у АТМ, имеющего наименьшие значения параметров-характеристик интенсивностей, т.е. у техноры.

В таб. 3 приведены асимптотические параметры-характеристики релаксации и ползучести АТМ.

Зная асимптотические параметры-характеристики релаксации и ползучести АТМ (табл. 3) можно определить соответствующие коэффициенты степени релаксации и степени ползучести:

$$k_{рел.} = \frac{E_0 - E_\infty}{E_0} \cdot 100\%, \quad (9)$$

в случае релаксации и

$$k_{полз.} = \frac{D_{\infty} - D_0}{D_{\infty}} \cdot 100\%. \quad (10)$$

в случае ползучести.

Таблица 3 - Расчетные асимптотические параметры-характеристики релаксации и ползучести 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

У АТМ, имеющего наибольшие значения коэффициентов степени релаксации и ползучести наблюдается наивысшая степень прохождения указанных процессов.

Из табл. 4 видно, что наиболее полно (на 58%) процессы релаксации и ползучести проходят у кевлара, а наименее полно - у тварона

Таблица 4 - Расчетные коэффициенты степени релаксации и степени ползучести 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

Применение разработанных методов качественной оценки эксплуатационных свойств АТМ на практике упрощается благодаря проведенной цифровизации соответствующих вычислений.

## **ВЫВОДЫ**

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.

**Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах**

**Статьи в рецензируемых журналах, входящих в "Перечень ВАК РФ" по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки):**

1. Переборова Н.В., Томашевич Я.С., Колодин А.А. Цифровизация прогнозирования процессов вязкоупругости полимерных текстильных материалов// Дизайн. Материалы. Технология. 2023. № 2. С. 151-156.

2. 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.

3. 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.

4. Колодин А.А. Методы прогнозирования деформационных и релаксационных свойств полимерных морских канатов// Дизайн. Материалы. Технология. 2023. № 3. С. 139 - 145.

5. 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.

6. Колодин А.А. Методы моделирования вязкоупругости арамидных текстильных материалов// Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. 2023. № 2. С. 24 - 30.

7. 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.

#### **Другие публикации:**

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.