

АННОТАЦИЯ

диссертационной работы

Боркулаковой Жанерке Куандыккызы

на тему: «Разработка технологии использования отходов шерсти в качестве экологичных изоляционных нетканых материалов», на соискание степени доктора философии (PhD) по направлению подготовки кадров 8D072 – Производственные и обрабатывающие отрасли, Образовательной программе 8D07212 – Инновационный текстиль

Актуальность темы исследования. В условиях современного развития науки и промышленности особое значение приобретает рациональное использование природных ресурсов, снижение объемов производственных отходов и переход к принципам устойчивого и экологически ориентированного производства. Одним из малоиспользуемых видов натурального сырья является грубая овечья шерсть, которая вследствие увеличенного диаметра волокон, высокой жесткости, неоднородности структуры и пониженной прядильной способности практически не применяется в традиционном текстильном производстве. Отсутствие применения грубой шерсти в производстве приводит к тому, что данный вид сырья фактически рассматривается как побочный продукт или отход животноводства, создающий дополнительную экологическую нагрузку при его накоплении и неправильной утилизации.

Особую актуальность данная проблема приобретает для стран с развитым овцеводством, в частности для Казахстана, где значительная часть поголовья представлена курдючными грубошерстными породами, разводимыми преимущественно для получения мяса. В результате ежегодно образуются значительные объемы грубой шерсти, не находящие эффективного промышленного применения. Нерациональное использование этого возобновляемого природного ресурса приводит не только к экономическим потерям, но и к усилению экологических рисков, связанных с хранением и утилизацией органических отходов.

В то же время шерсть является природным, возобновляемым и биоразлагаемым материалом, обладающим уникальным комплексом теплофизических, механических и гигроскопических свойств. Волокнистая структура шерсти обеспечивает высокую способность к теплоизоляции, регулированию влажности и воздухопроницаемости, что делает ее перспективным сырьем для создания экологически безопасных теплоизоляционных материалов. Кроме того, способность шерсти к естественной биодеградации после окончания жизненного цикла способствует формированию замкнутых биологических циклов и соответствует современным принципам циркулярной экономики и устойчивого развития.

Анализ научных исследований показывает, что природные волокна активно изучаются как сырье для теплоизоляционных материалов. Шерсть относится к числу наиболее эффективных природных теплоизоляционных волокон. По сравнению с другими натуральными волокнами она характеризуется одним из самых низких значений теплопроводности (около

0,033 Вт/мК), что обусловлено ее сложной внутренней структурой, наличием воздушных полостей, извитостью и высокой упругостью. Вместе с тем, теплозащитные свойства волокнистых материалов определяются не только теплопроводностью самих волокон, но и структурой сформированного материала. Наибольший вклад в теплоизоляцию вносит воздух, удерживаемый в порах и межволоконном пространстве, поскольку его теплопроводность существенно ниже. Нетканые материалы на основе шерсти демонстрируют низкие значения эффективной теплопроводности, сопоставимые с синтетическими теплоизоляторами. Совокупность низкой плотности, высокой пористости и развитой извитой структуры волокон создает стабильную воздушную прослойку, в результате чего коэффициент теплопроводности шерстяных утеплителей находится в диапазоне 0,038-0,054 Вт/мК, что соответствует верхнему диапазону показателей минеральных теплоизоляционных материалов. Формирование данной пористой структуры существенно зависит от технологических параметров производства. Однако анализ литературных источников показывает, что влияние технологических параметров иглопробивания, структуры многослойных нетканых материалов и соотношения грубых и полугрубых типов волокон шерсти в сырьевой смеси на теплозащитные свойства полностью натуральных шерстяных нетканых материалов изучено недостаточно. Кроме того, в научной литературе практически отсутствуют данные об использовании шерсти казахстанских курдючных пород в качестве сырья для теплоизоляционных материалов.

Цель исследования – разработать и экспериментально обосновать технологические режимы получения экологичных многослойных нетканых материалов на основе грубой и полугрубой шерсти овец для теплоизоляционных материалов, а также выявить закономерности изменения структуры нетканых материалов и ключевых свойств в зависимости от технологических параметров.

