

Министерство образования Республики Беларусь  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(УО «ВГТУ»)

УДК 677.027.18  
Рег.№ 20240894

Утверждаю  
Первый проректор  
В.А.Жизневский

«31» 12 2025 г.



**ОТЧЕТ**

о научно-исследовательской работе  
ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕРМООБРАБОТКИ ПРИ  
ФОРМИРОВАНИИ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ТЕКСТИЛЬНОЙ И ЛЕГКОЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ В УСЛОВИЯХ КОМБИНИРОВАННОГО  
ЭНЕРГОПОДВОДА

**ГБ-НИР-388**  
(заключительный)

Начальник НИЧ  
Научный руководитель  
д.т.н., доц.

В.А. Сажин

Н.Н. Ясинская


ВИТЕБСК

2025

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ


Научный руководитель:

Зав. каф. ЭиХТ, д.т.н.


  
31.12.25 Н.Н. Ясинская (общее руководство, введение, разделы 1.1, 1.2, 1.3, 2.2, 2.3, заключение)

Исполнители:

Профессор, к.т.н.

  
31.12.2025 В.И. Олышанский (разделы 1.1, 1.4, 2.1, 2.3)

С.н.с.

  
31.12.2025 Н.В. Скобова (разделы 1.2, 1.3, 2.2, 2.3)

С.н.с.

  
31.12.2025 С.В. Жерносек (разделы 1.1, 1.4, 2.1, 2.3)


М.н.с.

  
31.12.2025 А.С. Марущак (разделы 1.1, 2.3)


М.н.с.

  
31.12.2025 А.Н. Бизюк (разделы 1.3, 2.3)

М.н.с.

  
31.12.2025 С.А. Рудаков (разделы 1.1, 2.3)

Нормоконтролер

  
31.12.2025 С.А. Рудаков

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	7
1 Этап 2024 года. Теоретические и экспериментальные исследования интенсификации процессов термообработки при формировании свойств материалов текстильной и легкой промышленности в условиях кондуктивно-конвективного нагрева .....	9
1.1 Теоретические и экспериментальные исследования возможности изменения структуры материала в процессе влажно-тепловой обработки для снижения внутридиффузионного сопротивления переносу влаги и увеличения влагопроводности .....	9
1.1.1 Описание объекта исследований .....	9
1.1.2 Описание опытно-экспериментальной установки .....	13
1.1.3 Принцип работы электрической схемы .....	16
1.2 Экспериментальные исследования контактного способа сушки двухслойного функционального трикотажа .....	17
1.2.1 Исследование изменения свойств двухслойных трикотажных полотен из полиэфирных нитей в процессе термообработки .....	26
1.3 Разработка рациональных структурно-технологических схем процессов термообработки материалов текстильной и легкой промышленности в условиях кондуктивно-конвективного нагрева с учетом особенностей структурного строения и распределения температуры, влагосодержания и давления в объеме материала .....	29
1.3.1 Рациональная структурно-технологическая схема термообработки двухслойных трикотажных полотен из полиэфирных нитей в условиях кондуктивно-конвективного нагрева .....	33
1.3.2 Теоретические и экспериментальные исследования способов применения поверхностно-активных веществ, ускоряющих внутренний влагоперенос .....	38
1.3.3 Применение .....	41

