МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ Учреждение образования

«Витебский государственный технологический университет»

Н.Н. Ясинская, В.И. Ольшанский, А.Г. Коган

Share och market och m ТЕРМООБРАБОТКА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЭНН . АТЕРИА. Монография композиционных текстильных МАТЕРИАЛОВ

ВИТЕБСК 2019

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автомобильные дороги, основания и фундаменты» ФГБО УВО «Тверской государственный технический университет» Гультяев В.И.; доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой текстильных технологий ФГБО УВО «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)» Плеханов А.Ф.

Рекомендовано к изданию Советом УО «ВГТУ», протокол № 3 от 26.11.2019.

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ», протокол № 9 от 27.11.2019.

Ясинская, Н. Н.

Я81 Термообработка при формировании композиционных текстильных материалов : монография / Н. Н. Ясинская, В. И. Ольшанский, А. Г. Коган. – Витебск : УО «ВГТУ», 2019. – 162 с. ISBN 978-985-481-632-6

В монографии изложены результаты исследований, направленных на разработку и проектирование капиллярно-пористой структуры текстильных материалов, на изучение кинетики сушки и термообработки композиционных текстильных материалов, полученных клеевым способом и способом пропитки текстильных полотен водными дисперсиями полимерных связующих. Приводятся результаты экспериментальных и теоретических исследований возможных способов интенсификации технологических процессов сушки и термообработки, которые базируются на применении нетрадиционных видов энергоносителей, в частности, электромагнитных волн сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона.

УДК 677.027.18 ББК 37.23

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	
1 Общие сведения о текстильных композиционны	
материалах и способах их формирования	
1.1 Текстильные композиционные материалы, структур	
классификация	
1.2 Способы формирования текстильных композиционни	
материалов	
1.2.1 Формирование текстильных каркасных композиционни	
материалов	
1.2.2 Формирование слоистых текстильных композиционни	
материалов	
2 Капиллярно-пористая структура текстильных материалов	
композиционных материалов	
2.1 Имитационное моделирование пористой структур	
текстильной нити	
2.1.1 Исследование диаметра текстильных нитей, используеми	
для формирования текстильных композиционных материалов	
2.1.2 Расчет диаметра волокон (филаментов)	
2.2 Имитационное моделирование капиллярно-порист	
структуры тканей	
2.3 Экспериментальное исследование капиллярно-порист	ой
структуры текстильных материалов	
3 Сушка и термообработка при формировании текстильн	LIV
композиционных материалов	
композиционных материалов	
материалов	. .
3.2 Исследование кинетики нагрева слоистых текстильні	ЫΧ
композиционных материалов	
3.3 Методика расчета продолжительности сушки слоисти	ЫΧ
текстильных композиционных материалов	
3.4 Исследование сушки и термообработки текстильні	\ F.
каркасных композиционных материалов, полученных способо	
пропитки тканого полотна полимерным связующим	
3.4.1 Исследование зависимости скорости сушки текстильно	
каркасного композиционного материала от концентрац	
полимерного связующего	
3.4.2 Исследование процесса термофиксации текстильно	
каркасного композиционного материала	•••
3.4.3 Методика расчета продолжительности сушки	И
термообработки текстильных каркасных композиционні	ЫΧ
материалов	

атериалов в эл СВЧ)	ектромагнит		верхвысокой	и частоты	108
2 Исследование язующего в объе					113
3 Исследование					113
ррмировании ко	_			_	
ловиях СВЧ-наг					119
4 Исследование	влияния	СВЧ-обрабо	отки на	свойства	
кстильных комп	озиционных	материалов	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	127
итература		• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •		• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	132
РИЛОЖЕНИЕ .	A		• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	143
		материалов	ONAL CO.		
				14 XH4BO	000

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа является продолжением научного направления, связанного с теоретическим обоснованием и разработкой способов композиционных текстильных материалов. формирования настоящему времени учеными учреждения образования «Витебский государственный технологический университет» разработаны инновационные технологии получения текстильных композитов, в том числе многослойных материалов технического назначения. Однако для их реализации и формирования новых текстильных композитов с заданными свойствами требуется подбор большого технологических параметров. Внешний вид и качественные показатели готового продукта во многом зависят от правильности организации заключительных операций формирования структуры – сушки и термообработки.

Сушка и термообработка _ весьма продолжительные энергоемкие операции. Продолжительность и температура процессов должны строго соблюдаться во избежание высокой влажности готового материала или чрезмерной пересушки, нежелательного растрескивания, волокнистого компонента ИЛИ подплавления разрушения Текстильные действию материалы чувствительны высоких температур, при которых возможно протекание термодеструкционных процессов и разрушение волокнообразующего полимера. Внешним проявлением этих процессов являются усадка, повышенная жесткость и блеск, изменение окраски, нарушение структуры, расслаивание.

В настоящее время основными способами сушки и термообработки текстильных материалов являются конвективный, радиационный контактный и комбинированный. Наиболее простым и распространенным является конвективный способ, что объясняется простотой и дешевизной используемого оборудования. Использование контактного способа при формировании композиционных материалов ограничивается их толщиной, природой волокон и полимерных связующих. В случае материалов, имеющих значительную толщину, необходимо увеличивать время контакта поверхностного слоя с нагреваемой поверхностью, что приводит к ухудшению качества готовых материалов. При выборе способа и рациональных режимов сушки и термообработки необходимо учитывать свойства и структуру текстильного композита.

монографии даны общие сведения 0 композиционных текстильных материалах, способах их формирования, представлены теоретических И экспериментальных исследований капиллярно-пористой структуры, сушки и термообработки, в том числе интенсификации электромагнитным условиях излучением сверхвысокочастотного диапазона.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОМПОЗИЦИОННЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ И СПОСОБАХ ИХ ФОРМИРОВАНИЯ

В настоящее время научно-технический прогресс практически немыслим без развития производства композиционных материалов, в том числе с заданными функциональными свойствами, использование которых постоянно расширяется в различных отраслях народного хозяйства. Композиты являются основой создания разнообразных изделий бытового и технического назначения. Сочетая в одном материале компоненты разной природы, формы и размеров и регулируя их содержание, можно получать неограниченное количество композиционных материалов и в очень широких пределах изменять их свойства, а также придавать новые. Комплекс свойств композиционных материалов определяется свойствами компонентов их микромакроструктурой, границей раздела фаз, реакцией этих структур на внешние воздействия [1].

Производство композиционных материалов и изделий из них в мире растет на 5–8 % в год. Основными производителями являются Китай, США, ЕС и страны Юго-Восточной Азии. Возрастает спрос на композиты в различных отраслях экономики Республики Беларусь, однако объемы производства очень малы. По данным ЈЕС [2] объем мирового рынка композиционных материалов составляет €80–90 млрд и 10–12 млн тонн в год. Наиболее значимыми областями использования являются строительство, электроника и энергетика, а также транспортное машиностроение (рис. 1.1).

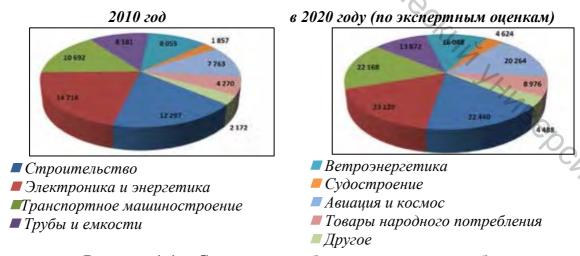


Рисунок 1.1 – Структура и объем мирового потребления полимерных композиционных материалов и изделий из них (в стоимостном выражении)

За относительно короткое время композиционные материалы превратились из материалов исключительно стратегического, военного назначения в материалы широкого применения, использующиеся практически во всех отраслях промышленности и народного хозяйства.

Классификация композиционных материалов осуществляется по нескольким существенным критериям: по происхождению, назначению, типу материала матрицы, природе компонентов, размеру фазовых включений, признакам структуры, методам получения.

В настоящее время наибольшее распространение получили полимерные композиционные материалы, армированные волокнистым наполнителем, применение которых дает существенные преимущества по технологичности, снижению материалоемкости и стоимости изделий, улучшению их эксплуатационных характеристик, повышению надежности.

Причиной создания полимерных композиционных материалов явилась необходимость создания материалов с комплексом новых свойств, решения экономических, экологических проблем, возникающих в процессе развитий науки и техники [3].

Одними из недостатков волокнистых полимерных композиционных материалов и изделий из них является высокая стоимость, связанная с многостадийностью и сложностью технологического процесса формирования, необходимостью применения специального дорогостоящего оборудования и сырья, высокой энергоемкостью процесса формирования.

В ассортименте композиционных материалов в отдельную группу можно выделить те, в которых в качестве армирующей основы используются текстильные элементы — волокна, нити и пряжа, ткани, трикотаж и нетканые материалы [4, 5].

«композиционный материал», который чаще всего в полимерной химии, металловедении, строительстве, встречается машиностроении некоторых других областях, обозначается И следующим определением [1]: композиционный материал – это материал, состоящий их двух или более компонентов, которые отличаются по своей природе или химическому составу, компоненты объединены в единую монолитную структуру с границей между структурными составляющими (компонентами), раздела оптимальное сочетание которых позволяет получить комплекс физикохимических и механических свойств, отличающихся от комплекса свойств компонентов. Компонент, непрерывный в объеме композита, называют матрицей или связующим. Другие, например упрочняющие армирующие компоненты, распределены в определенном порядке. Переходные поверхностные слои расположены на границах раздела матрицы и других компонентов [6, 7].

Специалистами текстильной и легкой промышленности используется другое определение термина «композиционный материал». В частности, в работе Л.А. Липатовой выполнены следующие уточнения и пояснения [9, 10, 11]:

- термин «композиционный», как наиболее часто применимый, использовать в качестве основного для многослойных текстильных материалов, полученных по клеевой технологии;
- применительно к многослойным текстильным материалам предлагается следующая трактовка понятия: «Композиционные текстильные материалы» это материалы, состоящие из двух и более однородных и/или разнородных слоев, соединенных в единую структуру полимерным связующим жидким или твердым, и/или полимерные композиции на текстильной основе образуют пленочные или мембранные покрытия» [10].
- В. Е. Кузьмичевым предложено различать термины «композиционный материал» и «слоистый материал», полученный клеевым способом соединения слоев, в зависимости от соотношения полимерного связующего адгезива (а) и текстильного материала субстрата (с) [11]:
- композиционные материалы (a:c=1) материалы на текстильной основе с заданным распределением в них или на поверхности полимерного связующего. По прочности, жесткости и другим свойствам текстильные композиты превосходят исходный текстильный материал. Такой материал может быть получен либо путем полного погружения в полимерное связующее, либо путем контактного смачивания при одностороннем воздействии полимерного связующего на текстильный материал;
- слоистые материалы (a:c<1) неразъемное или разъемное клеевое соединение двух или более текстильных полотен.