Задачи исследования:

1. Провести системный анализ литературы и статистических данных по использованию шерсти как сырья для теплоизоляционных материалов, включая объемы ее производства в стране и мире.
2. Изучить свойства шерсти, методы изготовления многослойных нетканых материалов, а также выявить основные факторы, влияющие на теплоизоляционные характеристики.
3. Определить и подготовить исходное сырье, выбрать способ скрепления волокон для формирования нетканых материалов.
4. Разработать программу экспериментальных исследований с применением методов планирования эксперимента для изучения влияния технологических параметров на свойства материалов.
5. Изготовить многослойные иглопробивные материалы на основе грубой шерсти, варьируя частоту прокалывания, число слоев и соотношение грубой и полугрубой шерсти, для изучения формирования структуры и ее влияния на теплоизоляционные, функциональные и физико-механические свойства.

6. Установить количественные зависимости коэффициента теплоудержания, разрывной нагрузки и воздухопроницаемости многослойных нетканых материалов от технологических параметров и структурных характеристик.

7. Разработать научно обоснованные рекомендации по технологическим режимам изготовления экологичных нетканых теплоизоляционных материалов.

Объект исследования – нетканые материалы на основе грубой и полугрубой шерсти, используемые для теплоизоляции.

Предмет исследования – теплоизоляционные и физико-механические свойства многослойных иглопробивных нетканых материалов (теплоудержание, разрывная нагрузка, воздухопроницаемость) и закономерности их изменения в зависимости от технологических параметров формирования материала (частоты прокалывания, числа слоев и соотношения грубой и полугрубой шерсти).

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- разработаны и научно обоснованы технологические режимы получения экологичных теплоизоляционных иглопробивных нетканых материалов на основе грубой и полугрубой шерсти казахстанских курдючных пород овец;

- исследовано комплексное влияние частоты прокалывания, числа слоев и соотношения шерстяных волокон на формирование структуры многослойных нетканых материалов и их теплоизоляционные свойства;

- установлены закономерности изменения коэффициента теплоудержания, разрывной нагрузки и воздухопроницаемости многослойных нетканых материалов в зависимости от структурных характеристик материала и параметров технологического процесса.

Практическая значимость работы. Результаты экспериментальных исследований могут быть использованы при разработке и совершенствовании технологий производства экологичных теплоизоляционных многослойных иглопробивных нетканых материалов для строительных и технических нужд. Созданная методика прогнозирования физико-механических и теплоизоляционных свойств нетканых материалов в зависимости от структурных и технологических параметров позволит обоснованно планировать технологические режимы производства. Нетканые материалы изготовлены в производственных условиях, что демонстрирует практическую применимость разработанных режимов и рекомендаций.

Работа также способствует вовлечению в промышленный оборот грубой шерсти казахстанских курдючных овец мясо-сального направления, ранее считавшейся маловостребованным побочным продуктом животноводства, что снижает экологическую нагрузку и экономические потери за счет рационального использования ценного сырья и уменьшения объемов отходов.

Практическая значимость работы подтверждена актом внедрения результатов исследования в условиях действующего производства. Работа выполнена в рамках программно-целевого финансирования.

Методы исследования включали: анализ научных источников; метод формирования многослойных иглопробивных нетканых материалов в производственных условиях; методы экспериментального планирования; методы лабораторных испытаний по определению теплоизоляционных и физико-механических характеристик материалов; методы математической статистики и регрессионного анализа для обработки экспериментальных данных; методы компьютерной обработки и графического представления результатов.

На защиту выносятся следующие основные положения:

- результаты лабораторных исследований по установлению закономерностей изменения структуры многослойных иглопробивных нетканых материалов в зависимости от технологических параметров (частоты прокалывания, числа слоев, соотношения типов шерсти);
- результаты лабораторных исследований по определению комплексного влияния варьируемых технологических параметров на теплоизоляционные и физико-механические свойства материалов (коэффициент теплоудержания, разрывная нагрузка и воздухопроницаемость);
- технологические режимы получения экологичных теплоизоляционных нетканых материалов иглопробивным способом на основе грубой и полугрубой шерсти казахстанских курдючных пород овец.

