

*На правах рукописи*



Рымкевич Ольга Васильевна

**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ТЕРМОУСАЖИВАЕМЫХ  
ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность

05.19.01 – Материаловедение производств текстильной и лёгкой промышленности

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна».

Научный руководитель: **Цобкалло Екатерина Сергеевна**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Шляхтенко Павел Григорьевич**  
доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна», главный научный сотрудник лаборатории ОТМ

**Бронников Сергей Васильевич**  
доктор физико-математических наук, профессор ФГБУН «Институт высокомолекулярных соединений российской академии наук», ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем машиноведения российской академии наук», Санкт-Петербург

Защита состоится «17» декабря 2013г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.236.01 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна» по адресу: 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 18, ауд. 241.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна».

Текст автореферата размещен на сайте СПГУТД: <http://www.sutd.ru>

Автореферат разослан «15» ноября 2013г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Витковская Раиса Федоровна

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность работы.** Сфера использования технического текстиля, обладающего специальными свойствами, чрезвычайно обширна. Производство технического текстиля - одна из самых быстрорастущих отраслей промышленности. К текстильным материалам со специальными свойствами относятся текстильные термоусаживаемые полотна в виде трубок, обладающие большими значениями усадки или так называемым эффектом памяти формы. Материалы с эффектом памяти формы при температурных воздействиях, способны возвращаться к своим первоначальным формам и размерам, усаживаясь на предметы различных форм, обеспечивая тем самым хорошую защиту от воздействий окружающей среды, химических веществ, электрическую изоляцию. В настоящее время исследований, посвященных данным материалам, очень мало. Одним из актуальных вопросов в исследовании текстильных термоусаживаемых полотен остается моделирование их свойств в различных температурно-временных режимах, а также прогнозирование величины усадки текстильных полотен в зависимости от усадки входящих в состав полотна компонентов – нитей.

**Цель работы** состоит в разработке методов исследования, прогнозировании свойств волокнистых материалов с эффектом памяти формы, в моделировании характеристик эксплуатационных свойств термоусаживаемых технических текстильных полотен на основе усадки входящих в его состав нитей.

### **Основные задачи работы:**

- Разработать методы исследования процесса термоусадки нитей, входящих в состав текстильного термоусаживаемого полотна;
- Исследовать термодформационные процессы нитей-компонентов текстильного термоусаживаемого полотна в различных температурно-временных режимах;
- Разработать способы описания термодформационных процессов волокнистых материалов, обладающих эффектом памяти формы;
- Разработать физическую модель структурных процессов волокнистых материалов с эффектом памяти формы;
- Выявить влияние температурных воздействий на механические свойства нитей, входящих в состав текстильного термоусаживаемого полотна;
- Изучить процессы усадки технического текстильного полотна в различных температурно-временных режимах;
- Разработать методы моделирования процессов термоусадки текстильного термоусаживаемого полотна на основе усадки входящих в его состав нитей;
- Выявить область рабочих температурных режимов текстильных термоусаживаемых материалов.

### **Научная новизна работы:**

- Выявлены закономерности усадки текстильного полотна и составляющих его нитей в различных температурно-временных режимах;
- Разработаны модели для описания прогнозирования процесса усадки нитей, составляющих текстильное полотно;
- Разработана модель структурных переходов волокнистых материалов с эффектом памяти формы. Определены основные энергетические состояния полимера с эффектом памяти формы;
- Предложены методы моделирования и прогнозирования усадки термоусаживаемого полотна на основе усадки нитей, входящих в его состав;

- Для моделирования процесса термоусадки нитей в свободном состоянии и режиме изометрического нагрева предложено общее уравнение деформации для нити с эффектом памяти формы.

#### **Практическая значимость работы:**

- Разработаны методы описания термодформационных процессов синтетических нитей, обладающих эффектом памяти формы, позволяющие прогнозировать их усадку в различных температурно-временных режимах;
- Разработан метод прогнозирования усадки текстильного полотна на основе усадки составляющих полотно нитей, позволяющий контролировать качество посадки полотна на изделия до стадии температурных воздействий;
- Выявлены температурно-временные области воздействий для задания необходимых режимов эксплуатации термоусаживаемых текстильных материалов;
- Разработаны методы моделирования и прогнозирования усадки текстильного термоусаживаемого полотна на основе составляющих его компонентов.

**Достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций** обеспечена объективной тарировкой испытательного комплекса INSTRON 1122 и других приборов, обоснованным объемом выборок исследуемых образцов, применением методов математической статистики и критериев согласия, рекомендуемых ГОСТом, а также апробацией результатов работы.

**Апробация результатов работы.** Результаты работы доложены на международной научной конференции и 7-ой и 9-ой всероссийской олимпиаде молодых ученых “Наноструктурные, волокнистые и композиционные материалы” (СПб, 2012 г; СПб 2013.); XVI международном научно-практическом семинаре “Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы SMARTEX-2013” (Иваново, 2013 г.); II международной научно-практической конференции “Тенденции и инновации современной науки” (Краснодар, 2012 г.); III международной научно-практической конференции “Инновационные технологии в сервисе” (СПб, 2012 г.); всероссийской научно-технической конференции “Строительная теплофизика и энергоэффективное проектирование ограждающих конструкций зданий” (СПб, 2009 г.); международной научно-практической конференции “Инновационные процессы в сфере сервиса: проблемы и перспективы (СПб, 2009 г.);

**Реализация результатов.** Результаты работы внедрены в ООО “Алексис” и ООО “ВторЭнергоРесурс”.

**Публикации.** По материалам опубликовано 11 печатных работ, 3 из них в изданиях, входящих в “Перечень ВАК...” , список которых приведен в конце автореферата.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа включает введение, 6 глав, выводы, список использованных источников (195 наименований), 4 приложения. Работа изложена на 176 страницах, содержит 74 рисунка и 15 таблиц.

#### **Содержание работы**

**Во введении** дано обоснование актуальности темы работы.

**Первая глава** содержит обзор публикаций, посвящённых термоусаживаемым материалам и эффекте памяти формы. Показано, что в основном научные работы в данной области относятся к исследованию трубок из термоусаживаемых полимерных материалов. Вопросы, относящиеся к методам исследования, прогнозирования и моделирования эксплуатационных свойств термоусаживаемых текстильных материалов со сложнокompонентной структурой остаются практически не

изученными. На основании литературного обзора в данной главе сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

**Вторая глава** посвящена описанию используемых материалов, методам исследования их структуры и свойств.

Исходные материалы. В качестве объекта исследования было взято термоусаживаемое текстильное полотно в виде трубки диаметром D=10 см InnoSHRINK XTFS с продольным швом из ткани полотняного переплетения.