Специалистами Казанского технологического университета предложено называть многослойные материалы, состоящие из полотен, соединенных ниточным или сварным способом — комплексные материалы. Материалы, полученные клеевым способом соединения слоев и имеющие промежуточный клеевой слой, называют дублированными или композиционными текстильными материалами [12].

Существующая терминология относится к швейным материалам и изделиям и не учитывает особенностей многофункциональных текстильных композиционных материалов, в частности декоративноотделочного назначения.

Панин М.И. в своей работе [13] называет «текстильный композиционный материал» – композиционный материал, полученный на базе текстильных технологий.

Среди всего многообразия композиционных материалов с использованием текстильных компонентов — волокон, нитей, тканей, трикотажных полотен, нетканых материалов широкое применение нашли слоистые текстильные материалы. Целью создания слоистых текстильных материалов является соединение в одну структуру схожих или различных компонентов для получения материала с новыми заданными свойствами, отличными от свойств исходных компонентов. Каждый слой в общем материале выполняет свою специфическую функцию.

Слоистый текстильный материал представляет собой композицию из двух и более слоев различных материалов, соединенных между собой прошивным термическим, клеевым, способами или прессования, нанесения полимерных связующих на поверхность или погружением [10, 14]. В зависимости от назначения, в качестве слоев могут быть использованы различные типы материалов: тканые, нетканые, трикотажные полотна (натуральные, синтетические или пенополиуретан смесовые), рулонные пенополиэтилен, полиолефиновые пленки, металлическая фольга. В качестве связующего применяются термопластичные И термореактивные химической природы. К слоистым различной также относятся флокированные, материалы нетканые, композиционные, комбинированные, ламинированные.

Комбинации различных компонентов в слоистом композите, всевозможных связующих и добавок, применение высокотехнологичных способов производства позволяет создавать многослойные материалы с широчайшим спектром свойств, что объясняет их использование практически во всех областях техники и быта (рис. 1.2).

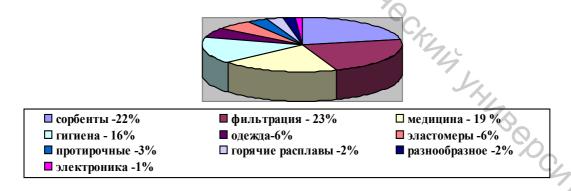


Рисунок 1.2 – Области применения различных видов слоистых текстильных материалов

Анализ всевозможных видов композитов различного назначения, в которых одним из составляющих компонентов является текстильный материал – волокно, пряжа (нить), ткань, трикотаж, нетканый материал, показал, что для них отсутствует единая терминология. В связи с этим

принято под *текстильным композиционным материалом* понимать материал, состоящий из двух и более компонентов, сформированный на базе текстильных технологий в единую структуру, физикомеханические свойства которого отличаются от свойств составляющих компонентов.

1.1 Текстильные композиционные материалы, структура, классификация

Понятие «текстильный композиционный материал» предполагает выполнение следующих условий [15, 16]:

- композиция должна представлять собой сочетание хотя бы двух компонентов, один из которых является текстильным, с четкой границей раздела между ними;
 - композиция должна образовывать монолитную структуру;
- композиция должна обладать свойствами, которых нет ни у одного из ее компонентов в отдельности.

Характерным признаком текстильного композиционного материала является то, что при значительной толщине и жесткости композиционного он сохраняет гибкость и эластичность текстильного, возможность формирования рулонных материалов.

В соответствии с ОКРБ 007-2012 Классификатор продукции по видам экономической деятельности (Код 13.96.14), а также ТН ВЭД ЕАЭС разрабатываемые материалы можно отнести к группе 59 (Раздел XI Текстильные материалы и текстильные изделия) – Текстильные покрытием или материалы, пропитанные, c дублированные; текстильные изделия технического назначения. Данная классификация учитывает назначение материалов, но не отражает, из каких полотен текстильный композиционный материал, технологию его получения. классификацию группа материалов не входит декоративно-отделочного назначения.

Авторами работ [17, 18], в которых рассмотрены композиционные многослойные материалы для одежды, предлагается следующая классификация:

- по числу слоев двухслойные и многослойные;
- по сырьевому составу лицевого слоя из натуральных и химических волокон;
- по структуре слоев: лицевой ткань, трикотаж, нетканые полотна, искусственные мех и кожа, пленочный материал;
 - по промежуточному слою пенополиуретан, нетканое полотно;
- по изнаночному слою ткань, трикотаж, нетканое полотно, пленочный материал, каучук, пенополиуретан;

- по назначению бытовые, технические;
- по способу дублирования слоев клеевой, термический (огневой), прошивной (ниточный), ультразвуковой (сварной).

Следует отметить, что существующие схемы классификации в определенной степени условны, поскольку не могут учесть все многообразие признаков текстильных композиционных материалов, в том числе и принципиально новых, как, например, слоистые материалы с нановолокнистым покрытием [19]. Кроме того, следует учитывать, что ассортимент текстильных композиционных материалов постоянно расширяется и обновляется, разрабатываются и внедряются новые способы формирования структур. Поэтому на основании обобщения литературных данных и изучения их ассортимента составлена новая классификация с учетом всех признаков, представленная на рисунке 1.3.

Центральным, определяющим признаком классификации является структура текстильного композиционного материала.

По структуре текстильные композиты можно разделить на:

- слоистые, в которых два и более однородных или разнородных слоев плоских структур скреплены механическим, физико-химическим или комбинированным способом в единое полотно;
- каркасные, полученные способом пропитки текстильного каркаса (тканых, трикотажных или нетканых полотен) полимерным связующим, отличающиеся по прочности, упругости, жесткости и другим свойствам от текстильных материалов.
- *По природе волокнистого материала* текстильные композиционные материалы делятся на натуральные, химические и смесовые, могут быть минерального и органического происхождения.
- В качестве связующих при формировании текстильных композиционных материалов используют растворы, расплавы или дисперсии термопластичных полимеров: полиэтилена, полиамида, полиэфира, полиуретана, поливинилхлорида, поливинилового спирта, а также разнообразные сополимеры акриловые, поливинилацетатные и другие. Полимерные связующие также могут быть использованы в виде порошков, нитей паутинок, пленок при формировании слоистой структуры термоклеевым способом.

По структуре текстильного компонента и материала основы (при формировании слоистых материалов) текстильные композиционные материалы могут быть условно разделены на следующие виды [16]:

- 1D однонаправленные (нити, ленты, жгуты и др.);
- 2D двунаправленные (тканые, вязаные или плетеные полотна);
- 3D трехмерно ориентированные (трехмерные ткани и др.);
- с хаотическим расположением волокон или нитей в плоскости (в пространстве) (волокнистые слои, холсты, большинство нетканых материалов, бумаги);

КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕКСТИЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ



Текстильные элементы композите В МОГУТ придавать прочностные декоративные свойства, создавать необычную структуру, a также различные специальные свойства (огне-, термостойкость, водо-, масло-, грязеотталкивание, антибактериальные, магнитные, диэлектрические, радиопоглощающие и др.).

При формировании слоистых текстильных материалов используют различные основы: бумага, флизелин, спанбонд, тканые и трикотажные полотна и др. Выбор необходимой подложки зависит от области использования готового материала.

Таким образом, выбор основных компонентов текстильных композиционных материалов определяется необходимыми функциональными требованиями, эксплуатационной надежностью, совместимостью компонентов, технологичностью переработки, доступностью и стоимостью.

По назначению комбинированные текстильные материалы можно разделить на две группы: одежные и технические.

Среди композиционных текстильных материалов самую большую группу составляют одежные материалы, которые используются для производства в основном верхней, форменной и специальной одежды. Для изготовления одежных пакетов используют клеевой, термический (огневой), сварной (термостежка), прошивной (ниточный) [9, 10, 14].

ассортимент Анализируя композиционных материалов технического назначения, в отдельную группу можно выделить материалы декоративно-отделочные. В группу декоративно-отделочных входят галантерейные, обивочные, мебельные, обувные Галантерейные текстильные композиты используются для изготовления портфелей, чемоданов, всевозможных чехлов, кошельков и т. п. Обивочные для изготовления деталей мебели, декоративной отделки салонов различного вида транспорта, детских колясок, в качестве облицовочных для стен и потолков, в том числе текстильные настенные покрытия и т. п. Обувные текстильные композиты находят применение для изготовления верха обуви, в том числе спортивной, а также в качестве окантовки и декоративной отделки. Отдельно можно выделить декоративные композиционные текстильные материалы, используемые для изготовления головных уборов, декоративной отделки одежды. Композиционные текстильные материалы используются как упаковочные ДЛЯ сувенирных подарочных изделий.

- 1.2 Способы формирования текстильных композиционных материалов
- 1.2.1 Формирование текстильных каркасных композиционных материалов

Технология формирования *текстильных каркасных композитов* состоит из следующих операций:

- формирование текстильного каркаса тканого, трикотажного или нетканого полотен;
- заполнение порового пространства текстильного материала полимерным связующим различными способами пропитки;
 - сушка и термообработка.

Пропитка текстильного материала может осуществляться без давления и под давлением. Известны следующие способы пропитки: пропитка погружением в ванну, протягиванием через ванну с полимерным связующим, пропитка контактным роликом, пропитка напылением связующего, пропитка под давлением, вакуумные метод, центробежная пропитка [7, 20, 21]. Пропитка может осуществляться комбинированными способами.

В процессе пропитки без давления (самопроизвольная пропитка) полимерное связующее смачивает поверхность и проникает в межволоконное пространство под действием сил поверхностного натяжения и силы тяжести, преодолевая силы вязкого трения [15]. Самопроизвольную пропитку осуществляют протягиванием через ванну с полимерным связующим, контактным способом или напылением.

При пропитке под давлением скорость продвижения связующего по межволоконным капиллярам и порам увеличивают наложением дополнительных сил: вакуумная, пневматическая, центробежная экструзионная пропитка.

С точки зрения технологического упрощения, снижения трудоемкости и энергетических затрат процесса пропитки, наиболее предпочтительным представляется метод капиллярного подъема. При этом расход связующего и интенсивность пропитки будут зависеть от пористости текстильного материала, способа его изготовления и пропитывающих свойств связующего [7].