Связь диссертационной работы с научно-грантовыми проектами. Данная работа выполнена в рамках реализации гранта по программно-целевому финансированию BR24992867 «Разработка ресурсосберегающих технологии для развития и управления водным хозяйством и перерабатывающей промышленностью Казахстана, создание инновационного инжинирингового центра», профинансированного Комитетом науки МНВО РК.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научных конференциях: Международная научная конференция №5 «Progress in Science» (Бельгия, г. Брюссель, 2024); Международная научно-техническая конференция «То‘qimachilik va yengil sanoatda ilmhajmdor innovatsion texnologiyalar va dolzarb muommlar yechimi (ТО‘QIMACHILIK VA YENGIL SANOAT – 2024)» (Узбекистан, Ферганский политехнический институт, г. Фергана, 2024).

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 6 научных работах: 1 статья в международном рецензируемом научном журнале, входящем в базу данных Scopus/Web of Science (перцентиль 80, Q1); 3 статьи в научных журналах, включенных в перечень изданий, рекомендуемых КОКНВО МНиВО РК; 2 статьи в сборниках материалов международных конференций.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения и списка использованных источников из 146 наименований, и приложений. Работа изложена на 91 странице текста, содержит 26 рисунков и 28 таблиц.

Основное содержание работы. Диссертационная работа направлена на экспериментальное исследование влияния технологических параметров формирования многослойных иглопробивных нетканых материалов на основе

маловостребованной грубой шерсти курдючных пород овец на их теплоизоляционные и физико-механические свойства.

Во введении диссертационной работы обоснована актуальность темы исследования, отражающая ее значимость для современного состояния и перспектив развития исследуемой области. Сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет исследования, что позволяет задать научное направление и очертить границы проводимой работы. Представлена научная новизна работы, заключающейся в исследовании влияния технологических параметров формирования многослойных иглопробивных нетканых материалов на их теплоизоляционные и физико-механические свойства, а также в разработке технологических режимов получения экологичных теплоизоляционных материалов на основе грубой и полугрубой шерсти. Выделены основные положения, выносимые на защиту, отражающие результаты экспериментальных исследований и практические аспекты работы.

В тексте введения представлено описание методологии и методов исследования, включающих аналитические, экспериментальные и расчетно-статистические подходы, а также обоснование их выбора с точки зрения достоверности и воспроизводимости результатов.

Подчеркнута практическая значимость работы, которая заключается в возможности применения полученных результатов при разработке и совершенствовании технологий производства экологичных теплоизоляционных нетканых материалов на основе шерстяного сырья для строительных и технических целей, а также в вовлечении грубой шерсти в промышленную переработку.

Дополнительно приведены сведения о публикациях автора, подтверждающие апробацию результатов исследования в научных изданиях и материалах конференций. Завершается введение описанием структуры и объема диссертационной работы, включая количество глав, разделов, рисунков, таблиц и приложений, что обеспечивает полное представление о логике и последовательности изложения исследования.

В первой главе представлено всестороннее исследование современного состояния научных работ, посвященных использованию шерстяного сырья и технологии получения теплоизоляционных материалов на его основе. Рассмотрены особенности строения и свойств шерстяных волокон, а также их влияние на формирование теплоизоляционных характеристик нетканых материалов.

Особое внимание уделено обобщению и систематизации результатов отечественных и зарубежных исследований в области производства иглопробивных нетканых материалов из натуральных волокон. Проведён анализ существующих технологий формирования нетканых материалов и установлено влияние их структурных параметров на теплоизоляционные и физико-механические свойства.

Проведён сравнительный анализ шерстяных и синтетических теплоизоляционных материалов, показавший преимущества натуральных

шерстяных утеплителей по экологичности, гигроскопичности и способности к регуляции тепло- и влагообмена.

На основе анализа научных и практических данных обоснована необходимость исследования влияния технологических параметров (частоты прокалывания, числа слоев и соотношения грубой и полугрубой шерсти) на формирование структуры и свойства многослойных нетканых материалов. Сформулированы основные направления исследования, включающие экспериментальное изучение закономерностей формирования структуры и свойств шерстяных нетканых материалов и оценку их теплоизоляционных характеристик.