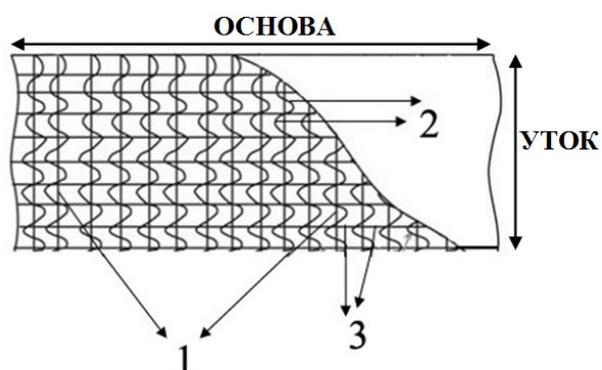


Рисунок 1 - Схема термоусаживаемой трубки

Уменьшение диаметра термоусаживаемой трубки обеспечивается уточными нитями – полиэтиленовой (ПЭ) монополью с эффектом памяти формы (нить 1) и комплексной полиэтилентерефталатной (ПЭТФ) (нить2). Продольный размер задается ПЭТФ текстурированными нитями основы (3) (рисунок 1). Как будет показано в главе 3, основным термоусаживаемым компонентом является уточная модифицированная ПЭ монополь (1), обладающая эффектом памяти формы.

Формирование эффекта памяти формы у нити осуществляется в 3 этапа:

1. Облучение нити потоком высокоэнергетических заряженных частиц, при котором происходит разрыв химической связи углерод-водород с последующим образованием связи углерод-углерод между соседними цепочками макромолекул, т.е. на этом этапе образуются сшивки между линейными макромолекулами ПЭ;
  2. Ориентационная вытяжка нити при температуре, близкой к температуре плавления;
  3. Охлаждения нити с фиксацией полученного неравновесного состояния.
- Определенные характеристики компонентов термоусаживаемого полотна приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики нитей, образующих термоусаживаемое полотно.

Нить	Линейная плотность, T, текс	Разрывное напряжение, $\sigma_p$ , МПа	Разрывная деформация, $\epsilon_p$ , %	Модуль упругости $E_0$ , ГПа
Уточная ПЭ монополь с эффектом памяти формы	60	295	24	1,7
Уточная ПЭТФ нить	40	400	24	2,2
ПЭТФ нить основы	200	330	23-26	2,5

#### **Методы исследования свойств текстильного полотна и его компонент - нитей.**

Температурные исследования величины поперечной и продольной деформации текстильного полотна и нитей производились в свободном состоянии в электропечи SNOL 58/350 в диапазоне температур 100-200 °С при различных временах теплового воздействия: 1-20 минут. Нижняя и верхняя границы температурного интервала были установлены исходя из следующего: 100 °С – температура начала усадки нитей, 200 °С – температура, выше которой начиналась деструкция ПЭ уточной монопольи. Продольная деформация – усадка нитей рассчитывалась по формуле

$\epsilon_{прод} = \left| \frac{l_1 - l_2}{l_1} \right| * 100\%$ , где  $l_1$ ,  $l_2$  – длины нитей до и после усадки; поперечная

деформация нитей рассчитывалась по формуле  $\varepsilon_{\text{нотер}} = \left| \frac{D_1 - D_2}{D_1} \right| \cdot 100\%$ , где  $D_1, D_2$  –

диаметры нитей до и после усадки; поперечная деформация – усадка текстильного полотна рассчитывалась по формуле  $\varepsilon_n = \left| \frac{d_1 - d_y}{d_1} \right| \cdot 100\%$ , где  $d_1, d_y$  – диаметры трубки до

и после усадки. Химический состав нитей был исследован на инфракрасном Фурье-спектрометре Vertex-70 фирмы Bruker в диапазоне частот  $5000-500 \text{ см}^{-1}$  с применением микроприставки НПВО фирмы Pike. Деформационно-прочностные свойства нитей исследовали на основе диаграмм растяжения, полученных на универсальной установке "Instron-1122". Исследование изометрического нагрева также проводились также на установке "Instron-1122". Удельное сопротивление термоусаживаемого полотна было определено трехконтактным методом.

**Третья глава** посвящена изучению процесса термоусадки основного термоусаживаемого компонента полотна - точной ПЭ мононити с эффектом памяти формы, его моделированию и прогнозированию. На основании структурных исследований показано, что термоусаживаемая мононить по химическому составу - радиационно сшитый полиэтилен.

Изучены термодформационные процессы ПЭ мононити с эффектом памяти формы в различных температурно-временных режимах. Получены экспериментальные зависимости усадки ПЭ мононити в температурном диапазоне  $100-200 \text{ }^\circ\text{C}$  от времени температурного воздействия  $t$ , стремящиеся к стабилизационному значению; некоторые из них представлены на рисунке 2. Максимальная усадка ПЭ нити составила порядка 90%.

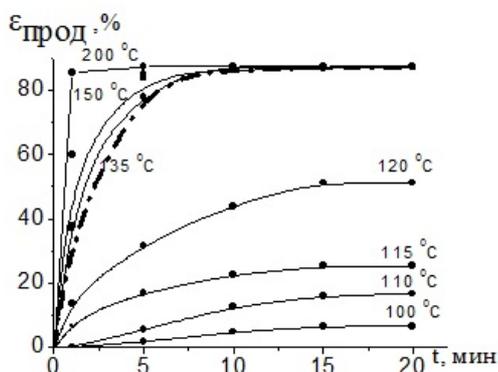


Рисунок 2 -Зависимость усадки ПЭ мононити от времени воздействия

Для разработки методов описания и прогнозирования усадочных свойств предложен подход, основанный на разбиении структуры сшитого ПЭ на множество элементарных объемов-кластеров, представляющих собой участки макромолекул, соединенных сшивками. Кластеры могут находиться в двух состояниях – свернутом и распрямленном с линейными размерами  $a$  и  $b$  соответственно. Процесс термоусадки состоит в переходе кластеров из состояния 3 в состояние 1.