Способ пропитки погружением в ванну используется при формировании изделий различной формы и заключается в погружении изделия в ванну с полимерным связующим. Возможно формировать и рулонные композиционные материалы путем полного погружения рулона текстильного материала в ванну с полимерным связующим. Достоинством данного способа является возможность пропитывать полотна любой толщины. Основной недостаток — длительность для получения требуемой полноты пропитки, так как содержащийся внутри

пор волокнистого материала «защемленный» воздух не позволяет проникать связующему в структуру полотна.

Наиболее распространенным способом формирования рулонных текстильных композиционных материалов является *способ протягивания через ванну с полимерным связующим* (рис. 1.4).

Пропитка текстильного полотна протекает за счет действия различных сил, давление пропитки складывается из капиллярного, гидростатического и атмосферного давления. Основной движущей силой пропитки является капиллярное давление. Способ обладает высокой производительностью, но рекомендован для материалов толщиной до 1,5 мм. Для достижения высокого содержания вещества связующего в материале проводят двукратное или многократное протягивание полотна через пропиточную ванну.

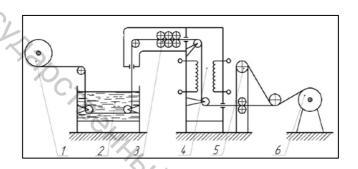


Рисунок 1.4 – Схема пропитки текстильного материала протягиванием через ванну с полимерным связующим: 1 – рулон текстильного полотна; 2 – ванна с полимерным связующим; 3 – отжимные ролики; 4 – сушильная камера; 5 – направляющий ролик; 6 – рулон с готовым текстильным композиционным материалом

Для интенсификации пропитки используют вакуумирование, увеличение давления над свободной поверхностью связующего (пневматическая пропитка), возбуждением в связующем акустического давления (пропитка с наложением механических колебаний), наложением на связующее центробежных сил (центробежная пропитка) [20].

Из способов вакуумной пропитки известен метод VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding) [22], используемый для формирования полимерных композиционных материалов конструкционного назначения, в частности изделий сложной формы с использованием термореактивных связующих вязкостью до 600 мПа·с. Скорость движения полимерного связующего через текстильный материал определяется законом фильтрации Дарси. Метод совмещает операцию пропитки с формированием детали или изделия заданной формы и размеров. Полимерное связующее закачивается в форму за счет разряжения, создаваемого под вакуумным мешком (рис. 1.5).

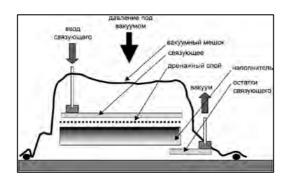


Рисунок 1.5 – Схема вакуумной пропитки методом VARTM

By reof Использование технологии VARTM возможно и для пропитки рулонных материалов, при этом необходимо применять плоские формы и различные способы укладки текстильного материала.

Одна из возможных технологий вакуумной пропитки рулонных материалов представлена на рисунке 1.6 [20].

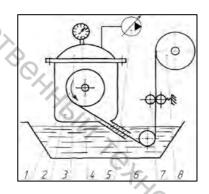


Рисунок 1.6 – Схема вакуумной пропитки рулонного текстильного полотна: 1 – рулон текстильного полотна, 2 – герметичная вакуумная камера, 3 – крышка вакуумной камеры, 4 – вакуумметр, 5 – вакуумная система, 6 – фильера, 7 – отжимные валки, 8 – рулон с готовым материалом

Текстильное полотно (1), помещенное в герметичную камеру (2), протягивается через фильеру (6), пропитывается связующим и после отжима (7) наматывается на рулон с готовым материалом, далее подается в сушильную камеру.

Недостатками методов вакуумной пропитки является трудность процесса, контроля воспроизводимости количества связующего, поступающего в изделие или материал. Бесспорным преимуществом является более полное заполнение полимерным связующим порового пространства из-за отсутствия в них воздуха. Для реализации метода вакуумной пропитки требуется специальное оборудование, что препятствует внедрению технологий на текстильных предприятиях с традиционными способами отделки текстильных материалов.

Применяют комбинированный способ, совмещая вакуум избыточное давление – пневмовакуумный [20]. Способ позволяет достигнуть высокого содержания полимера и улучшить качество распределения в материале. Для осуществления вакуумной пропитки пропиточные установки снабжают специальной вакуумной камерой, через которую проходит волокнистый материал. Связующее поступает межволоконное пространство под давлением. тот способ целесообразно применять при формировании пакетов большой толщины до 50 мм. В частности, авторы патента [23] предлагают установку для пневмовакуумной пропитки древесины, канатов, картона защитными или окрашивающими проточными растворами. Способ включает загрузку материала в камеру, заполнение ее пропиточной жидкостью с последующей герметизацией, создание в разряжения, подачи пропиточной жидкости под давлением, выдержку материала, снижение давления до атмосферного, откачку жидкости и извлечение материала из камеры.

Способ центробежной пропитки осуществляется в специальных осесимметричных формах при их вращении с заданной частотой. Предварительно полимерное связующее равномерно распределяется по поверхности материала. Пропитка происходит в результате действия центробежных сил, максимальная толщина пропитываемых материалов -1,5 мм.

В патенте [24] предлагается использование совмещенного способа центробежной пропитки и отжима для заключительной отделки текстильных материалов, используемых в парашютных системах. Пропитку отрезков синтетических и искусственных текстильных в виде мотков в корзину, производили в материалов, уложенных центрифугальном гидроэкстракторе. При вращении корзины с угловой скоростью около 650-750 об/мин образовывалась центробежная сила, которая формировала у ее стенок избыточное давление и прогоняла пропиточный раствор насквозь через массу текстильного материала.

К способам самопроизвольной пропитки относится пропитка контактным роликом (рис. 1.7).



Рисунок 1.7 – Схема пропитки текстильного полотна контактным роликом: 1 – рулон текстильного полотна, 2 – контактный ролик, 3 – ванна с полимерным связующим, 4 – сушильная камера, 5 – рулон готового материала

Пропитка текстильного полотна осуществляется при контакте с погруженным в полимерное связующее роликом. Полимерное связующее проникает в волокнистый материал под действием капиллярных сил и сил тяжести. Способ рекомендован для пропитки материалов с низким модулем упругости, в частности из борных и базальтовых волокон.

Способ также применяется в текстильном отделочном производстве для заключительной обработки тканых полотен. В работе [25] описан способ, который состоит в том, что ткань предварительно запаривают, затем наносят контактным методом пропиточный раствор сначала на одну сторону ткани с последующим продавливанием раствора в толщу ткани, а затем наносят раствор на другую сторону ткани.

Способ пропитки контактным роликом позволяет пропитывать ткани, ленты, полотна на толщину до 0,7 мм.

Для пропитки текстильных материалов больших размеров используют способ напыления связующего, схема которого представлена на рисунке 1.8.

Способ используют в случае нанесения полимерного связующего с ограниченным временем жизнеспособности при комнатной температуре, глубина пропитки – до 1,5 мм.

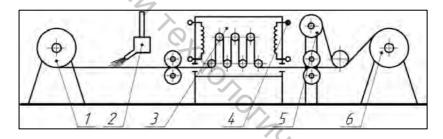


Рисунок 1.8 – Способ пропитки напылением полимерного связующего:

- 1 рулон текстильного материала, 2 распыляющее устройство,
- 3 сушильная камера, 4 нагреватель, 5 рулон разделительного материала, 6 рулон готового материала

Для формирования рулонных текстильных композиционных материалов нашел применение способ пропитки под давлением (рис. 1.9), заключающийся следующем: текстильный материал В предварительно подогревается ДЛЯ предотвращения повышения вязкости полимерного связующего, поступает в зону пропитки, куда полимерное связующее. Предварительный текстильного материала позволяет частично удалить защемленный в порах воздух, что облегчает пропитку.

Способ используется и для формирования изделий заданной формы [26], при этом волокнистый материал укладывается на поверхность пуансона и обжимается матрицей до требуемой толщины.

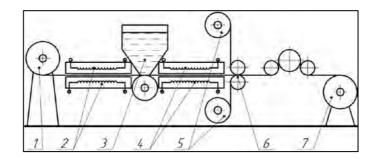


Рисунок 1.9 – Пропитка текстильного полотна под давлением:

типон текстильного полотна, 2 – камера подогрева текстильно

связующим, 4 – обогреватели зоны пропитк

тамала, 6 – каландры, 7 – рулон 1 – рулон текстильного полотна, 2 – камера подогрева текстильного полотна, 3 – термостат со связующим, 4 – обогреватели зоны пропитки, 5 – рулоны разделительного материала, 6 – каландры, 7 – рулон

В образующуюся замкнутую полость под избыточным давлением нагнетается связующее, которое, проходя по каналам между волокнами наполнителя, осуществляет их пропитку и выходит через сток. Для повышения качества пропитки пакет наполнителя предварительно вакуумировать.

Для повышения эффективности пропитки способ пропитки под давлением совмещают c предварительным нагреванием вакуумированием текстильного полотна [27]. Нагрев производят до превышающей температуру связующего в ванне. температуры, длинномерного текстильного ДЛЯ пропитки содержит камеру вакуумирования, герметичную пропиточную ванну, соединенную с емкостью для приготовления и подачи связующего, систему вакуумирования и средства отбора готового материала.

Способ пропитки ПОД давлением позволяет пропитывать текстильные материалы толщиной 0,1–2 мм.

Большинство рассмотренных способов пропитки используются материалов полимерных композиционных при производстве конструкционного назначения и требуют специального дорогостоящего оборудования. Для реализации технологии формирования текстильных композиционных материалов способом пропитки **УСЛОВИЯХ** текстильной предприятий И легкой промышленности наиболее подходящим является метод протягивания через ванну с полимерным последующей сушкой материала. связующим Способ может существующем осуществляться на В текстильном отделочном производстве оборудовании без его модернизации и капитальных вложений.

Использование способа пропитки при формировании текстильных композиционных материалов назначения позволяет:

- организовать поточное производство;
- сократить технологический процесс формирования текстильного композиционного материала с заданными свойствами;
- создать новый ассортимент с заданными физикомеханическими и эксплуатационными свойствами на существующем на текстильных предприятиях оборудовании;
- придавать специальные свойства путем варьирования составом полимерного связующего.

Перспективным направлением развития технологий формирования текстильных композиционных материалов является создание новых сокращенных или «коротких» технологий, позволяющих одновременно придавать комплекс специальных свойств и многофункциональность.

Известны специальные виды отделки текстильных полотен, применяют, во-первых, ДЛЯ снижения ИЛИ недостатков, присущих тканям определенного сырьевого состава (малосминаемая отделка, легкое глажение); во-вторых, для придания дополнительных потребительских важных водонепроницаемая, (водоотталкивающая антистатическая, противомолевая, грязеотталкивающая, противогнилостная, огнезащитная отделка); в-третьих, для создания каких-либо эффектов, улучшающих эстетические свойства (стойкое тиснение, гофре, форниз, металлизация, флокирование и других).