Выводы по главе 1

1. Проведенный анализ современного состояния использования шерстяного сырья показал, что овечья шерсть является возобновляемым природным ресурсом, обладающим значительным потенциалом для производства экологичных теплоизоляционных материалов. В то же время значительные объемы грубой шерсти, образующейся при разведении овец мясо-сального направления, используется недостаточно эффективно, что обуславливает необходимость разработки новых направлений ее переработки.

2. Анализ литературных источников показывает, что морфологические особенности и свойства шерстяных волокон обеспечивают высокую способность к теплоизоляции, регулированию влажности и воздухопроницаемости, что делает ее перспективным сырьем для создания экологически безопасных теплоизоляционных материалов. Кроме того, способность шерсти к естественной биodeградации после окончания жизненного цикла способствует формированию замкнутых биологических циклов и соответствует современным принципам циркулярной экономики и устойчивого развития.

3. Анализ технологий производства нетканых материалов показал, что для формирования теплоизоляционных материалов из шерсти широко применяются механические методы скрепления волокон, прежде всего иглопробивной способ. Данная технология обеспечивает формирование прочной пространственной структуры полотна за счет механического перепутывания волокон и позволяет получать материалы из натуральной шерсти без применения химических связующих.

4. Исследование существующих теплоизоляционных материалов на основе шерсти показало, что на рынке представлены различные формы изделий, включая рулонные материалы, маты (плиты) и задувную изоляцию. Наиболее широкое распространение получили рулонные и плитные материалы, что обусловлено удобством монтажа, практичностью применения и возможностью использования в различных ограждающих конструкциях зданий.

5. Сравнительный анализ шерстяных и синтетических теплоизоляционных материалов показал, что утеплители на основе шерсти обладают рядом конкурентных преимуществ, включая экологичность, возобновляемость сырья, способность регулировать влажностный режим и безопасность при эксплуатации.

6. Анализ факторов, определяющих теплоизоляционные свойства нетканых материалов, показал, что основное влияние на теплопроводность оказывают структурные характеристики материала, включая плотность, толщину, пористость и характер распределения волокон. При этом формирование структуры волокнистого полотна в значительной степени определяется параметрами технологического процесса.

7. Несмотря на значительное количество исследований, посвященных теплоизоляционным материалам из волокнистого сырья, в научной литературе недостаточно изучено комплексное влияние технологических параметров иглопробивного процесса, структуры многослойных материалов и содержания грубой шерсти на теплоизоляционные и эксплуатационные свойства нетканых материалов. Кроме того, ограничено количество исследований, посвященных использованию грубой шерсти казахстанских пород овец для получения теплоизоляционных материалов.

Во второй главе диссертационной работы представлено описание исходного сырья, применяемого оборудования и технологической схемы формирования многослойных иглопробивных нетканых материалов на основе грубой и полугрубой овечьей шерсти. Подробно описана технологическая последовательность получения нетканых материалов, включающая этапы подготовки волокон, формирования волокнистого холста и его механического скрепления методом иглопробивания, реализованная в производственных условиях. Описаны параметры изготовления двух-, трех- и четырехслойных нетканых материалов с различным содержанием грубой шерсти по двухстадийной технологии иглопробивания (предварительное и основное иглопробивание) с варьированием частоты прокалывания игл на основной стадии, обеспечивающие возможность исследования влияния числа слоев, частоты иглопробивания и волокнистого состава на структурные, теплоизоляционные и физико-механические свойства материалов.

Представлены методы экспериментального исследования, включающие определение толщины, поверхностной плотности, коэффициента теплоудержания, воздухопроницаемости и разрывной нагрузки в соответствии с нормативными методиками. Для анализа структурных особенностей шерстяных волокон и сформированных нетканых материалов использованы методы оптической микроскопии и сканирующей электронной микроскопии.

Также описаны методы статистической обработки экспериментальных данных и математического моделирования, включая применение метода отклика поверхности (RSM) для оценки влияния технологических параметров на свойства материалов.

Выводы по главе 2

1. В качестве объектов исследования были выбраны многослойные иглопробивные нетканые материалы на основе грубой и полугрубой овечьей шерсти, предварительно подвергнутой стандартной первичной обработке.

2. В работе применена технологическая схема формирования шерстяных нетканых материалов, основанная на последовательных стадиях подготовки волокон, формирования волокнистого холста и его механического скрепления

методом иглопробивания, реализованная в производственных условиях. Процесс иглопробивания осуществлялся в два этапа, предварительный и основной, с варьированием частоты прокалывания игл на этапе основной обработки, что позволило сформировать серию экспериментальных образцов с различными структурными характеристиками.