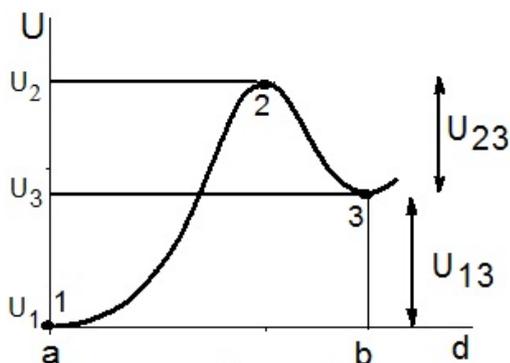


Рисунок 3 - Энергия состояния кластера

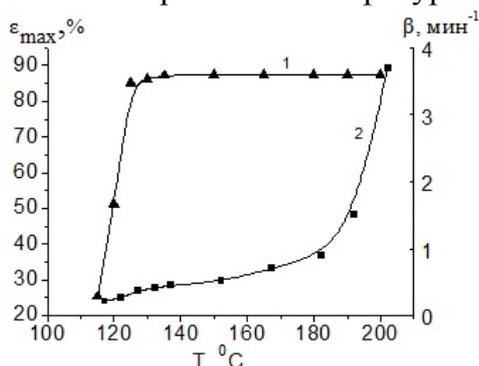
На рисунке 3 представлена зависимость энергии состояния кластера  $U$  от степени его растяжения  $d$ . Участок кривой 1-2 соответствует технологическому процессу вытяжки (стадия 2); участок 2-3 - процессу охлаждения нити (стадия 3). Процесс усадки имеет термоактивационный характер. В основе структурного механизма свертывания кластеров лежат корпоративные транс-гош переходы. Время усадки (реализации транс-гош переходов) рассчитывается по формуле:

Время усадки (реализации транс-гош переходов) рассчитывается по формуле:

$$t = t_0 e^{\left(\frac{\tilde{U}_{23}}{RT}\right)}, \quad (1)$$

где  $t_0=10^{-6}$  (с),  $\tilde{U}_{23}$  - энергия активации процесса термоусадки (кДж/моль).  
 Определена энергия активации – высота потенциального барьера  $\tilde{U}_{23} \sim 65-68$  кДж/моль.

Поскольку зависимости  $\varepsilon_{prod}(t)$  имеют экспоненциальный вид и стремятся к стабилизационному значению, было предложено описать зависимость усадки ПЭ нити от времени температурного воздействия с помощью уравнения (2):

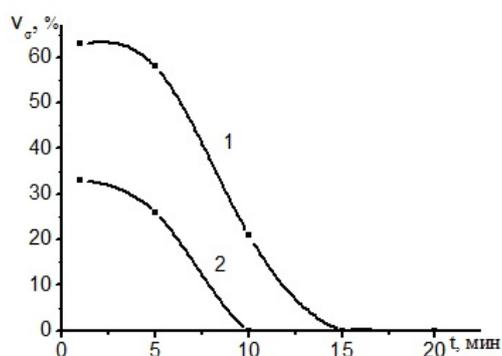


1-  $\varepsilon_{max}$  %; 2-  $\beta$  мин<sup>-1</sup>

Рисунок 4 - Зависимости величин максимальной усадки  $\varepsilon_{max}$  и  $\beta$  от температуры для ПЭ мононити

Рисунок 5 - Неравномерная поперечная деформация уточной ПЭ мононити

изменения диаметра ПЭ мононити по длине нити (рисунок 5). Для характеристики степени неравномерности поперечной деформации мононити с эффектом памяти формы



1-125 °C; 2-130 °C

Рисунок 6 - Зависимость  $V_\sigma$  от времени теплового воздействия для уточной ПЭ мононити

$$\varepsilon_{prod}(t) = \varepsilon_{max} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau(T)}}\right), \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{prod}$  - усадка мононити с эффектом памяти формы;  $\varepsilon_{max}$  - максимальная усадка. Построив график  $\ln\left(1 - \frac{\varepsilon_{prod}}{\varepsilon_{max}}\right)$  от времени  $t$  и получив линейные зависимости, определен коэффициент  $\beta = \frac{1}{\tau}$  в области 115-200 °C (рисунок 4). Определена

зависимость  $\varepsilon_{max}$  от  $T$  для ПЭ нити. Предложенный подход позволяет рассчитать значение усадки нити при любой заданной температуре в диапазоне 115-200 °C. На рисунке 2 пунктирной линией указана теоретическая зависимость усадки уточной ПЭ мононити при температуре 135 °C.

В диапазоне 125 – 130 °C выявлена особенность изменения диаметра ПЭ мононити: поперечная деформация происходит неравномерно по длине нити (рисунок 5). Для характеристики степени неравномерности поперечной деформации мононити с эффектом памяти формы введён коэффициент разброса  $V_\sigma = \frac{\sigma_{кв}}{\bar{d}}$ , где  $\sigma_{кв}$  - среднеквадратичное отклонение;  $\bar{d}$  - среднее значение диаметра мононити по всем характерным областям. На рисунке 6 представлены зависимости  $V_\sigma$  от времени  $t$  для 125 и 130 °C. Чем выше температура и больше время  $t$  при данной температуре, тем  $V_\sigma$  оказывался меньше. Стремление к нулю  $V_\sigma$  означает, что при данном температурном режиме поперечная деформация ПЭ мононити с эффектом памяти формы становилась равномерной по всей длине нити в пределах точности измерений.

Предложен подход для объяснения указанной неравномерности усадки, заключающийся в наличии спектра состояний кластеров в потенциальной яме 3, т.е. наличии "множественных потенциальных барьеров" (рисунок 7). В силу

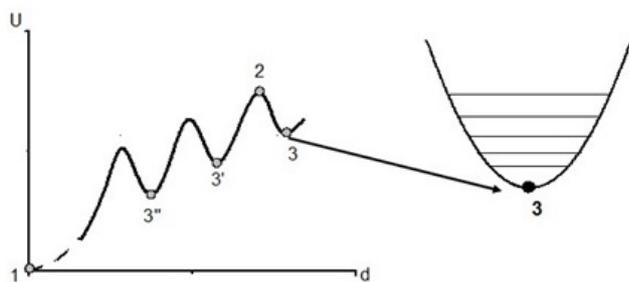


Рисунок 7 - Энергетическая модель переходов кластеров с учетом "множественных потенциальных барьеров"

технологического получения термовытянутого сшитого полимера точка 3 не может являться единственным состоянием кластеров. Потенциальная яма 3 представляет собой спектр состояний. В диапазоне 100-125 °С времена выхода кластеров из потенциальной ямы 3 велики и приблизительно равны по порядку величины. Значения стабилизации усадки существенно меньше максимально возможной (смотри рисунок 2). Осуществляются только

некоторые переходы из верхних энергетических состояний. После того, как кластеры, находящиеся в потенциальной яме 3, перешли через первый потенциальный барьер и оказались в состоянии 3', без дальнейшего повышения температуры они не смогут преодолеть следующий потенциальный барьер и деформация переходит в состояние стабилизации. В температурном диапазоне 125-130 °С, где наблюдается неравномерность усадки по диаметру, происходят более сложные процессы: некоторые кластеры могут перейти в состояние 3' и затем в 3'', некоторые остаются в состоянии 3. Вследствие чего возникает неравномерность значений диаметра поперечной деформации. Чем больше время теплового воздействия, тем больше кластеров, обладающих меньшей энергией, успевают перейти через первый и последующие потенциальные барьеры, как следствие, неравномерность поперечной деформации становится меньше. В диапазоне температур 135-200 °С все кластеры, находящиеся в потенциальной яме 3 на разных энергетических уровнях спектра, приобретают способность преодолеть потенциальный барьер и оказаться в состоянии 3'. Как следствие, процесс усадки равномерен.