Основным свойством, отличающим текстильный композиционный материал от ткани со специальными свойствами, формоустойчивость, которая является жесткость И формируется пропиткой тканых полотен жесткими несмываемыми аппретами. Для композиционных материалов в зависимости от целевого назначения придание специальных свойств, таких как водооттталкивание, термо-, огнестойкость, антистатичность Многофункциональность обеспечивается за счет пропитки растворами различной концентрацией дисперсиями \mathbf{c} соответственно, формирование требуемой для данного материала жесткости. Декоративные свойства текстильного композита определяются рисунком ткацкого переплетения, а также различными эффектами, которые создаются на поверхности материала в процессе дополнительных операций, в частности каландрирования.

В УО «Витебский государственный технологический университет» разработана технология формирования текстильного композиционного материала способом пропитки тканого полотна на линии для производства геотекстильных материалов, состоящей из ткацкого станка РТS 4/S16 фирмы Dornier и линии пропитки и сушки

фирмы Ontec. Данная поточная линия предназначена для выпуска геосеток. Однако геотекстильная продукция является сезонной, поэтому важной задачей является исключение простоев дорогостоящего оборудования за счет выработки другого ассортимента продукции.

Способ реализован по двум схемам, последовательность операций которых представлена на рисунке 1.10. Согласно схеме 1 тканое полотно формируется при подаче нитей основы со шпулярника, при этом ткани имеют разреженную структуру. Схема 2 позволяет получать ткани любой плотности, нити основы поступают со сновального валика.

Важным преимуществом разработанных технологий является сокращение числа операций за счет формирования текстильного композиционного материала на высокопроизводительной поточной линии агрегированной из шпулярника, сновального валика, ткацкого станка, пропиточной установки и сушильной камеры.

Линия для формирования текстильного композиционного материала по схеме 1 представлена на рисунке 1.11.

Нити основы сматываются со шпулярника 1 непосредственно на рапирный ткацкий станок 2, где происходит формирование разреженного тканого полотна. С ткацкого станка полотно поступает в плюсовку 3, где пропитывается полимерным связующим и отжимается на отжимных валах. Пропиточная ванна подогревает связующее до необходимой температуры (20–50 °C). Для сушки и фиксации структуры готовый материал подается в сушильную камеру 4.

Секционный шпулярник включает 930 бобин, нити основы с которого заправляются непосредственно в ламели и галева ремиз, что дает возможность получать разреженное тканое полотно и не позволяет вырабатывать тканое полотно на возможную ширину ткацкого станка — 300 см. Поэтому дополнительно была осуществлена установка механизма, позволяющего вести наработку полотна максимально возможной ширины с ткацкого навоя, поступающего на станок после процессов снования и шлихтования нитей, повышающих их качество и увеличивающих производительность процесса ткачества.

Технологическая схема частично модернизированной линии для формирования текстильного композиционного материала представлена на второй схеме (рис. 1.12).

Нити основы поступают на ткацком навое 1 и крепятся на рапирный станок 2, где нарабатывается тканое полотно. С ткацкого станка полотно подается в плюсовку 3, где пропитывается полимерной композицией определенного состава и отжимается при помощи отжимных валов. На поверхности материала образуется пленка из полимерного связующего. Сушка текстильного композиционного материала осуществляется в сушильной камере 4. Готовый материал наматывается на накатное устройство 5.

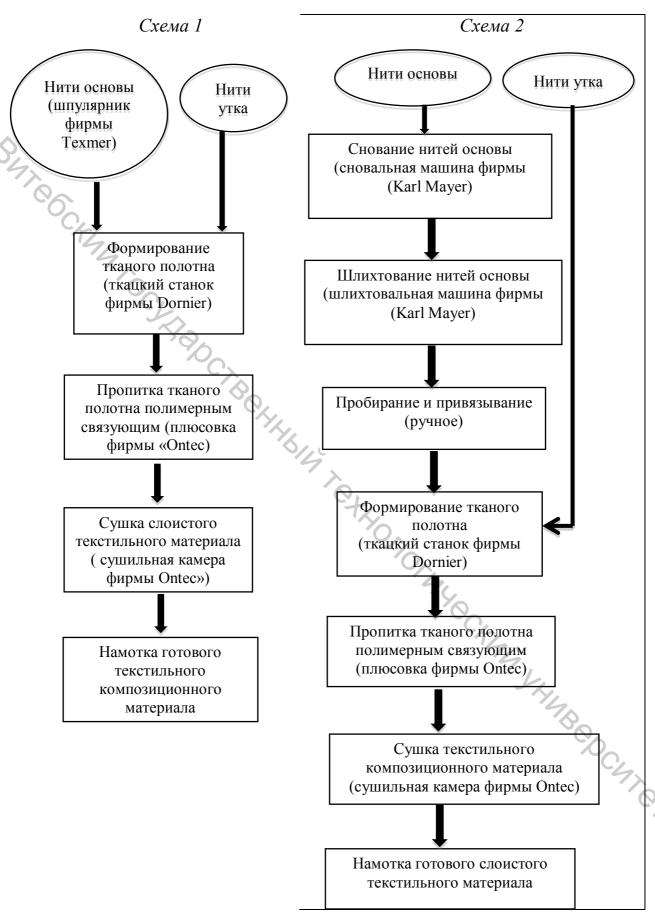


Рисунок 1.10 – Формирование текстильного композиционного материала

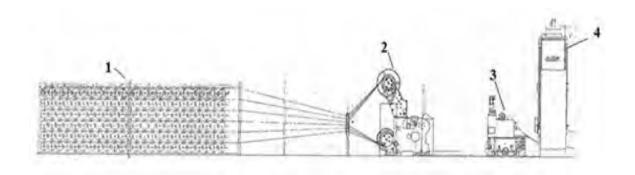


Рисунок 1.11 — Линия для производства текстильных композиционных материалов (схема 1): 1 — шпулярник; 2 — ткацкий станок; 3 — плюсовка; 4 — сушильная камера

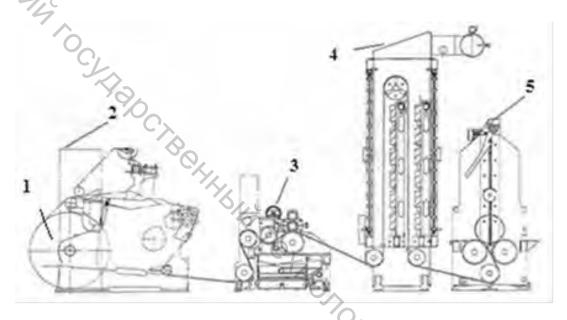


Рисунок 1.12 — Модернизированная линия для формирования текстильного композиционного материала (схема 2): 1 — ткацкий навой; 2 — ткацкий станок; 3 — пропиточная ванна; 4 — сушильная камера; 5 — накатное устройство

1.2.2 Формирование слоистых текстильных композиционных материалов

Слоистыми текстильными композиционными материалами называют группу материалов, состоящих из однородных или разнородных слоев, соединенных в единую структуру следующими способами: клеевым, прессованием, нанесением полимерного покрытия, термическим и прошивным [10, 11, 14]. Каждый из способов имеет свои преимущества и недостатки.

Различают способы, позволяющие соединять однородные текстильные компоненты, а также текстильные компоненты с другими материалами (бумага, металлические или полимерные пленки, сетки и т. д.) в плоскую слоистую структуру.

Соединение в слоистую структуру однородных компонентов чаще всего происходит при формировании нетканых материалов. Например, нетканые материалы, получаемые ИЗ расплавов полимеров водоструйной волокнистой или воздушной укладкой применяемые фирмами C-airlaid (Россия), Fist Guality Nonwovens (США). Такие материалы выпускаются в виде рулонов для переработки в товары гигиены, технического сектора, медицины, фильтрации [27]. Фильерный способ заключается в непосредственном формовании синтетических нитей или волокон из расплавов полимеров с одновременной укладкой их в холст. При укладке в холст нитей (волокон) в размягченном состоянии получают готовое нетканое полотно благодаря склеиванию нитей между собой [28, 29]. Этот способ известен под названием spunmelt (спряденный из расплава) [30]. Фирмой Sandler (Германия) разработан ряд слоистых нетканых гигиенического фильтровального материалов И назначения, выпускаемых по технологии прямой переработки полимера в холст.

Анализ патентных и литературных источников позволяет выделить следующие основные способы формирования однородных слоистых текстильных композиционных материалов на основе нетканых полотен:

- химический, заключающийся в пропитке слоев нетканых полотен раствором или дисперсией полимерного связующего с последующей сушкой и, при необходимости, термофиксацией;
- термический, основанный на размягчении и сплавлении между собой термопластичных химических волокон, не разрушающихся при температуре размягчения;
- механический, при котором нетканые полотна соединяются между собой за счет переплетения волокон (иглопробивной, гидроструйный).

Компания Freudenberg Vlitsstoffe KG (Германия) предлагает ассортимент композиционных потребителям широкий слоистых материалов химического способа формирования в качестве кровельных материалов, стеклообоев, использования напольных покрытий и др. [70]. Нетканые материалы Viledon® серии сформированных изготавливаются основе холстов, на равномерно распределенных химических волокон различных видов. Скрепление холстов осуществляется c помощью химических связующих, которых наиболее качестве часто применяются термореактивные.

Известны способы формирования однородных слоистых материалов композиционных c использованием качестве составляющих слоев пряжи, тканей, а также трикотажных полотен. Немецкими учеными разработан способ формирования слоистого однородного материала способом пропитки волокнистого материала полимерным веществом. В качестве волокнистого материла, образующего основу композиционного материала, может использоваться пряжа, ткань или нетканый материал. Используемое полимерное связующее обладает высокой эластичностью, а также высокой стойкостью к истиранию и пиллингоустойчивостью [31].

Термический способ формирования однородных нетканых полотен, заключается соединении содержащих термопластичные волокна. В США разработан слоистый нетканый [32], содержит первый слой, состоящий из 50-90 % по массе нетермопластичных абсорбирующих волокон и из 10-50 % по массе термопластичных волокон. Второй слой, состоящий из 50-90 % по массе нетермопластичных абсорбирующих волокон и из 10-50 % по массе термопластичных волокон. Соединение слоев происходит в результате сплавления термопластичных волокон при действии температуры размягчения волокнообразующего полимера.