3. Были изготовлены двух-, трех- и четырехслойные нетканые материалы с различной частотой прокалывания и массовой долей грубой шерсти, что обеспечило возможность исследования влияния количества слоев, частоты прокалывания и содержания грубой шерсти на свойства материалов.

4. Для характеристики структуры и свойств полученных нетканых материалов были обоснованы и применены методы измерения толщины и поверхностной плотности, определения теплоудерживающих свойств, воздухопроницаемости и разрывной нагрузки в соответствии с международными стандартами.

5. Для анализа морфологических особенностей шерстяных волокон и структуры сформированных нетканых материалов использованы методы оптической микроскопии и СЭМ.

6. Для обработки экспериментальных данных и анализа влияния технологических параметров на свойства нетканых материалов применялись методы статистического анализа и математического моделирования, включая метод отклика поверхности (RSM).

В третьей главе представлены результаты комплексных экспериментальных исследований физико-механических и функциональных свойств многослойных иглопробивных нетканых материалов на основе грубой и полугрубой овечьей шерсти. Основное внимание уделено анализу влияния технологических параметров формирования структуры материала, включая число слоев, содержание грубой шерсти и частоту иглопробивания, на теплоизоляционные и эксплуатационные характеристики.

Рассмотрены особенности изменения структуры нетканых материалов при варьировании числа слоев, а также их влияние на толщину, поверхностную плотность, прочностные характеристики и воздухопроницаемость. Проведён анализ зависимости формирования объемной волокнистой структуры от технологических режимов иглопробивания и состава шерстяной смеси.

Особое внимание уделено установлению закономерностей изменения разрывной нагрузки в продольном и поперечном направлениях, а также оценке воздухопроницаемости как важного показателя, характеризующего теплоизоляционные свойства материалов. Проведена статистическая обработка экспериментальных данных, позволившая выявить значимость влияния отдельных факторов и их вклад в формирование свойств материалов.

Полученные результаты позволяют установить основные закономерности формирования структуры и свойств многослойных шерстяных нетканых материалов и обосновать роль структурных параметров как ключевого фактора, определяющего их эксплуатационные характеристики. На основе проведённых исследований сформулированы практические выводы и рекомендации по

регулированию свойств материалов за счёт изменения числа слоев и параметров иглопробивания.

Выводы по главе 3

1. Проведен анализ влияния числа слоев, содержания грубой шерсти и частоты иглопробивания на физико-механические и функциональные свойства нетканых шерстяных материалов, включая толщину, поверхностную плотность, разрывную нагрузку и воздухопроницаемость.

2. Установлено, что увеличение числа слоев материала приводит к закономерному росту толщины и поверхностной плотности образцов за счет формирования более объемной волокнистой структуры и увеличения массы материала в полотне.

3. Результаты испытаний на разрывную нагрузку показали, что число слоев оказывает статистически значимое влияние на прочностные характеристики материала как в поперечном, так и в продольном направлениях ($P < 0,001$), при этом максимальные значения разрывной нагрузки достигались у четырехслойных образцов (393-481 Н поперек, 390-446 Н вдоль). Содержание грубой шерсти и частота иглопробивания в исследуемых пределах не приводят к статистически значимым изменениям прочности, что указывает на второстепенное влияние этих факторов.

4. Исследование воздухопроницаемости показало, что основным фактором влияющим на показатель является число слоев и, соответственно, толщина материала ($F = 78,65$; $P < 0,001$). Увеличение числа слоев приводит к снижению воздухопроницаемости за счет повышения плотности и связности волоконного полотна. Изменения соотношения грубой и полугрубой шерсти и частоты иглопробивания в рассматриваемых пределах статистически значимого эффекта на воздухопроницаемость не оказывают.

5. Ключевым параметром, определяющим механические и барьерные свойства нетканых шерстяных материалов, является структура полотна, формируемая количеством слоев. Волокнистый состав и технологические параметры иглопробивания в исследуемых диапазонах оказывают второстепенное влияние.