Предложенное уравнение (2) позволяет описывать и прогнозировать усадку нити во времени только в режиме постоянной температуры. Изучаемые нами материалы в процессе эксплуатации подвергаются и другим видам воздействия. Например, насадка термоусаживаемого материала на изделие с определёнными размерами и затем нагревание трубки. В этом случае усадка не наблюдается, ей препятствует форма изделия, но в результате такого воздействия возникают внутренние напряжения, которые требуют оценки и прогнозирования. Такой режим соответствует режиму изометрического нагрева. Существуют и другие, более сложные эксплуатационные режимы, например, сначала свободная усадка, затем изометрический нагрев и др. Для моделирования и прогнозирования величины деформации в различных режимах ПЭ мононити с эффектом памяти формы было предложено использовать общее уравнение деформации. Вывод этого уравнения основан на использовании статистических методов, учитывая вероятности перехода кластеров через потенциальный барьер и изменение их числа за единицу времени в различных энергетических состояниях. Общее уравнение деформации имеет вид:

$$\frac{d}{d\kappa}(\varepsilon - \varepsilon_{ynp}) + (\varepsilon - \varepsilon_{ynp}) \left( e^{\frac{\gamma \varepsilon_{ynp}^2}{kT}} + e^{\frac{U_{13} - \gamma \varepsilon_{ynp}^2}{kT}} \right) = \chi sh\left(\frac{\gamma \varepsilon_{ynp}^2}{kT}\right), \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  - деформация нити;  $\varepsilon_{ynp}$  - квазиупругая часть деформации;  $U_{13}$  - высота потенциального барьера относительно состояния 1;  $\gamma$  - коэффициент, зависящий от

структуры и свойств нити;  $\chi = \frac{2m_0\delta}{\frac{-U_{13}}{e^{kT}} + 1}$  - безразмерный параметр, являющийся

функцией температуры;  $m_0 = \frac{N_0}{L_0}$  - линейная плотность кластеров;  $N_0$  - полное число

кластеров;  $L_0$  - первоначальная длина образца;  $\delta = b - a$  - единичный квант деформации

кластера;  $\kappa = \frac{t}{\theta_p}$ ;  $\theta_p$  - величина, обратная вероятности перехода в единицу времени

в направлении 1-3.

В настоящей работе общее уравнение деформации было применено к двум режимам – свободной усадки при нагревании и изометрического нагрева уточной ПЭ нити (глава 5). Из уравнения свободной усадки была получена формула для коэффициента  $\beta$ :

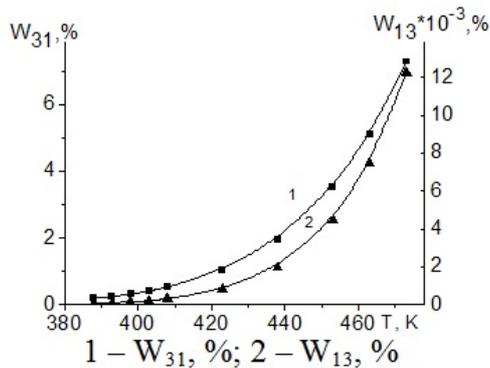


Рисунок 8 - Зависимость вероятности переходов кластеров ПЭ мононити через потенциальный барьер в направлении 1-3 и 3-1

$$\beta = \frac{-\left(1 + e^{\frac{U_{13}}{kT}}\right)}{e^{\frac{U_{12}}{kT}}} v_0, \quad (4)$$

где  $v_0$  - коэффициент, определяющий вероятность переходов кластеров через потенциальный барьер в единицу времени, ( $c^{-1}$ ). Используя полученные экспериментальные значения  $\beta$ , были определены величины: энергия  $\tilde{U}_{13} = 25$  кДж/моль (рисунок 3), характеризующая глубину потенциальной ямы для кластеров, находящихся в состоянии 3 относительно

нулевого уровня; энергия  $\tilde{U}_{12} = \tilde{U}_{23} + \tilde{U}_{13} = 90$  кДж/моль, характеризующая высоту потенциального барьера в направлении 1-3; коэффициент  $v_0 \sim 1 \cdot 10^6 c^{-1}$ ; вероятности энергетических переходов кластеров  $W_{13}$  и  $W_{31}$  через потенциальный барьер за единицу времени в направлении 1-3 и 3-1. Зависимости  $W_{13}(T)$  и  $W_{31}(T)$  представлены на рисунке 8.

Уравнение (3) для режима термической усадки в свободном состоянии с учетом формулы 4 имеет следующий вид:

$$\varepsilon_{nrod} = \varepsilon_{max} \left( 1 - e^{-\frac{U_{13}}{kT} v_0 t} \right), \quad (5)$$

где  $t$  - время, измеряемое в минутах. Это уравнение было применено для оценки усадки в свободном состоянии ПЭ мононити от времени. Хорошее совпадение

теоретических и экспериментальных зависимостей  $\varepsilon_{прод}(t)$  показывает возможность применения уравнения 5 к расчету  $\varepsilon_{прод}$ .

**Четвертая глава** посвящена исследованию усадки двух других компонентов полотна - уточной комплексной ПЭТФ нити (нить 2) и ПЭТФ нити основы (нить 3). Определен химический состав нитей методом ИКС. Показано, что обе нити являются полиэтилентерефталатными. Исследованы зависимости усадки этих нитей от времени теплового воздействия в диапазоне температур 100-200 °С. Две уточные нити – ПЭ

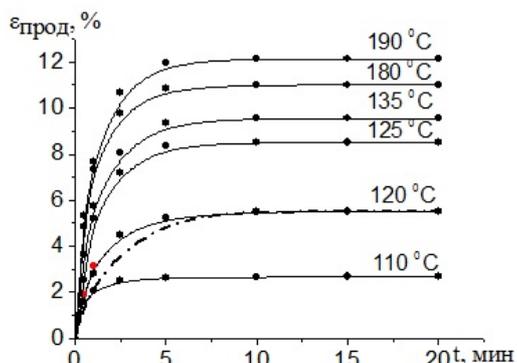
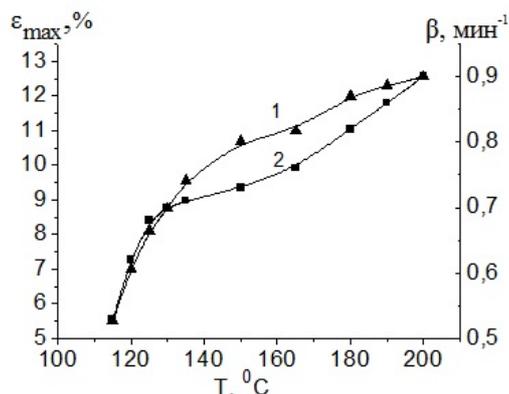