получения Известен способ звукопоглощающих для машиностроения, однородных материалов транспорта строительства [33] с высокими акустическими характеристиками, изгибной жесткостью и следовательно конструктивной прочностью. Способ заключается в соединении двух слоев нетканых материалов из смеси полимерных или полимерных и льняных волокон. Перед соединением один из слоев подвергается термоформованию сжатием при температуре не ниже температуры плавления полимерного материала волокон до увеличения объемной плотности в 2-6 раз. осуществляется Соединение путем совместного прессования непрогретого слоя плотности слоя, подвергнутого исходной И термоформованию.

используется швейной обувной промышленности И многослойный нетканый материал синтетических волокон. ИЗ Собирается многослойный пакет, состоящий по крайней мере из одного внешнего слоя нетканого волокнистого полотна и внутреннего слоя термопластичного полимера, после иглопрокалывания многослойного проводится термообработка при температуре температуры плавления пленки из термопластичного полимера [34]. Способ позволяет упростить и повысить экологическую безопасность технологии получения слоистых материалов, состоящих из нетканых холстов, получить воздухо- и паропроницаемый слоистый материал с рядом высоких защитных, формовочных и эксплуатационных свойств.

Известны способы формирования слоистых однородных материалов из нетканых полотен, предварительно соединенных в единую структуру механическим, физико-химическим или комбинированным способом.

Фирмой Societe National Etude (Франция) предложен слоистый нетканых полотен. изготовленный ИЗ наполнитель формируется В виде матов ИЗ однонаправленных непрерывных волокон, уложенных одни на другие в поперечном направлении. Волокнистый мат иглопрокалывают, скрепленную, плотную структуру армирующего слоя, после чего его карбонизуют. При последующей обработке волокна полуфабриката не смещаются, равномерно и монолитно размещаясь в композиционном материале [35].

Необходимо отметить, что использование нетканых полотен для формирования слоистых однородных материалов является наиболее направлением. Преимуществами развивающимся материалов прочностные являются: высокие характеристики, возможность использования разнообразного волокнистого состава, наибольшее применение находят полиэфирные и полипропиленовые при производстве материалов Однако декоративноотделочного назначения их применение возможно только в качестве подложки, основы для нанесения декоративного слоя. Основные области применения слоистых материалов на основе нетканых полотен: шумоизолязионные, фильтровальные, медицинские, гигиенические материалы.

К слоистым текстильным материалам, состоящим из разнородных слоев, относятся такие композиционные материалы, как искусственные кожи, технические композиты самого различного назначения, материалы и покрытия замшеподобного вида [36, 37], а также многослойные металлизированные материалы, используемые в производстве спецодежды пожарников, рабочих горячих цехов, для защиты от магнитных полей, от фотохимического воздействия лучей, для защиты от теплоизлучения [38].

Метод нанесения полимерного покрытия используется для формирования многослойных материалов как одежного, так и технического назначения. На текстильную основу наносят полимерную композицию: полиуретановую, поливинилхлоридную, полиамидную, полиэтиленовую, кремнийорганическую или каучуковую (бутилкаучуковые, фторкаучковые, силоксановые) [39, 40].

Существуют различные способы нанесения полимерного покрытия на текстильный материал [41, 42].

Ракельный способ заключается в нанесении полимерной композиции на текстильное полотно с частичным вдавливанием в

капиллярно-пористую структуру ткани, последующим удалением ее излишков с поверхности материала и выравниванием.

Например, многослойный материал типа кожи [39], который используется для изготовления галантерейных изделий широкого ассортимента. Многослойный материал включает лицевой слой, выполненный в виде текстильной основы с поверхностной плотностью 100–350 г/м², состоящей из хлопковых волокон или из смеси хлопковых и химических волокон в различных соотношениях. Изнаночный слой – полимерная композиция, состоящая из поливинилхлорида, пластификатора и стабилизатора. Глубина проникновения полимерного покрытия составляет 0,10–0,25 мм по толщине тканого полотна.

Предложен способ формирования декоративного многослойного материала, предназначенного для отделки галантерейных изделий, колясок, мебели, а также для внутренней отделки помещений на наносно-сушильном оборудовании [40]. Декоративный многослойный материал содержит текстильную основу, поверхностной плотностью 80–340 г/м², состоящую из натуральных волокон или натуральных и искусственных волокон, или натуральных и синтетических волокон, или натуральных, искусственных и синтетических волокон, и полимерное покрытие, которое наносится ракельным способом.

Способ нанесения вспененного покрытия. Этот способ широко используется для изготовления защитных перчаток, напольных и настенных покрытий. Изделие из тканого или трикотажного материала погружают в раствор коагулянта, далее вынимают и погружают в раствор вспененного полимера, промывают и нагревают до температуры вулканизации [43, 44].

Способ нанесения вспененного покрытия используется для формирования мембранных слоев [45, 46].

По технологии авторов [45] на верхний слой текстильного полотна наносят полимер мембраны с помощью ножевой ракли и после коагуляции, отмывки и сушки его дублируют со стороны мембраны трикотажным полотном. Пористый слой мембранного покрытия состоит из полиэфируретана, диметилформамида, микрокристаллической целлюлозы и поверхностно-активного вещества.

Нанесение мембранного покрытия применяется для производства одежды и материалов технического назначения с водонепроницаемыми свойствами, широко используется метод — membrane coating, либо клеевой — membrane laminated.

Способ переводного покрытия. Заключается в том, что сначала покрытие наносится на бумагу для формирования пленки, затем пленка растворяется на ткани [42, 47]. Сшивка происходит за счет нагревания и ламинирования полимерного слоя. Этот метод используется для придания мебели определенных свойств с помощью покрытия, так же таким образом изготавливаются чехлы для матрасов и обивка для

автомобильных кресел, используется для нанесения ковровых покрытий.

Способ каландрирования. Каландрирование – процесс формования и обработки полимеров на специальных агрегатах, главной частью которых является каландр [48]. Формирование слоистого текстильного материала происходит при прохождении через каландры – валы. Каландры могут использоваться для формования тонкой полимерной пленки; нанесения слоя полимерного связующего на материал основы; дублирования полотен из тканых и нетканых материалов [49]. Так, например, производства нетканых материалов технологии строительного, отделочного назначения соединяют два нетканых слоя, расположенной между ними сетки из стекловолокна и полимерного связующего каландрированием последующей сушкой c термофиксацией.

При нанесении пленки полимерного связующего на текстильное полотно каландрированием возможно получать ровное покрытие в диапазоне от около 0,1 до 1,5 мм. Для получения более низкой толщины требуется высокая нагрузка на каландр. Достоинством данного способа является высокая скорость формирования слоистого материала, недостатком – каландровый эффект.

Способом каландрирования получают материалы гигиенического назначения. В патенте [50] предложен способ, согласно которому нетканое полотно и образующая микропоры термопластичная пленка поступают в щель между каландрами, образуя ламинированное полотно. В результате последующей инкрементальной вытяжки при температуре окружающей среды формируется тканеподобный микропористый слоистый материал.

Экструзионный способ. Состоит в покрытии горячим расплавом термопластичных полимеров (полиуретан, полиолефины, поливинилхлорид) на текстильное полотно. Полимер подается в виде гранул в зазор между подвижными термовалками, гранулы плавятся за счет высокой температуры и сдвиговых усилий на валке. Полученная пленка прессуется на тканевую подложку на дублирующих валках, возможно нанесение адгезива на ткань [44]. Этот процесс используется для получения легких весовых покрытий или брезента.

В вышеупомянутом патенте [50] предлагается и второй способ формирования слоистых материалов гигиенического назначения — экструзионное ламинирование поверхности полотна путем непрерывной экструзии в щель образующего микропоры экструдата при температуре выше точки его размягчения с последующей вытяжкой ламинированного полотнища. Получаемый материал проницаем для воздуха и паров влаги, но не проницаем для жидкости и имеет сходство с тканью, создавая ощущение мягкого нетканого полотна.

Экструзионным способом получают воздухопроницаемые композиционные материалы ДЛЯ одежды изделий Материал одноразового использования. содержит эластомерную пленку, нанесенную посредством экструзионного наслаивания на ваточный холст, предусмотренный у одной поверхности или у обеих поверхностей пленки. Эластомерная пленка имеет нерегулярную макроотверстий, сформированных В ней посредством дискретного растяжения, имеющих диаметр от 10 мкм до 100 мкм. Пленка содержит порообразующий наполнитель [51].

Технологии формирования слоистых текстильных материалов вышеуказанными способом нанесения полимерного связующего позволяют получать широкий ассортимент материалов самого различного назначения. Однако имеют следующие недостатки:

- высокая стоимость полимерных связующих, наносимых на текстильный материал;
 - значительные энергозатраты;
- загрязнение окружающей среды из-за возможности выделения токсичных веществ при использовании в технологии горячих расплавов полимерных связующих;
- необходимость применения дополнительного дорогостоящего оборудования для нанесения полимерной пленки на текстильную основу;
- увеличение цепочки технологического процесса получения слоистого композиционного текстильного материала, как следствие удорожание конечного продукта.

Большую группу слоистых композитов составляют материалы, полученные клеевым способом соединения разнородных слоев. Клеевой способ является простым и позволяет получить двухслойные и многослойные материалы, используемые в производстве обуви, одежды бытового назначения, специальной одежды (огне- и химзащитной, форменной, спортивной и т.д.), а также изделий технического назначения (обивочные, укрывные и тентовые материалы и т.д.). В качестве декоративного слоя используют тканые или трикотажные полотна, а материала основы – различные нетканые полотна. В качестве полимерного связующего используют полиамидный, полиэтиленовый, полипропиленовый, полиэфирный, полиуретановый, поливинилхлоридный клеи, а также разнообразные сополимеры акриловые, сополиамидные, поливинилацетатные и другие клеевые композиции [10, 11]. Связующее используется в виде порошков, нитей, расплавов. Соединение паутинок, пленок, растворов И осуществляется, как правило, горячим прессованием, материалы между нагретым и прижимным валами каландра или на прессах проходного типа с последующим охлаждением полученного материала [11, 40, 52].

Известны слоистые композиционные материалы на основе нетканых полотен из натуральных и химических волокон, полученные термокаландрирования или термопрессования [53, Например, материал для фильтров, который получен ламинированием двух нетканых полотен и полиэфирной сетки. Первое нетканое полотно состоит из полиэфирных волокон разной линейной плотности и полиэфирных волокон c низкой температурой плавления поверхностном слое. Второе полотно состоит из полиэфирных волокон линейной плотности 0,22 текс. Оба нетканых материала вместе с полиэфирной сеткой образуют материал с поверхностной плотностью 500 г/м². Далее материал подвергается термокаландрированию и иглопрокалыванию для соединения слоёв.