В четвертой главе диссертационной работы представлены результаты экспериментальных и расчетно-аналитических исследований теплоизоляционных свойств многослойных иглопробивных нетканых материалов на основе грубой и полугрубой овечьей шерсти. Основное внимание уделено изучению влияния технологических параметров формирования структуры материалов, включая содержание грубой шерсти, частоту иглопробивания и количество слоев, на коэффициент теплоудержания.

В работе рассмотрены особенности математического моделирования теплоизоляционных свойств нетканых материалов с использованием метода отклика поверхности (RSM). Представлена полиномиальная регрессионная модель, описывающая зависимость коэффициента теплоудержания от исследуемых факторов, а также приведены результаты её статистической оценки с применением дисперсионного анализа (ANOVA).

Подробно рассмотрено влияние каждого из факторов на формирование теплоизоляционных характеристик материалов. Особое внимание уделено анализу структурных особенностей многослойных нетканых материалов, определяющих их способность к удержанию тепла, а также взаимодействию технологических параметров в процессе формирования волокнистой структуры.

Дополнительно приведены результаты анализа взаимодействия факторов, включающие совместное влияние частоты иглопробивания и количества слоев, а также трехфакторные взаимодействия, отражающие сложный характер формирования теплоизоляционных свойств шерстяных нетканых материалов.

Завершающим элементом главы является укрупненная технико-экономическая оценка разработанной технологии получения нетканых материалов, учитывающая расход сырья и технологические параметры процесса.

Выводы по главе 4

1. Проведена комплексная оценка влияния содержания грубой овечьей шерсти, частоты иглопробивания и количества слоев на теплоудерживающие свойства сформированных нетканых материалов. Для количественной оценки применялось математическое моделирование на основе полного факторного эксперимента с использованием метода отклика поверхности (RSM). На основании экспериментальных данных разработана полиномиальная регрессионная модель, описывающая зависимость коэффициента теплоудержания от исследуемых факторов. Модель признана адекватной и статистически значимой на основе дисперсионного анализа (ANOVA) и анализа остаточной дисперсии.

2. Анализ показал, что все основные факторы (содержание грубой шерсти, частота иглопробивания и количество слоев) оказывают статистически значимое влияние на теплоудержание ($P < 0,001$), при этом количество слоев является доминирующим фактором, обеспечивая наиболее существенный рост теплоизоляционных характеристик за счет увеличения толщины материала и снижения конвективного переноса тепла.

3. Частота иглопробивания оказывает дополнительное положительное влияние, формируя более плотную и равномерную волокнистую структуру, ограничивающую движение воздуха внутри полотна. Влияние содержания грубой шерсти менее выражено и проявляется преимущественно через сочетание с другими факторами, что подтверждает сложный характер формирования теплоизоляционных свойств материала.

4. Выявлены значимые коэффициенты взаимодействия между частотой иглопробивания и количеством слоев, а также трехфакторное взаимодействие всех исследуемых факторов, что указывает на необходимость учета совокупного влияния технологических параметров при оптимизации процесса формирования нетканого материала.

5. Структура материала, определяемая количеством слоев и плотностью иглопробивания, является ключевым фактором формирования теплоудерживающих свойств нетканых шерстяных материалов, тогда как

содержание грубой шерсти играет второстепенную, но комплексно учитываемую роль. Это связано с тем, что в исследованных образцах использовалась грубая и полугрубая шерсть овец, характеризующаяся близким химико-физическим составом.

6. Согласно укрупненной технико-экономической оценке технологии установлено, что ресурсоемкость процесса составляет 1200-1300 тг/м² и варьируется в зависимости от состава сырьевой смеси. Технологический процесс характеризуется экономической целесообразностью.

Заключение

В диссертационной работе выполнено исследование по разработке и экспериментальному обоснованию технологических режимов получения экологичных многослойных нетканых материалов на основе грубой и полугрубой шерсти овец для теплоизоляционных целей, а также по выявлению закономерностей изменения структуры нетканых материалов и ключевых свойств в зависимости от технологических параметров.

На основании проведенных исследований сформулированы следующие основные выводы:

1. Проведен системный анализ методов изготовления многослойных нетканых материалов и свойств шерсти, выявлены ключевые факторы, влияющие на теплоизоляционные характеристики изоляционных материалов. Разработана программа экспериментальных исследований с применением методов планирования эксперимента. В качестве факторов выбраны содержание грубой шерсти, частота иглопробивания и количество слоев.