1.4 Разработка методов определения рациональных технологических режимов и увеличения движущей силы в процессе термообработки материалов текстильной и легкой промышленности в условиях кондуктивно-конвективного нагрева .....	51
1.5 Выводы по разделу .....	61
2 Этап 2025 года. Теоретические и экспериментальные исследования интенсификации процессов термообработки при формировании свойств материалов текстильной и легкой промышленности в условиях кондуктивно-РАДИАЦИОННОГО нагрева .....	64
2.1 Теоретические исследования интенсификации процессов термообработки при формировании свойств материалов текстильной и легкой промышленности в условиях кондуктивно-радиационного нагрева .....	64
2.1.1 Анализ существующих способов и устройств для интенсификации термообработки материалов текстильной и легкой промышленности в условиях комбинированного энергоподвода .....	64
2.1.2 Анализ механизма контактной и комбинированной сушки .....	68
2.1.3 Особенности теплообмена при радиационно-кондуктивно-конвективной сушке.....	77
2.2 Разработка рациональных структурно-технологических схем процессов термообработки материалов текстильной и легкой промышленности в условиях кондуктивно-радиационного нагрева с учетом особенностей структурного строения.....	80
2.2.1 Разработка структурно-технологической схемы конвективно-радиационной сушки.....	80
2.3 Экспериментальные исследования интенсификации процессов термообработки при формировании свойств материалов текстильной и легкой промышленности в условиях кондуктивно-радиационного нагрева. Разработка рекомендаций для выбора рациональных режимов термообработки .....	83

2.3.1 Разработка и апробация установки кондуктивно-терморadiационной сушки .....	83
2.3.2 Кинетика влаго- и теплообмена и температура в процессе кондуктивной и комбинированной сушки текстильных материалов .....	93
2.3.3 Технология шлихтования хлопчатобумажной и смесовой пряжи с применением сушки в условиях комбинированного энергоподвода .....	98
2.3.4 Формирование огнезащитных свойств суконных тканей в условиях кондуктивно-радиационного нагрева .....	122
2.4 Выводы по разделу .....	126
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	128
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	131
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	136
Приложение А. Исследование свойств поливинилацетатной дисперсии для аппретирования трикотажного полотна с последующей термообработкой .....	137
Приложение Б. Внедрение результатов исследований .....	140

## РЕФЕРАТ

Отчет 153 с., 1 кн., 56 рис., 46 табл., 45 источн., 2 прил.

### ВЛАЖНО-ТЕПЛОВАЯ ОБРАБОТКА, ИНТЕНСИФИКАЦИЯ, КОМБИНИРОВАННЫЙ ЭНЕРГОПОДВОД, СТРУКТУРА МАТЕРИАЛА, РАЦИОНАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ОБРАБОТКИ

Целью НИР является теоретико-экспериментальное обоснование и разработка методов интенсификации процессов термообработки при формировании свойств материалов текстильной и легкой промышленности в условиях комбинированного энергоподвода с использованием кондуктивно-конвективного и кондуктивно-радиационного нагрева.

В результате исследований установлены закономерности изменения структуры материала в процессе влажно-тепловой обработки для снижения внутридиффузионного сопротивления переносу влаги и увеличения влагопроводности; разработаны рациональные структурно-технологические схемы процессов термообработки материалов текстильной и легкой промышленности в условиях комбинированного энергоподвода с использованием кондуктивно-конвективного и кондуктивно-радиационного нагрева с учетом особенностей структурного строения и распределения температуры, влагосодержания и давления в объеме материала; установлены теоретические и экспериментальные закономерности влияния поверхностно-активных веществ, ускоряющих внутренний влагоперенос; разработаны методы определения рациональных технологических режимов и увеличения движущей силы в процессе термообработки материалов текстильной и легкой промышленности.

В работе использовались методы теории тепломассообмена, математического анализа, статистики и моделирования. Применение полученных результатов возможно в энергетических и технологических подразделениях промышленных предприятий, а также в учебном процессе.

## ВВЕДЕНИЕ

Стадия термической обработки является одной из наиболее ответственных и энергозатратных в общем техпроцессе формирования материалов текстильной и легкой промышленности и связана с протеканием множества взаимосвязанных явлений внутреннего и внешнего тепловлагопереноса, фазовых превращений, структурно-механических и физико-химических изменений свойств материала. Правильная организация операций термообработки позволяет сформировать комплекс потребительских, эксплуатационных, функциональных свойств готовых материалов и изделий текстильной и легкой промышленности.