Авторами [55] предложен способ формирования одежды методом термоклеевого дублирования с использованием двухсторонней клеевых материалов c клеящей способностью. Преимущество данного способа соединения является возможность формирования в объеме композита полостей между заполненных воздухом, жидкостью или другим например, волокнами, порошком, гранулами. Такой способ позволяет регулировать свойства готового слоистого материала в широких пределах.

Фирмой Kafus Biocompositos (США) получены слоистый композиты, состоящие из натуральных растительных волокон и синтетических термоплавких связующих [54]. Композитный материал под действием тепла и давления прессуется в трехмерные детали, такие как дверные панели, спинки сидений, приборные панели и другие детали интерьера. Их применение ускоряет производственный процесс, снижает издержки производства и обеспечивает получение более легких и прочных готовых изделий.

Недостатком способов формирования слоистых композиционных материалов с использованием термоплавких связующих либо связующих на основе синтетических смол является необходимость применения энергозатратного оборудования.

Для изготовления слоистых текстильных композитов с высокими электростатическими свойствами используют металлизацию поверхности текстильного материала. Металлические покрытия наносят на полотна различными способами [56, 57, 58]: гальванический, газофазный, клеевого дублирования. Наиболее перспективным и экологическим способом напыления металлического слоя является метод магнитронного распыления — применение низкотемпературной плазмы [59, 60].

Способы металлизации позволяют получать текстильные материалы, обладающие специфическими свойствами, однако имеют

недостатки: повышенная энергоемкость, дороговизна металлических мишеней, повышенная вредность побочных продуктов.

Технология прошивного соединения слоев нашла применение в производстве пакетов материалов для швейных изделий и заключается в соединении двух и более текстильных полотен нитками на стегальнопрошивных машинах [61, 62].

В УО «Витебский государственный технологический университет» разработана технология формирования новых слоистых текстильных композиционных материалов декоративно-отделочного назначения – текстильные настенные покрытия. Принципиальная схема формирования слоистого текстильного материала клеевым способом с использованием тканых полотен представлена на рисунке 1.13.

Верхнее полотно (декоративная ткань) 1 и нижний слой (основа — бумага или флизелин) 2 подаются в рулонную установку 3, пройдя которую, они через направляющие валики 4 подаются в узел нанесения клея 5. Клей наносится на полотно основы валковым способом. По ходу полотна происходит склейка двух слоев системами прижимных валиков 6. Полотно слоистого текстильного материала поступает в сушильную камеру 7 и проходит узел обрезки кромки 8. Затем полотно слоистого текстильного материала подается на автомат 9 для размотки готового материала в потребительские рулончики 10.

Реализация принципиальной схемы формирования слоистых материалов декоративно-отделочного текстильных назначения производственных условиях осуществлялась В на предприятиях обойная фабрика» холдинга «Белорусские обои» («Минская «Гомельобои»).

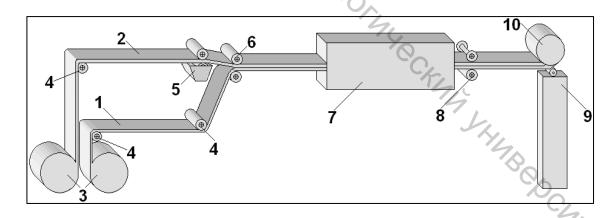


Рисунок 1.13 — Принципиальная схема формирования слоистых текстильных материалов клеевым способом: 1 — тканое полотно основы; 2 — полотно основы; 3 — рулонная установка;

- 4 направляющие валики; 5 узел нанесения клея; 6 система прижимных валиков; 7 сушильная камера; 8 узел обрезки кромки;
 - 9 автомат для размотки в потребительские рулончики;
 - 10 готовый слоистый текстильный материал в рулончиках

Для этого использовалось существующее оборудование для выпуска дуплексных обоев — технологическая линия «Ламипринт-5» фирмы «Нексус Технолоджи Корпорейшн» (Великобритания), созданная на базе узлов импортного оборудования и отдельных узлов склеивающих линий «Дуплекс», в том числе с использованием сушильных камер «Брэдбери».

При использовании в качестве декоративного слоя тканей разреженных структур возможно нанесение на полотно основы рисунка либо фона. Рисунок наносится на флексографической машине способом высокой прямой ротационной печати – флексографской печатью. С помощью валика, взаимодействующего с ракелем, формы покрывают жидкой быстровысыхающей печатной краской и переносят ее на полотно основы. В случае нанесения на поверхность полотна основы фона, окраска полотна основы осуществляется только бумагокрасильных машинах лакокрасочной секции. Нанесение краски на поверхность полотна основы при этом способе осуществляется валковым красконаносным устройством.

Нанесение полимерного связующего на подготовленное полотно основы осуществляется валковым способом. Излишки нанесенного связующего снимаются раклей.

Для соединения и фиксации тканого полотна на поверхности основы предназначена секция прижимных валиков. полотен происходит с помощью пары валиков. Верхний валик имеет эластичное покрытие из синтетического материала – нитрильного каучука с добавлением серы для снижения электризации и усиления электропроводности. Нижний валик изготовлен из стали. Давление сжатия влияет на прочность адгезионного соединения. С одной увеличении усилия сжатия площадь стороны, при соединяемых поверхностей увеличивается, с другой – возможно образование «голодных» спаек [11, 61], а также выдавливание полимерного связующего на декоративный слой (тканое полотно) слоистого материала.

Сушка является важной операцией формирования слоистого текстильного материала. От выбора способа термообработки и рациональных параметров зависит качество готового материала. При определении оптимальных режимов термообработки пакета материалов, необходимо учитывать разницу в их тепловых и деформационных свойствах. Поэтому математическое моделирование процесса сушки и термообработки слоистых текстильных материалов является важной задачей исследования. После сушки, пройдя узел обрезки кромки, слоистый текстильный материал разматывается в готовые потребительские рулончики.

Для придания слоистым специфических свойств (водонепроницаемость, огнестойкость, устойчивость к действию

светопогоды и трению), а также для сообщения тканям, служащим верхним слоем, различных эффектов (шелковистой отделки, отделка типа «лаке», металлизированной поверхности и др.) используется каландрирование. При необходимости специальной отделки на линии устанавливаются каландры, в состав которых входят вертикально расположенные валы. В зависимости от вида получаемой отделки валы могут быть стальными, стальными с гравюрой или с эластичным покрытием. Нанесение грязе-, водоотталкивающей отделки CKAM OCKA осуществляется следующим образом (рис. 1.14).

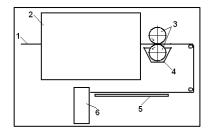


Рисунок 1.14 – Схема нанесения грязе-, водоотталкивающей отделки слоистых текстильных материалов: 1 – слоистый материал;

2 – сушильная камера; 3 – нагретые каландры; 4 – ванна с воском; 5 – стол-накопитель; 6 – автомат для формирования рулончика

Слоистый текстильный материал 1 проходит сушильную камеру 2, затем на лицевую сторону – тканое полотно с помощью нагретого каландра 3 наносится восковый состав. Температура поверхности каландров составляет 60-65 0 C (температура плавления воска). Затем слоистый текстильный материал с нанесенным покрытием охлаждается.

Для придания шелковистой отделки слоистый текстильный материал 1 проходит направляющие ролики 2 и каландры 4 и 5, закрепленные на станине 3 (рис. 1.15). Каландр 5 имеет на поверхности THE POCH TO A гравюру. Каландры обогреваемые.

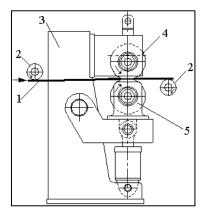


Рисунок 1.15 – Каландры для осуществления шелковистой отделки: 1 – слоистый текстильный материал; 2 – направляющий ролик; 3 – станина; 4 – верхний каландр; 5 – нижний каландр с гравюрой

При прохождении слоистого текстильного материала через обогреваемые валы, тканое полотно соприкасается с каландром, имеющим гравюру в виде наклонных параллельных штрихов, которые отпечатываются на ткани и придают эффект серебрения, изменяя светопреломление от ее поверхности.

Выбор оптимальной температуры поверхности валов зависит от тепловых свойств составляющих слоистый текстильный материал компонентов. При этом необходимо предотвратить усадку каждого из слоев, изменение свойств полимерного связующего и уменьшение адгезионной прочности соединения.

1.2.3 Формирование слоистых ворсовых текстильных материалов

Значительное место ассортименте слоистых текстильных материалов композиционных декоративно-отделочного занимают ворсовые покрытия, В частности флокированные. галантерейных, материалы Флокированные используются ДЛЯ обивочных, обувных, швейных целей, а также создания объемных ворсовых материалов игрушек, перчаток с внутренним ворсовым слоем и др.

формирования Известным способом слоистых ворсовых электрофлокирование 64, [62,63, 65]. материалов является Электрофлокированние ЭТО ориентированное осаждение электрическом поле относительно коротких волокон (0,3-1,0 мм) на материал основы, предварительно нанесенным полимерным Флок – это мелко-порубленные или связующим (клеем) [64]. нарезанные текстильные (мононити) волокна различного происхождения (натуральные или химические), отличающиеся по длине, цветам, толщине.

Последовательность технологических операций и принципиальная схема электрофлокирования рулонных материалов представлены на рисунках 1.16 и 1.17 соответственно.

Полотно основы 1 проходит в электрическом поле, которое создается между электродами 2 и 4 с помощью источника высокого напряжения 5; в этой зоне осуществляется зарядка и ориентация волокон 3. Термофиксация ворсового покрытия осуществляется в сушильной камере 6. В состав линии могут входить дополнительные устройства, как например, ракельное устройство для нанесения влаги и гладильные обогреваемые и прессующие валки, установленные перед клееносящим устройством, предназначенные для влажно-тепловой

обработки основы флокируемого материала с целью исключения имеющихся на поверхности неровностей [65].

Нанесение ворса может осуществляться непрерывным способом (рулонные материалы), периодическим способом (штучные изделия). Различают так же прямое флокирование и флок-трансфер.