Рисунок 9 - Зависимость усадки уточной комплексной ПЭТФ нити от времени воздействия



1 -  $\varepsilon_{max}$ , %; 2 -  $\beta$ , мин<sup>-1</sup>

Рисунок 10 - Зависимости величин  $\beta$  и максимальной усадки  $\varepsilon_{max}$  от температуры для комплексной ПЭТФ нити

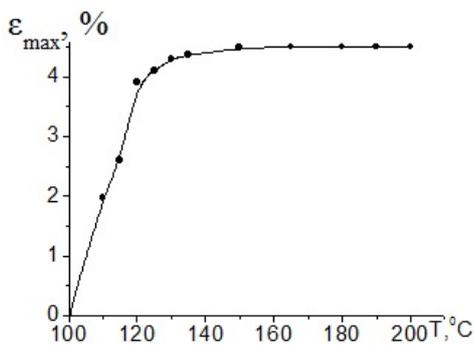


Рисунок 11 - Зависимость максимальной усадки ПЭТФ нити основы

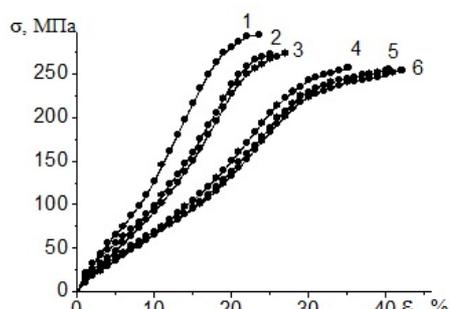
мононить и ПЭТФ комплексная нить являются уточными и обеспечивают поперечную усадку текстильного полотна. Показано, что усадка уточной комплексной ПЭТФ (рисунок 9) нити в значительной степени меньше усадки уточной ПЭ мононити с эффектом памяти формы (рисунок 2). Так как зависимости, представленные на рисунке 9, имеют экспоненциальный характер, они также были описаны уравнением (2). На рисунке 10 представлены зависимости коэффициента  $\beta$  и максимальной продольной усадки  $\varepsilon_{max}$  от температуры  $T$  для уточной комплексной ПЭТФ нити. Полученная зависимость позволяет построить

теоретическую зависимость усадки уточной комплексной ПЭТФ нити в диапазоне 115-200 °С. На рисунке 9 пунктирной линией изображена теоретическая зависимость  $\varepsilon_{прод}$  комплексной нити от времени  $t$  для температуры 120 °С. Полученные результаты позволяют в температурном диапазоне 115-200 °С определить для любой температуры необходимый температурно-временной режим для заранее заданной усадки. Таким образом, предложенный метод прогнозирования применим не только к термоусаживаемым нитям, но и к объектам с не столь большими значениями температурных деформаций.

В процессе эксплуатации термоусаживаемого полотна для выбора оптимального температурного режима, обеспечивающего заданную усадку, необходимо знать, как изменяются ее продольные размеры для учета возможного нежелательного уменьшения длины текстильного полотна. Проведены исследования усадки ПЭТФ нити основы, значения которой оказались незначительными - максимальная усадка не превышает 5% (рисунок 11). Так как в процессе усадки полотно подвергается воздействию температур, которые могут вызывать процессы термодеструкции в нитях, необходимо исследовать изменение механических свойств

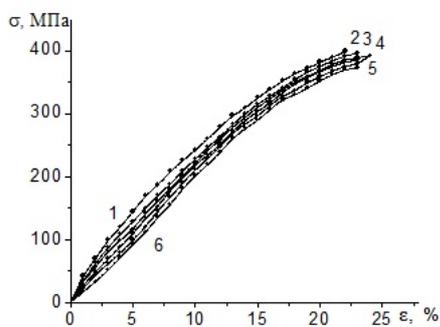
компонентов текстильного полотна в различных температурно-временных режимах.

**Пятая глава** посвящена изучению механических свойств нитей текстильного полотна. На рисунке 12-14 приведены диаграммы растяжения нитей, составляющих полотно и подвергнутых температуре воздействия 100 °С.



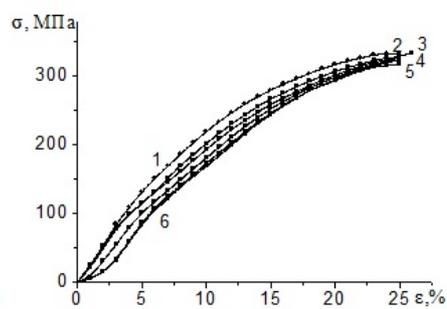
1 - исходная нить; 2 - 1 мин;  
3 - 5 мин; 4 - 10 мин; 5 - 15 мин;  
6 - 20 мин

Рисунок 12 - Диаграммы растяжения уточной ПЭ мононити



1 - исходная нить; 2 - 1 мин;  
3 - 5 мин; 4 - 10 мин; 5 - 15 мин;  
6 - 20 мин

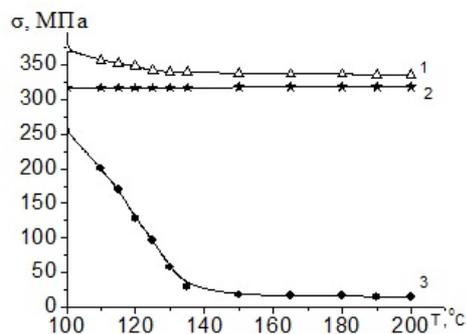
Рисунок 13 - Диаграммы растяжения уточной комплексной ПЭТФ нити



1 - исходная нить; 2 - 1 мин;  
3 - 5 мин; 4 - 10 мин; 5 - 15 мин;  
6 - 20 мин

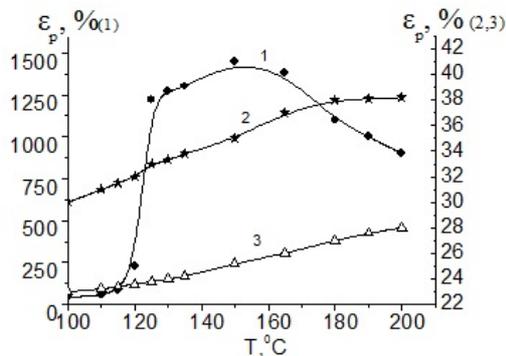
Рисунок 14 - Диаграммы растяжения ПЭТФ нити основы