Одним из инновационных путей решения вопроса по совершенствованию методов интенсификации термообработки материалов является использование комбинированного энергоподвода с использованием кондуктивно-конвективного нагрева с учетом особенностей структурного строения и распределения температуры, влагосодержания и давления в объеме материала

Комплексные исследования возможности изменения структуры материала в процессе сушки для снижения внутридиффузионного сопротивления переносу влаги и увеличения влагопроводности, рациональных структурно-технологических схем процессов термообработки материалов текстильной и легкой промышленности в условиях комбинированного энергоподвода с использованием кондуктивно-конвективного нагрева с учетом особенностей структурного строения является актуальной задачей, тесно связанной с формированием свойств материалов текстильной и легкой промышленности.

Большое внимание в работе уделяется совершенствованию методов формирования свойств текстильных структур в результате использования комбинированных способов энергоподвода, основанных на совмещении традиционных для текстильной промышленности конвективного, кондуктивного и инфракрасного метода теплового воздействия, что позволит сократить удельные материальные и энергетические затраты на производство, общую продолжительность всего технологического цикла, повысить качественные

показатели готовых материалов и изделий.

Для успешного использования инновационных энерго- и ресурсосберегающих решений в технологических схемах, внедрения высокоинтенсивного и современного оборудования и установок для влажно-тепловой обработки, сушки и термообработки в производство требуется разработка рациональных структурно-технологических схем построения процессов на основе исследования современных методов энергетического воздействия с учетом структуры, химического состава сырьевых компонентов, их физико-механических, теплофизических и технологических свойств.

# 1 ЭТАП 2024 ГОДА. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ТЕРМООБРАБОТКИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ТЕКСТИЛЬНОЙ И ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В УСЛОВИЯХ КОНДУКТИВНО-КОНВЕКТИВНОГО НАГРЕВА

1.1 Теоретические и экспериментальные исследования возможности изменения структуры материала в процессе влажно-тепловой обработки для снижения внутридиффузионного сопротивления переносу влаги и увеличения влагопроводности

## 1.1.1 Описание объекта исследований

Объектом исследований выбраны двухслойные трикотажные полотна, в одном из слоев которых использовались многофиламентные полиэфирные нити производства ОАО «СветлогорскХимволокно», во втором слое – традиционная полиэфирная нить. Получены следующие образцы:

- образец 1 с содержанием в *лицевом* слое комплексные нити 18,7 текс (f 144), имеющей в своей структуре элементарные нити с тетраканальным профилем поперечного сечения, в *изнаночном* слое – традиционная полиэфирная нити PЕС 16,7 текс (f48);
- образец 2 с содержанием в *лицевом* слое комплексной нити полой структуры 16,7 текс (f96), в *изнаночном* слое – нить (PЕС);
- образец 3 с содержанием в *лицевом* слое микрофиламентной нити 16,7 текс (f288), в *изнаночном* слое – нить PЕС (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Характеристика полотен

Показатели	Образец 1	Образец 2	Образец 3
Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	248	230	250
Толщина полотна, мм	1,14	1,12	1,11

Образцы подвергались заключительной отделке – аппретированию с целью формирования формоустойчивости, жесткости, упругости и плотно-

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Курдюмов, В. И. О влагопереносе при контактной сушке зерна // В. И. Курдюмов [и др.] // МСХ. – 2016, №1. – С. 51–53. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-vlagoperenose-pri-kontaktnoy-sushke-zerna> (дата обращения: 27.11.2024).
2. Красников, В. В. Кондуктивная сушка / В. В. Красников. Москва : Энергия, 1973. – 288 с.
3. Ковтун, Л. Г. Технология отделки трикотажа / Л. Г. Ковтун. – Москва : Легпромиздат, 1990. – 400 с.
4. Мельников, Б. Н. Физико-химические основы процессов отделочного производства : Учебное пособие для вузов / Б. Н. Мельников, Т. Д. Захарова, М. Н. Кирилова. – Москва : Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 280 с.
5. Кожурин, И. А. Оборудование трикотажно-отделочных предприятий / И. А. Кожурин. – Москва : Легкая индустрия, 1989. – 336 с.
6. Симон, Л. Отделка трикотажных изделий / Л. Симон, М. Квапиль. – Москва : Легпищемаш, 1982. – 128 с.
7. Гарцева, Л. А. Отделка трикотажных полотен : учеб. пособие / Л. А. Гарцева, В. В. Васильев, Г. В. Васильева. – Иваново : ИГТА, 2006. – 112 с.
8. Химический комплекс России. Новости – URL: <http://vestkhimprom.ru/posts/khimicheskij-kompleks-segodnya/> (дата обращения: 01.07.2024).
9. Хачатурян, К. С. Российская нефтехимия: текущее состояние и перспективы развития / К. С. Хачатурян, А. С. Абдулкадыров, Д. В. Ефимова // Инновации и инвестиции. – 2018, №8. – С.181–185.
10. Мансураева, Л. М. Поверхностно-активные вещества: свойства и применение / Л. М. Мансураева, И. И. Юсупова, С. А. Булаев // Вестник магистратуры. – 2022, №2-1 (125). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/poverhnostno-aktivnyye-veschestva-svoystva>