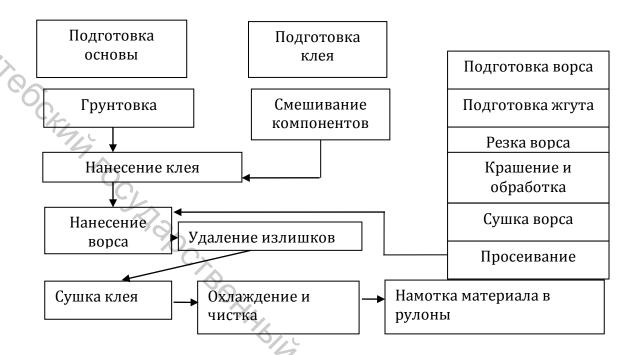


Рисунок 1.16 — Последовательность технологических операций электрофлокирования

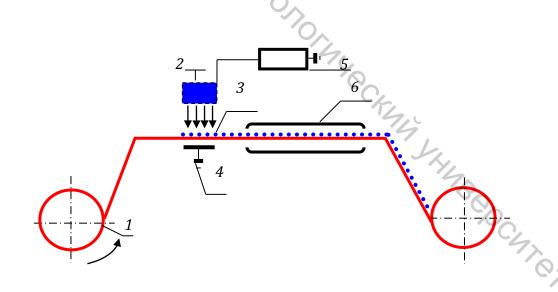


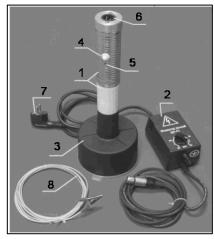
Рисунок 1.17 — Принципиальная схема электрофлокирования: 1 — основа; 2 — верхний электрод; 3 — заряженное волокно; 4 — нижний электрод; 5 — источник высокого напряжения; 6 — сушильная камера

Независимо OT способа, технология электрофлокирования включает подготовку основы (подложки), нанесение полимерного (клеевой пленки), нанесение связующего ворса (флока) электростатическом поле, в котором флок заряжается, разгоняется и внедряется вертикально в пленку полимерного связующего, затем следует сушка. Для нанесения флока используется либо ручной флокатор, либо стационарные флокмашины.

Флокатор ручной ФР-01 [66], представленный на рисунке 1.18, предназначен для электростатического флокирования изделий ручным способом, различными видами флока. Флокатор состоит из генератора высоковольтного 1, адаптера сетевого 2, бункера 3. Флок засыпается в находится высоковольтный бункер, внутри которого осуществляющий зарядку флока. Дозирование количества подаваемого флока на изделие регулируется интенсивностью встряхивания флока в ΦP-01. бункере a также изменением входного напряжения высоковольтного генератора посредством регулятора сетевого адаптера. Оптимальное расстояние от флокируемого объекта флокатора варьируется в диапазоне от 50 до 300 мм.

Для флокирования листовых материалов (бумага, картон, пластик и др.) применяется установка типа УФЛМ-3, представленная на рисунке Отличительными особенностями 1.19 ЭТОГО оборудования являются: двухсторонний вакуумный стол; система подъема стола с защитой от перекосов; система поворота стола.

В современных технологиях электрофлокирования используются следующие виды флока (табл. 1.1) [66]:



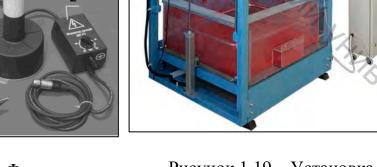


Рисунок 1.18 – Флокатор ручной

200 /A /O/ Рисунок 1.19 – Установка для флокирования листовых материалов

обладает хорошей полиамидный ворс износостойкостью и незначительно заминается при механическом воздействии, сферы напольных покрытий технологического применения OT

использования до сплошного флокирования на текстильных и бумажных основах;

Таблица 1.1 – Свойства флока

Волокно	Длина, мм	Толщина, dtex
Полиамидное	0,3–2	0,9–44
Полиэфирное	0,5–1	1,3–6,7
Вискозное	0,3–4	0,55-0,9
Хлопковое	_	1–4
Углеродное	_	1,7–5
Полипропиленовое	_	3,3–70

- полиэфирный ворс, схожий по свойствам с полиамидным, но отличается гидрофобностью, что усложняет процесс электростатической обработки флока, и узкой цветовой гаммой, при этом лучшей светостойкостью;
- вискозный ворс заметно деформируется при механической нагрузке, имеет низкую износостойкость, сферы применения ограничены: производство упаковки, игрушек, обоев, стеновых панелей, а также при флокировании некоторых текстильных и нетканых материалов;
- ворс из молотого хлопкового волокна обладает очень низкой износостойкостью, высокой гидрофильностью, используется для создания поверхности типа «замша», изготовления недорогой упаковки;
- ворс из углеродного волокна не горит, не деформируется при механических нагрузках до 400 0 C, выпускается только черного цвета, промышленного применения пока не нашел;
- полипропиленовый флок имеет низкую температуру плавления, окрашивается только в массе, уступает полиамидному по устойчивости к механическим воздействиям, легко утилизируется, применяется для ковровых покрытий, отделки верхней одежды

Полиакриловое волокно обладает рядом преимуществ, но является сложным для использования в технологии электрофлокирования.

Фактура флокированной поверхности определяется длиной и толщиной ворса, степенью извитости ворсинок, поверхностным заполнением и видом предварительной обработки волокнистого материала.

Соотношение между длиной и толщиной волокон для ворсового покрытия не может быть произвольным. Необходимо исходить, прежде всего, из назначения материала, которое определяет длину ворса, и уже по этой длине подбирать соответствующую толщину волокон. Из практики отечественных и зарубежных исследований известны установившиеся соотношения между длиной и толщиной ворса при

формировании ворсового покрытия способом электрофлокирования [63].

Выбор полимерного связующего для формирования ворсового покрытия осуществляется с учетом свойств волокон и материала основы, при этом необходимо обеспечить прочное закрепление ворса, а в случае рулонных материалов сохранить эластичность. Кроме того, к полимерному связующему для электрофлокирования предъявляются требования по электропроводности, времени высыхания, температуре сушки, используемому растворителю.

Интересное решение задачи формирования прочного адгезионного соединения ворса и материала основы предложено авторами патента [67]. Используется ворс из поливинилспиртового волокна – винола. Высокая адгезия поливинилспиртового (ПВС) ворса к клеям за счет частичного растворения поверхности волокна в клее при отверждении последнего. Частично клей заполняет капилляры ПВСволокна за счет осмотического поднятия, и, таким образом, образуется единая система клей-волокно, адгезия в которой очень велика. За счет капиллярного заполнения объема ворсинок и частичного растворения поверхности погруженного в клей конца ворсинок, разрушение этой системы после отверждения может произойти только когезионно, на что требуется большое усилие.

Для нанесения флокированных рисунков на поверхности различных материалов, в том числе и многоцветных, используется трафаретная печать флоком. Суть способов заключается в нанесении клеевого рисунка по шаблону с последующим флокированием через трафареты, шаблоны ворсом разных цветов [63, 68]. При этом каждый ворс должен заполнить только свою часть рисунка с четким соблюдением границ. Недостатком этого способа является то, что для обеспечения четких границ цветов шаблоны должны располагаться на минимальном расстоянии от клеевой поверхности (1÷2 мм), а малейшее смещение в горизонтальной плоскости (на 0,1–0,2 мм) ведет либо к появлению незаполненных промежутков, либо к нежелательному наложению цветов.

Авторами [68] предложено исключить указанный выше недостаток путем последовательного нанесения ворса разных цветов в неоднородном электрическом поле, разделенном по вертикали на две зоны с напряженностью электрического поля на поверхности материала, задаваемой для каждого нанесения в пределах от 1 до 8 кВ/см.

Новая технология Double flock (двойное флокирование) считается одной из самых совершенных процессов производства мебельных тканей. В отличие от обычного флокирования, процесс производства флока на флоке состоит из двух этапов: в первую очередь на ткань наносят тонкий ворсовый слой высотой меньше миллиметра, а после

этого на поверхность ткани наносится основной ворс, высота которого варьируется от 1,5 до 2 мм. Использование ворса разной высоты придает двойному флоку объемную фактуру и повышенную мягкость.

Таким образом, способ электрофлокирования позволяет создавать декоративное ворсовое покрытие из натуральных и химических волокон на различных материалах и штучных изделиях, однако имеет следующие недостатки:

- низкая производительность при формировании рулонных материалов;
- нестабильность ворса (флока), изменяет свои технологические свойства при незначительном изменении влажности и температуры;
- использование специального оборудования высокого напряжения.

Наряду с декорированием флокирование придает материалу дополнительные потребительские свойства: звукоизоляцию теплоизоляцию, влагопоглощение [69].

В качестве альтернативного способа формирования ворсового УО «Витебский государственный технологический университет» разработана и запатентована [70, 71, 72, 73] технология нанесения коротких волокон (коротковолокнистых отходов) на материал основы или штучные изделия потоком сжатого воздуха (аэродинамическое формирование). Независимо от вида материала, рулонный штучное изделие или материал, технология аэродинамического нанесения состоит ИЗ основных операций, представленных на рисунке 1.20.

формирования Технологическая схема слоистых ворсовых материалов аэродинамическим способом, включающая подготовительные операции и процессы формирования волокнистого покрытия, представлена на рисунке 1.21. Линия состоит из узла аэродинамического устройства состава, нанесения клеевого сушильной камеры. Полотно основы 1 сматывается с рулона поступает в узел нанесения клея 3, где смачивается клеевым составом, затем полотно основы попадает в зону аэродинамического напыления, волокнистых которая включает узел дозирования частиц 4 аэродинамическую форсунку 5.

Волокнистые частицы, подаваемые из дозирующего бункера при помощи шнека через пневмоинжекционный патрубок, силой сжатого воздуха, подаваемого через штуцер, попадают в аэродинамическую форсунку, образуя воздушно-волокнистую смесь. Форсунка, имеющая сложную конфигурацию распыляющего диффузора (рис. 1.21), распределяет волокнистые частицы по всей ширине полотна основы, образуя ворсовое покрытие 6.



Рисунок 1.20 – Технология формирования слоистого текстильного материала (ворсового) аэродинамическим способом

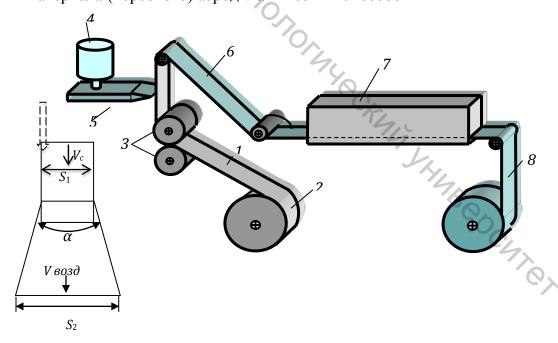


Рисунок 1.21 – Технологическая схема формирования рулонных слоистых ворсовых материалов с использованием аэродинамической форсунки

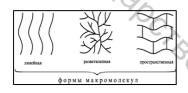
Заключительными и обязательными операциями технологии формирования текстильных композиционных материалов является сушка и термообработка. От правильности их организации зависят свойства готовых материалов и изделий. Поэтому важным этапом при разработке технологии формирования новых текстильных композиционных материалов является определение основных закономерностей процессов сушки и термообработки, позволяющих установить зависимость оптимальных режимов от структуры, физико-химических и теплофизических свойств используемых волокнистых компонентов и полимерных связующих.