2. Изготовлены многослойные иглопробивные нетканые материалы на основе грубой и полугрубой шерсти в производственных условиях. Экспериментально изучено влияние выбранных факторов на свойства материалов. В экспериментах варьировалось число слоев (2-4), частота прокалывания (500-600 уд/мин) и соотношение грубой и полугрубой шерсти (40-60% грубой).

3. Установлено статистически значимое влияние количества слоев на прочность и воздухопроницаемость материалов. Увеличение числа слоев с 2 до 4 приводило к росту толщины материала с 5,38 мм до 9,98 мм, поверхностной плотности с 658,5 г/м² до 1518,8 г/м² и разрывной нагрузки с 104 Н до 481 Н, а также к снижению воздухопроницаемости с 2113,6 дм³/(м²с) до 819,8 дм³/(м²с), что объясняется повышением плотности и связности волокнистого полотна. Определено второстепенное влияние содержания грубой и полугрубой шерсти и частоты иглопробивания на прочностные свойства и воздухопроницаемость, статистически значимого эффекта в рассматриваемых пределах не выявлено.

4. Проведена оценка теплоудерживающих свойств материалов с использованием метода отклика поверхности (RSM). Установлено, что наибольший вклад в теплоизоляцию вносит количество слоев, которое приводит к значительному росту теплоудержания при любом исследуемом составе волокнистой смеси: увеличение количества слоев с 2 до 4 приводит к

росту коэффициента теплоудержания на 44,5% для образцов с содержанием грубой шерсти 40% и на 33,6% для образцов с содержанием грубой шерсти 60%. Частота иглопробивания оказывает дополнительное положительное влияние. Это связано с увеличением толщины материала и формированием более плотной волокнистой структуры, что снижает конвективный перенос тепла внутри волокнистой структуры. Влияние соотношения грубой и полугрубой шерсти проявлялось преимущественно в сочетании с другими параметрами и не являлось статистически значимым самостоятельно, что объясняется близким химико-физическим составом используемых волокон.

5. Разработана полиномиальная регрессионная модель зависимости коэффициента теплоудержания от содержания грубой шерсти, частоты иглопробивания и числа слоев, которая прошла проверку на адекватность и статистическую значимость (ANOVA). Модель позволяет прогнозировать теплоизоляционные свойства материала в заданном диапазоне технологических параметров.

6. Разработаны научно обоснованные рекомендации по технологическим режимам изготовления экологичных многослойных нетканых теплоизоляционных материалов на основе грубой и полугрубой шерсти казахстанских курдючных овец. Рекомендации основаны на экспериментально выявленных закономерностях влияния числа слоев, частоты иглопробивания и соотношения шерсти на теплоудержание, прочность и воздухопроницаемость. Материалы могут изготавливаться в виде рулонов или матов с регулируемой толщиной, плотностью и количеством слоев, что позволяет использовать их для теплоизоляции в строительстве и технических целях. Технология изготовления нетканых материалов состояла из двух этапов: предварительное формирование отдельных слоев при частоте прокалывания 500 уд/мин и последующее объединение слоев при 600 уд/мин, при которой были достигнуты оптимальные показатели теплоудержания, прочности и воздухопроницаемости, что обеспечивало формирование стабильной волокнистой структуры. Материалы были изготовлены в виде рулонов, с расположением слоев из полугрубой шерсти в нижних и верхних слоях, слоев из грубой шерсти во внутреннем слое.

Оценка полноты решения задач исследования. Задачи, поставленные в диссертационной работе, решены в полном объеме на основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований. Были систематизированы данные по шерсти как сырью, изучены свойства волокон и методы формирования многослойных нетканых материалов, проведены экспериментальные исследования, выявлены количественные закономерности влияния технологических параметров на ключевые свойства, а также разработаны рекомендации по технологическим режимам изготовления экологичных теплоизоляционных материалов. Экспериментально установленные закономерности влияния числа слоев, частоты иглопробивания и соотношения грубой и полугрубой шерсти на теплоудержание, прочность и воздухопроницаемость, а также разработанные на их основе технологические режимы позволяют совершенствовать технологию изготовления экологичных многослойных нетканых теплоизоляционных материалов из шерсти.