i-primenenie (дата обращения: 01.12.2024).

11. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – Москва : Энергия, 1968. – 472 с.
12. Акулич, П. В. Расчёты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. – Минск : Белорусская наука, 2010. – 443 с.
13. Ольшанский, А. И. Температура тонкой натуральной кожи в процессе ее сушки в наклейку на сухой гладкой поверхности = Temperature of Thin Natural Leather During Its Drying Through Pasting on a Dry Smooth Surface / А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек, А. М. Гусаров // Инженерно-физический журнал. – 2022. – Т. 95, № 1. – С. 243–249.
14. Сажин, Б. С. Научные основы техники сушки / Б. С. Сажин, В. Б. Сажин. – Москва : Наука, 1997. – 447 с.
15. Рудобашта, С. П. Теплотехника / С. П. Рудобашта. – Изд. Второе, доп. – Москва : Перо, 2015. – 672 с.
16. Васильев, В. Н. Технология сушки. Основы тепло- и массопереноса : Учебник / В. Н. Васильев, В. Е. Куцакова, С. В. Фролов – Санкт-Петербург : ГИОРД, 2013. – 222 с.
17. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – Москва : Высшая школа, 1967. – 599 с.
18. Лыков, А. В. Теоретические основы строительной теплофизики. – Минск : Изд. АН БССР, 1961. – 519 с.
19. Лыков, А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. – Москва – Ленинград : Госэнергоиздат, 1963. – 535.
20. Куц, П. С. Некоторые закономерности тепловлагообмена и приближенные методы расчета кинематики процесса сушки влажных материалов / П. С. Куц, А. И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. – 1977. – Т. 32, № 6. – С.1007-1014.
21. Рабинович, Г. Д. Новый метод расчета конвективной сушки тонких материалов / Г. Д. Рабинович // Инженер.-физ. журн. – 1966. – Т. 32, № 2. – С. 182.

22. Ольшанский, А. И. Регулярный тепловой режим и влияние критериев подобия тепломассообмена на процесс конвективной сушки пористой керамики / А. И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. – 2016. – Т. 89, № 1. – С. 37 – 48.
23. Филоненко, Г. К. Сушильные установки / Г. К. Филоненко, П. Д. Лебедев. – Москва : Энергоиздат, 1952. – 263 с.
24. Лыков, А. В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах / А. В. Лыков. – Москва : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954 г. – 296 с.
25. Ольшанский, А. И. Исследование сушки тонких материалов с использованием обобщенных комплексных переменных / А. И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. – 2016. – Т. 89, № 4. – С. 884 – 894.
26. Ольшанский, А. И. Исследование тепломассообмена в процессах тепловой обработки и сушки теплоизоляционных материалов = Investigation of Heat and Mass Transfer in the Processes of Heat Treatment and Drying of Thermal Insulation Materials / А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек, А. М. Гусаров // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2022. – № 2. – С. 156-168.
27. Ольшанский, А. И. Экспериментальное исследование кинетики сушки тонких плоских влажных материалов методом регулярного режима с использованием обобщенных комплексных переменных / А. И. Ольшанский, А. М. Гусаров // Инженер.-физ. журн. – 2017. – Т. 90, № 3. – С. 700–713.
28. Лакомкин, В. Ю. Тепломассообменное оборудование предприятий (Сушильные установки): учебное пособие / В. Ю. Лакомкин, С. Н. Смородин, Е. Н. Громова. – Санкт-Петербург: ВШТЭ СПбГУПТД. – 2016. – 142 с.
29. Жучков, П. А. Теплообмен при контактной сушке // Тепло- и массоперенос. Т. V. Тепло- и массоперенос в дисперсных системах. Процессы сушки. – Москва : Энергия, 1966. – С. 654–661.