Влияние температуры и времени теплового воздействия на характеристики механических свойств нитей - разрывное напряжение  $\sigma_p$ , и разрывную деформацию  $\epsilon_p$  в режиме стабилизации показано на рисунках 15,16. Разрывные напряжения ПЭ нити с повышением температуры падают, в то время как для ПЭТФ нитей практически не изменяются. Наличие максимума на зависимости  $\epsilon_p(T)$  для ПЭ нити объясняется следующим: при температурных воздействиях одновременно идут два процесса - термоусадки и термодеструкции. Увеличение термоусадки нити приводит к возрастанию  $\epsilon_p$ , в то время как процесс термодеструкции - к возникновению дефектов в структуре, которые "обрывают" процесс деформирования. Падение разрывных деформаций нити, подвергнутой температурному воздействию свыше 150 °С, подтверждает начало деструкционного процесса в полиэтилене.



1 - уточная ПЭТФ нить;  
2 - ПЭТФ нить основы;  
3 - уточная ПЭ мононить

Рисунок 15 - Зависимость разрывного напряжения от температуры



1 - уточная ПЭ мононить;  
2 - ПЭТФ нить основы;  
3 - уточная ПЭТФ нить

Рисунок 16 - Зависимость разрывной деформации от температуры

Также были прослежены изменения начального модуля упругости  $E$  от времени теплового воздействия для нитей, составляющих полотно (рисунки 17-19).

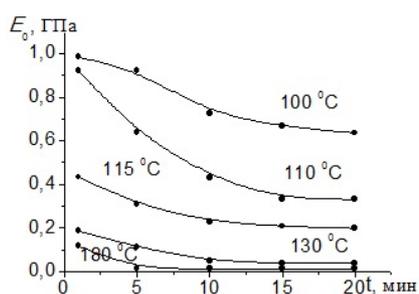


Рисунок 17 - Зависимость модуля упругости уточной ПЭ мононити от времени теплового воздействия

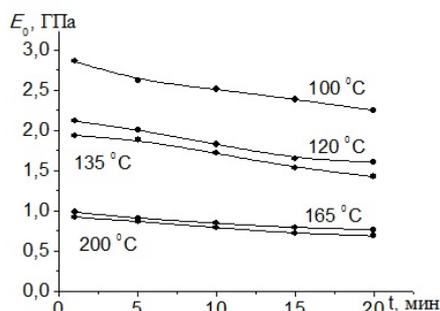


Рисунок 18 - Зависимость модуля упругости уточной комплексной ПЭТФ нити от времени теплового воздействия

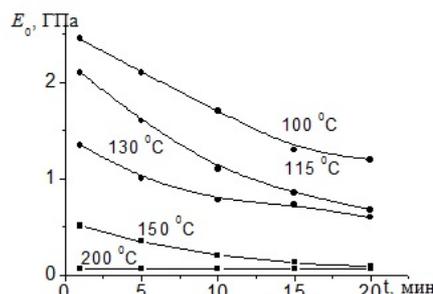


Рисунок 19 - Зависимость модуля упругости ПЭТФ нить основы от времени теплового воздействия

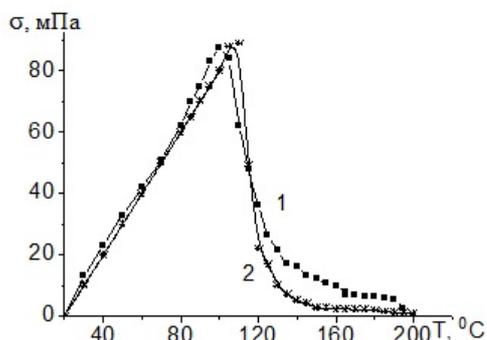
В реальных условиях эксплуатации термоусаживаемые материалы подвергаются изометрическому нагреву. Были проведены испытания ПЭ нити в этом режиме, для которого уравнение (3) будет иметь вид:

$$\Theta_p \frac{d}{dt} \varepsilon + \varepsilon \left( e^{\frac{\gamma \cdot \varepsilon_{уп}^2}{kT}} + e^{\frac{U_{13} - \gamma \varepsilon_{уп}^2}{kT}} \right) = \chi sh \left( \frac{\gamma \varepsilon_{уп}^2}{kT} \right) \quad (6)$$

Уравнение (6) было применено к двум температурным областям: 20-110 °C и 110-200 °C. После некоторых упрощений уравнение (6) приобретает вид:

$$\sigma = \begin{cases} K(T - 293), \text{ при } T : 20 - 110 \text{ } ^\circ\text{C, где } K = 10^{-3} \text{ Па / К} \\ C_1 \cdot E \sqrt{T(1 + e^{\frac{U_3}{kT}})}, \text{ при } T : 110 - 200 \text{ } ^\circ\text{C, где } C_1 = 3 \cdot 10^{-13} \text{ Па/К}^{0,5} \end{cases} \quad (7)$$

На рисунке 20 представлены экспериментальная (1) и теоретическая (2) зависимости  $\sigma(T)$  при изометрическом нагреве ПЭ нити.



1 – эксперим. зависимость;  
2 – теорет. зависимость

Рисунок 20 - Режим изометрического нагрева уточной ПЭ мононити с эффектом памяти формы

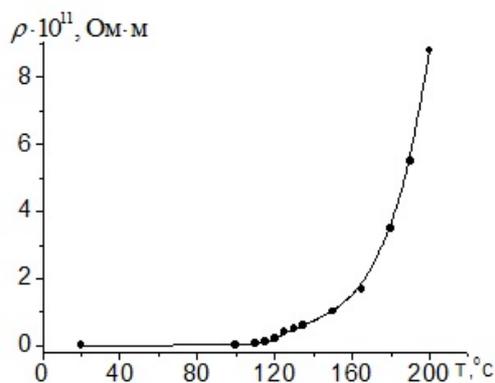


Рисунок 21 - Зависимость удельного сопротивления текстильного полотна от температуры воздействия

Так как одно из основных назначений термоусаживаемого полотна – обеспечить электроизоляцию кабеля, необходимо оценить изменение его удельного сопротивления вследствие температурного воздействия. Для исходного полотна значение удельного сопротивления составляло  $\rho_v = 1 \cdot 10^9$  Ом·м. Из зависимости  $\rho(T)$  (рисунок 21), следует, что с повышением температуры воздействия значение  $\rho$  полотна повышается, что может быть связано с уменьшением числа воздушных промежутков в структуре полотна.