Разработка рекомендаций и исходных данных по конкретному использованию результатов. Результаты исследования рекомендуются к использованию при разработке и совершенствовании технологий производства экологичных многослойных иглопробивных теплоизоляционных материалов из шерсти для строительных и технических нужд.

Оценка технико-экономической эффективности внедрения. Использование предложенных технологических режимов позволит получать многослойные теплоизоляционные материалы с регулируемой толщиной, плотностью и количеством слоев, высокой теплоизоляционной эффективностью и механической прочностью. Внедрение технологии способствует вовлечению в промышленный оборот грубой шерсти казахстанских курдючных овец мясо-сального направления, ранее считавшейся маловостребованным побочным продуктом животноводства, способствует снижению экологической нагрузки и экономических потерь за счет рационального использования ценного сырья и уменьшения объемов отходов.

Оценка научного уровня выполненной работы. Исследовано комплексное влияние частоты прокалывания, числа слоев и соотношения шерстяных волокон на формирование структуры многослойных иглопробивных нетканых материалов, а также установлены закономерности изменения коэффициента теплоудержания, разрывной нагрузки и воздухопроницаемости в зависимости от вышеперечисленных параметров. Данный результат представляет новый научный вклад в область шерстяных теплоизоляционных материалов. Ценность работы заключается в подходе к формированию многослойной структуры, учете взаимодействия технологических факторов и применении казахстанской грубой шерсти, которая в настоящее время практически не используется и считается побочным продуктом животноводства.

По теме диссертационного исследования имеются следующие публикации:

1. Borkulakova Zh.K., Mels M.D., Shardarbek M.Sh., Bitus E.I., Sarybayeva E.E. Study on the strength of needle-punched nonwoven material made on the basis of sole trader “Miras” //The Journal of Almaty Technological University. – 2023. – Vol. (4). – P. 36-43. <https://doi.org/10.48184/2304-568X-2023-4-36-43>

2. Borkulakova Zh.K., Shardarbek M.Sh., Junisbekov M.Sh., Kuandykuly M. Specifics for manufacturing insulating needle-punched nonwoven materials from coarse wool //Proceedings of the 5th International Scientific Conference «Progress in Science» (February 22-23, 2024). – Brussels, Belgium, 2024. – P. 45-49.

3. Шардарбек М.Ш., Боркулакова Ж.К., Абзалбекулы Б., Кауымбаев Р.Т., Ташмухамедов Ф.Р., Сарыбаева Э.Е., Ораз Г.Т., Мажиханова Б.К. Анализ производства и свойства нетканых материалов: мировые тенденции и развитие в Казахстане //Механика и технологии. – 2024. – №3(85). – С.399-405. <https://doi.org/10.55956/FUMY4911>

4. Боркулакова Ж.К., Шардарбек М.Ш., Илхамова М.У. Особенности шерстяного волокна в качестве экологического нетканого изоляционного

материала //Материалы международной научно-технической конференции «То‘qimachilik va yengil sanoatda ilmhajmdor innovatsion texnologiyalar va dolzarb muommolar yechimi (TO‘QIMACHILIK VA YENGIL SANOAT – 2024)» Том 1. – Фергана: Ферганский политехнический институт, 2024. – 74-78 с.

5. Borkulakova Z., Shardarbek M., Ikhamova M., Orynbayev S., Abzalbekuly B., Sarybayeva E., Tashmukhamedov F., Kauymbaev R., Oraz G. Optimization of Warmth Retention in Nonwoven Materials Made from Coarse and Semi-Coarse Sheep Wool //Journal of Natural Fibers. – 2025. – Vol. 22(1). – P. 2578612. <https://doi.org/10.1080/15440478.2025.2578612>

6. Тулендиева Г.О., Шардарбек М.Ш., Гафуров Ж.К., Боркулакова Ж.К. Игерілмеген жүнді беймата материалдарына өңдеудің заманауи технологияларына шолу //Механика және технологиялар. – 2025. – №4(90). – Б. 252-259. <https://doi.org/10.55956/LRQJ3606>