30. Кутателадзе, С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. – Москва : Атаиздат, 1979. – 456 с.
31. Пехович А. И. Расчеты теплового режима твердых тел / А. И. Пехович, В. М. Жидких. – Ленинград :Энергия, 1968. – 304 с.
32. Колесников, П. А. Теплозащитные свойства одежды. – Москва : Легкая индустрия,1965. – 340 с.
33. Ольшанский, А. И. Исследование радиационно-конвективной сушки технических тканей критериями подобия теплообмена / А. И. Ольшанский, В. И. Ольшанский, С. В. Жерносек // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2014, № 4. – С. 56-64.
34. Ольшанский А. И. Исследование процесса конвективно-радиационной сушки технических тканей методом регулярного режима / А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек // Инженерно-физический журнал. – 2014, Т. 87, № 5. – С. 1113–1122.
35. Ольшанский, А. И., Марущак А. С. Кинетика тепловлагодпереноса и температура в процессе сушки тканей / А. И. Ольшанский, А. С. Марущак // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2021, Т. 66, № 4. – С. 449–457. – DOI: 10.29235/1561-8358-2021-66-4-449-45.
36. Лебедев, П. Д. Сушка инфракрасными лучами / П. Д Лебедев. – Москва : Госэнергоиздат, 1955. – 229 с.
37. Рудобашта, С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С. П. Рудобашта. – Москва : Химия. 1980. – 248 с.
38. Натареев, О. С. Теплоперенос в процессе конвективной сушки влажного материала / О. С. Натареев, Н. Р. Кокина, С. В. Натареев // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2015, Т. 58, № 2. – С. 67–72.
39. Лыков, А. В. Кинетика и динамика процессов сушки и увлажнения / А. В. Лыков. – Москва : Гизлегпром, 1938. – 776 с.
40. Ольшанский, А. И., Уравнение кривой сушки и продолжительность сушки влажных материалов / А. И. Ольшанский, С. В. Жерносек, А. М.

Гусаров // НАУКА и ТЕХНИКА. – 2025; № 24 (6). – С. 496-503. – DOI: <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-6-496-503>

41. Ганин, Е. А. Теплоиспользующие установки в текстильной промышленности / Е. А. Ганин. – Москва : Легпромиздат, 1989. – 392 с.
42. Козлова, Е. М. Сравнение эффективности разных шлихтующих составов / Е. М. Смирнова, Д. К. Сидоров // Известие вузов. Технология текстильной промышленности. – 2020. – №3.– С.30-35
43. Новорадовская, Т. С. Технология отделки тканей (лабораторный практикум) [Текст] : учебное пособие / Т. С. Новорадовская, Т. Д. Балашова, М. А. Куликова. – Москва : Легпромбытиздат, 1989. – 239 с.
44. Muller B, Schmidt H (2019) Impact of sizing on the mechanical performance of synthetic yarns of weaving // Textile research Journal, 2019, Vol.89(15) DOI : 10.1177/0040517518796851
45. Смирнова, С. В. Оценка эффективности ряда производных крахмала в качестве клеящего компонента шлихты / С. В. Смирнова // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. – 2014. – Т. 57, № 3. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-effektivnosti-ryada-proizvodnyh-krahmala-v-kachestve-kleyaschego-komponenta-shlihty> (дата обращения: 16.05.2025).