**Шестая глава** посвящена изучению и моделированию свойств термоусаживаемого текстильного полимерного полотна на основе свойств составляющих его нитей. Для выбора оптимального температурного режима при эксплуатации термоусаживаемого полотна необходимо исследовать характер усадки полотна при различных температурных воздействиях. Проведены исследования поперечной  $\varepsilon_n$  и продольной  $\varepsilon_{прод}$  усадки полотна в диапазоне 100-200 °С (рисунок 22).

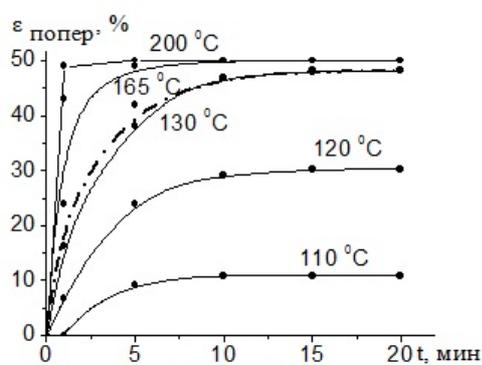
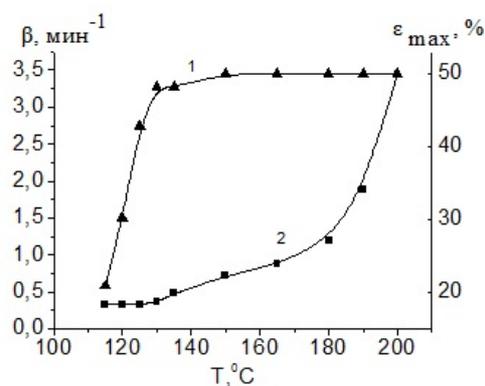


Рисунок 22 - Зависимость поперечной усадки текстильного полотна от времени теплового воздействия



1 -  $\varepsilon_{max}$ , %; 2 -  $\beta$ , мин<sup>-1</sup>  
Рисунок 23 - Зависимости  $\beta$  и  $\varepsilon_{max}$  от температуры для текстильного полотна

Показано, что усадка полотна в области 100-115 °С незначительна. Гарантированная поперечная усадка (уменьшение диаметра трубки) в 50 % достигается в области температур выше 180 °С. Показано, что максимальная  $\varepsilon_{прод}$  полотна достигает 10 %, т.е. в условиях эксплуатации необходимо учитывать изменение и продольных размеров полотна.

Построив график  $\ln(1 - \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_{max}})$  от времени  $t$  и получив линейные зависимости, определен коэффициент  $\beta = \frac{1}{\tau}$  в области 115-200 °С, представленный на рисунке 23.

На рисунке представлена также зависимость  $\varepsilon_{max}(T)$  для полотна. Предложенный подход позволяет рассчитать значение  $\varepsilon_n$  текстильного полотна при любой заданной температуре в диапазоне 115-200 °С. На рисунке 22 пунктирной линией указана теоретическая зависимость  $\varepsilon_n$  текстильного полотна при температуре 120 °С.

Моделирование свойств текстильного полотна на основе свойств составляющих его нитей было выполнено с помощью двух подходов: метод №1 и метод №2. Метод №1 основан на представлении ПЭТФ нитей основы линейными стержнями. Усадка ограничивается свободным пространством между ПЭТФ нитями основы и их

способностью сжиматься до критического значения  $b$ . Метод №2 основан на учете большего числа факторов: сил упругости при деформации полотна, свободного пространства между нитями и  $\varepsilon_{прод}$  усадки уточных нитей. С помощью метода №1

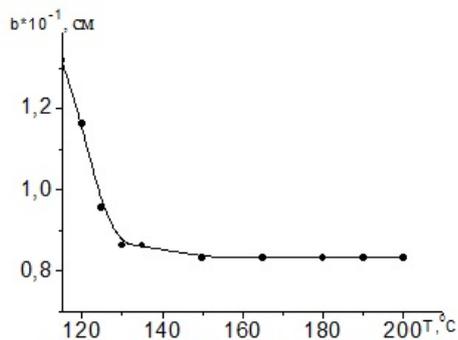


Рисунок 24 - Зависимость критической толщины  $b$  от температуры

$\varepsilon_n$  полотна в зависимости от количества нитей основы рассчитывается по формуле:  $\varepsilon_n = 1 - 6b \frac{N}{N_0}$ , где

$N$  – число нитей по основе на всю ширину исследуемого полотна,  $N_0 = 60$  – число нитей по основе в исходном полотне. Определенный экспериментально коэффициент  $b$  (рисунок 24)

позволяет рассчитать значение усадки полотна  $\varepsilon_n$  для любого количества основных ПЭТФ нитей.

Метод №2 позволяет рассчитать до осуществления процесса термоусадки ширину текстильного полотна после усадки, тем самым, осуществляя контроль за

качеством посадки полотна на объект. Расчет  $\varepsilon_n$  полотна осуществляется по формуле

$$\varepsilon_{прод} - \varepsilon_n = \frac{a' \cdot 144}{\rho_n^2} (\varepsilon_n - (1 - \frac{N \cdot 0,135}{d}))^2, \quad (8)$$

где  $\varepsilon_{прод}$  – усадка уточной ПЭ мононити с эффектом памяти формы;  $\varepsilon_n$  – прогнозируемая усадка термоусаживаемого полотна;  $N$  – число ПЭТФ нитей по основе в выбранном полотне;  $\rho_n$  – плотность уточных ПЭ мононитей, приходящегося на единицу длины,  $\text{см}^{-1}$ ,  $d$  – диаметр термоусаживаемого полотна, см. Коэффициент  $a'$  определяется из экспериментальной зависимости (рисунок 25). Формула 8 применима к текстильному полотну полотняного переплетения любого начального диаметра  $d$ , количеством основных нитей  $N$ , плотностью уточных ПЭ мононитей  $\rho_n$  и отношением количества уточных ПЭ мононитей к количеству уточных комплексных ПЭТФ нитей 1:1. На рисунке 26 приведены экспериментальная и теоретические зависимости усадки текстильного полотна по методам №1 и №2 от относительного числа  $N/N_0$  ПЭТФ нитей основы для температуры  $180^\circ\text{C}$ .

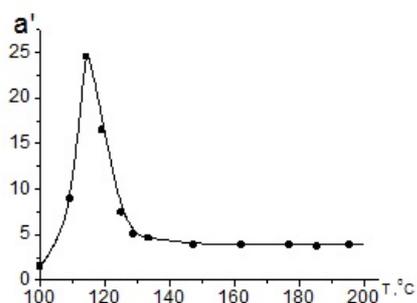
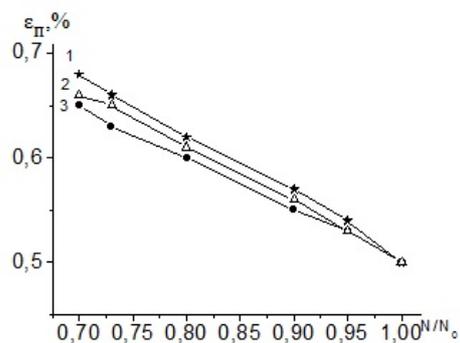


Рисунок 25 - Зависимость коэффициента  $a'$  от температуры воздействия



1 – эксперимент. зависимость;  
2 – метод №2;  
3 – метод №1

Рисунок 26 - Зависимость усадки полотна от относительного числа  $N/N_0$  нитей основы

### **Выводы:**

1. Разработаны методы исследования термомодеформационных процессов волокнистых материалов.
2. Выявлены особенности процессов термической усадки в различных температурно-временных режимах полотна и составляющих его нитей: наличие стабилизационных значений усадки; областей равномерной и неравномерной усадки; затухающего характера усадки.
3. Разработаны методы описания и прогнозирования температурной усадки нитей, составляющих текстильное полотно.
4. Предложена модель структурных переходов волокнистых материалов с эффектом памяти формы. Определены основные энергетические состояния – уточной ПЭ монокристаллы с эффектом памяти формы.
5. Предложено общее уравнение деформации, описывающее различные режимы деформирования нитей с эффектом памяти формы на основании которого разработан метод моделирования режимов свободной усадки и изометрического нагрева.
6. Установлено влияние температурных воздействий на механические и диэлектрические свойства термоусаживаемых полотна и составляющих его нитей.
7. Выявлены области температурных и временных воздействий, позволяющие находить режимы эксплуатации, обеспечивающие требуемую усадку материалов.
8. На основе экспериментальных результатов разработаны методы моделирования и прогнозирования усадки текстильного термоусаживаемого полотна на основе составляющих его компонентов.
9. Подана заявка на патент "Способ посадки термоусаживаемой трубки на кабель" №2013141772 от 11.09.2013.

**Автор выражает глубокую благодарность** за помощь при выполнении диссертационной работы сотрудникам кафедры сопротивления материалов СПГУТД; Северо-западному центру по контролю качества и сертификации лекарств; Рымкевичу Павлу Павловичу за помощь в разработке методики моделирования усадки термоусаживаемых полотен.

### **Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

#### **Статьи в рецензируемых журналах, входящих в Перечень... ВАК РФ:**

1. Рымкевич, О.В. Влияние температурных режимов на усадку модифицированной полиолефиновой монокристаллы термоусаживаемой трубки / О.В. Рымкевич, Е.С. Цобкалло // Известия вузов. Технология легкой промышленности. - 2012. - №2. - С.13-16.
2. Нестационарный теплоперенос через многослойные изделия текстильной и швейной промышленности / О.В. Рымкевич, А.Г. Макаров, А.С. Горшков, П.П. Рымкевич // Известия вузов. Технология легкой промышленности. - 2010. - №3. – т. 9. - С.44-47.
3. Рымкевич, О.В. Описание вязкоупругости полимерных материалов статистическим методом / О.В. Рымкевич, П.П. Рымкевич, А.А. Романова // Техничко-технологические проблемы сервиса. - 2013. - №1(23). - С.26-30.

#### **Статьи в научных сборниках, тезисы докладов и материалы конференций:**

4. Рымкевич, О.В. Особенности деформации полимерного материала в различных температурных режимах / О.В. Рымкевич, Е.С. Цобкалло // Сборник тезисов докладов международной научной конференции и 7-ой всероссийской олимпиады молодых ученых "Наноструктурные, волокнистые и композиционные материалы". СПб, май 2012 г. - С.69.

5. Рымкевич, О.В. Физическая модель структурных переходов в термоусаживающихся полимерных нитях / О.В. Рымкевич, Е.С. Цобкалло, П.П. Рымкевич // Материалы II Международной конференции "Тенденции и инновации современной науки". Краснодар, сентябрь 2012 г. - С.79.
6. Рымкевич, О.В. Особенности деформации термоусаживаемой модифицированной полиолефиновой нити / О.В. Рымкевич, Е.С. Цобкалло // Сборник тезисов докладов международной научной конференции и IX всероссийской олимпиады молодых ученых "Наноструктурные, волокнистые и композиционные материалы". СПб, май 2012 г. - С.75.
7. Рымкевич, О.В. Общее уравнение деформации модифицированной полиолефиновой нити с эффектом памяти формы и применение его к расчету кривой для изометрического нагрева / О.В. Рымкевич, Е.С. Цобкалло // XVI международный научно-практический семинар Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы SMARTEX-2013. Иваново, май 2013 г. - С.51-57.
8. Физико-математические основы для описания нестационарной теплопроводности через ограждающие конструкции при наличии теплопроводных включений / П.П. Рымкевич, О.В. Рымкевич, М.В. Хохлова и др. // Строительная теплофизика и энергоэффективное проектирование ограждающих конструкций зданий: сб. тр. II всероссийской научно-технической конференции: Изд-во Политехнического университета. СПб, декабрь 2009 г. - С.58-67.
9. Рымкевич, П.П. Рымкевич О.В., Горшков А.С. Математическое моделирование процессов нестационарной теплопроводности через ограждающие конструкции при наличии теплопроводных включений / П.П. Рымкевич, О.В. Рымкевич, А.С. Горшков // Строительная теплофизика и энергоэффективное проектирование ограждающих конструкций зданий: Сборник трудов II всероссийской научно-технической конференции.: Изд-во Политехнического университета. СПб, 2009 г. - С.133-137.
10. Рымкевич, О.В. Нестационарное прохождение тепла через стенки зданий при наличии нескольких механизмов теплопроводности / О.В. Рымкевич // «Инновационные процессы в сфере сервиса: проблемы и перспективы»: Сборник трудов международной научно-практической конференции СПб., октябрь 2009 г. -Т.3. С.345-348.
11. Рымкевич, О.В., Уравнение состояния термоусаживающихся полимерных трубок / О.В. Рымкевич, П.П. Рымкевич, А.А. Романова // Сборник материалов III международной научно-практической конференции «Инновационные технологии в сервисе» СПб., октябрь 2012 г. - С.371.

Подписано в печать 11.11.2013. Печать трафаретная.

Усл. печ. л. 1,0. Формат бумаги 60×84 1/16. Тираж 100 экз. Заказ № 187

Отпечатано в типографии СПГУТД, 191028, г. Санкт-Петербург, ул. Моховая, 26.