Количество влаги, поглощенной текстильным материалом при формировании композита, зависит от его общей пористости. Поэтому рассмотрение теоретических положений процессов сушки и термообработки целесообразно начать с решения задач моделирования Ran.
U nonon.
Charles And Total Colonia Coloni и проектирования капиллярно-пористой структуры используемых текстильных нитей и полотен.

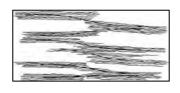
2 КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТАЯ СТРУКТУРА ТЕКСТИЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Волокнистые материалы относятся к коллоидным капиллярнопористым телам. Их структура является многоуровневой, включающей (рис. 2.1): молекулярный (макромолекулы), надмолекулярный (фибриллы), микроуровень (волокна) и макроуровень (волокнистый материал – пряжа, комплексная нить, ткань, трикотаж или другой текстильный материал из нитей) [16]. На каждом уровне структура формой, геометрией расположения характеризуется элементов, их размерами взаимодействием элементов структуры, гетерогенностью.

Первый уровень – молекулярный

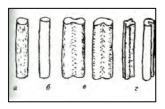


Второй уровень – фибриллярный

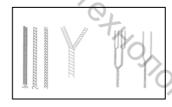


Третий уровень – волокно

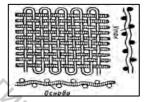
Четвертый уровень – текстильный материал



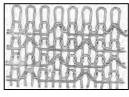
- а капроновое;
- 6 лавсановое;
- в нитроновое;
- г хлориновое



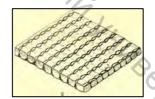
пряжа, комплексная нить



ткань







нетканый материал

Рисунок 2.1 – Структура текстильных материалов

Первый структурный уровень – строение макромолекул волокнообразующих полимеров. Второй структурный уровень – надмолекулярный (фибриллярный). Параллельно расположенные макромолекулы образуют фибриллы, состоящие из чередующихся аморфных и кристаллических областей. Третий структурный уровень –

микроструктура волокна, которая характеризуется размером и формой поперечного сечения. Четвертый структурный уровень — текстильный материал — комплексная нить, пряжа, ткани, трикотажные полотна, нетканые материалы. Текстильные материалы различаются волокнистым составом, расположением волокон и взаимодействием между ними и, соответственно, свойствами. Сложность структуры волокон и волокнистых материалов (наличие уровней масштаба: 10^{-5} м — волокна; 10^{-3} м — нити, пряжа; 10^{-1} м — ткань, трикотажные полотна, нетканые материалы) приводит к сложности моделирования структуры, и, соответственно, необходимости упрощающих предположений.

В работе использован модульный подход к моделированию текстильного материала и принцип гомогенизации [74], обобщающий свойства на нижнем уровне при переходе на верхний. Капиллярнопористая структура волокнистого материала складывается микроструктуры вещества волокна, из которого оно состоит, и из макроструктуры волокнистого материала. Диаметр указанных различного структур совершенно порядка. текстильного материала представляет собой микрообъем среды либо ограниченный (замкнутая пора), либо соединяющийся несколькими аналогичными, близко расположенными микрообъемами. По размеру поры классифицируются [75]: макропоры > 10 мкм; капиллярные поры >1 мкм; контракционные поры $-1...10^{-2}$ мкм. В отличие от поры, проводящий капилляром является канал сложной произвольного сечения, имеющий непроницаемые твердые стенки.

Проникновение связующего вглубь капилляров, имеющихся в отдельных волокнах, в особенности за то короткое время, в течение которого происходит пропитывание, не может быть значительным. Несоизмеримо большее значение для практики имеет проникновение связующего в пространство между волокнами или нитями текстильного материала. Известно [76], что при пропитывании имеют значение поры и капилляры, диаметр которых больше 10–15 мкм.

Таким образом, текстильный материал содержит капилляры и поры различного радиуса, которые не имеют круглого сечения, заполняется полимерным связующим И газами. волокнистых материалов содержатся тупиковые поры и капилляры, в воздух, которых защемлен препятствующий заполнению их Капиллярная полимерным связующим. структура текстильных материалов не является постоянной и зависит от условий, в которых находятся эти материалы. В данной работе рассмотрим капиллярную структуру текстильного материала, сформированную в процессе прядения и ткачества, считая ее постоянной [77].

При создании упрощённой модели пористой структуры текстильного материала, удобной для практического использования, будем учитывать влияние следующих факторов (рис. 2.2).

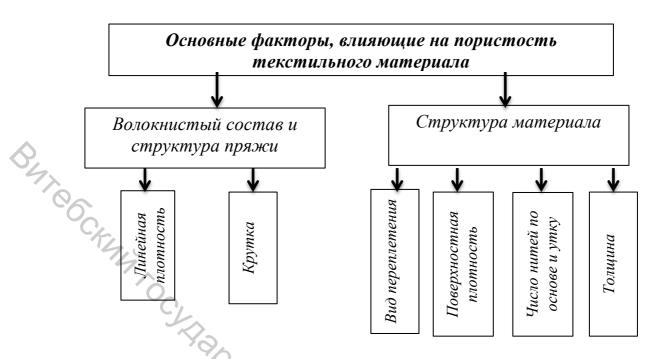


Рисунок 2.2 — Факторы, влияющие на пористость текстильных материалов

2.1 Имитационное моделирование пористой структуры текстильной нити

Структура пряжи или нити представляет собой множество волокон или филаментов различной формы, которые заполняют область круга без четко выраженных границ. Структура поперечного сечения пряжи и ее компьютерное моделирование изучались многими отечественными и зарубежными учеными, которыми предлагаются различные алгоритмы моделирования поперечного сечения пряжи для конкретных областей применения [74, 75, 76, 78, 79, 80]. Рассмотренные указанных работах алгоритмы неудобны для моделирования капиллярно-пористой структуры определения пористости И текстильных материалов, используемых для формирования композитов.

Кроме того, при решении прикладных задач нет необходимости с высокой точностью воспроизводить структуру волокнистого материала, поэтому при моделировании возможно принять некоторые допущения. Моделируя пористую структуру волокнистого продукта для формирования текстильного композиционного материала, принято круглое сечение волокон случайного диаметра $d_{\rm e}$, генерируемых в пределах круга, задающего границы моделируемого сечения пряжи, равного диаметру. Генерация волокон (филаментов) продолжается до

тех пор, пока количество фактически сгенерированных волокон N_f не достигает диаметра пряжи или комплексной нити d_p . После генерации N_f числа волокон контролируется условие отсутствия пересечения отдельных волокон (филаментов).

Создание имитационной модели пористой структуры волокнистого материала целесообразно начать с решения вопросов расположения волокон или элементарных нитей в пространстве, взаимодействия между отдельными волокнами, определения геометрических свойств волокнистого материала, а также случайного изменения свойств материала по длине и площади, т. е. неровноту. Пористость пряжи и нитей зависит от линейной плотности, диаметра пряжи или нитей, диаметра элементарных волокон или филаментов, крутки.

Моделирование пористой структуры волокнистого материала рассмотрим на классическом примере — пряжи кольцевого способа прядения с заданной линейной плотностью, круткой, диаметром. В пряже волокна располагаются по винтовым линиям переменного шага и радиуса (рис. 2.3). Каждое волокно по своей длине лежит не в одном слое пряжи, а в ряде слоев, переходя от центра пряжи к периферии и обратно.

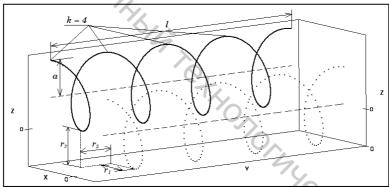


Рисунок 2.3 – Модель волокна

Волокнистый материал в модели состоит из заданного количества волокон, которое можно определить, зная линейную плотность, их средний диаметр и плотность вещества. Каждое волокно описывается набором из конечного числа точек в пространстве. Расположение точек каждого волокна в пространстве задается параметрическим уравнением винтовой линии [79, 81]:

$$\begin{cases} y = b \cdot t \\ x = a \cdot \sin(t) \\ z = a \cdot \cos(t), \end{cases}$$
 (2.1)

где x, y, z – координаты в пространстве; a – радиус винтовой линии; b/a– угловой коэффициент винтовой линии; *t* – параметрическая переменная.

Для того чтобы расстояние между точками не зависело от параметров винтовой линии (диаметр, количество витков, длина), использована формула длины дуги винтовой линии [82]:

$$L = l/b \cdot \sqrt{a^2 + b^2},\tag{2.2}$$

 $\Gamma_{
m Ze}\,L$ – длина дуги винтовой линии; l – длина проекции винтовой линии на ось у.

Для моделирования винтовой линии нужно задать длину проекции l на ось y, количество витков k на длине l, радиус a и шаг дискретизации d. Тогда b можно найти по формуле:

$$b = l/(2 \cdot \pi \cdot k). \tag{2.3}$$

 $b = l/(2 \cdot \pi \cdot k).$ Учитывая (2.2), описать винтовую линию радиуса количеством витков k, длиной вдоль оси y, равной l, и шагом дискретизации *d*, можно следующими параметрическим уравнением:

$$\begin{cases} t = \frac{t_2}{\sqrt{a^2 + b^2}} \\ y = b \cdot t \\ x = a \cdot \sin(t) \\ z = a \cdot \cos(t) \end{cases}$$
 при $t_2 \in [0, L]$ с шагом d . (2.4)

Для моделирования отрезка волокнистого материала необходимо сгенерировать несколько волокон со случайными параметрами:

- радиус *a* из диапазона $[0, d_p/2)$;
- количество витков k из диапазона [0, K*l/1000];
- смещение витков вдоль оси y, равное r_2 из диапазона $[-\pi, \pi]$;
- смещение волокна вдоль оси x, равное r_1 из диапазона [-(d_p -2*a)/2, (d_n-2*a) /2];
- смещение волокна вдоль оси z, равное r_3 из диапазона [- $(d_p$ -a)/2, $(d_{p}-a)/2$].

Тогда формулы (2.4) примут вид:

$$\begin{cases} t = \frac{t_2}{\sqrt{a^2 + b^2}} \\ y = b \cdot t \\ x = a \cdot \sin\left(t + \frac{r_2}{b}\right) + r_1, \text{ при } t_2 \in [0, L] \text{ с шагом } d. \\ z = a \cdot \cos\left(t + \frac{r_2}{b}\right) + r_3 \end{cases}$$
 (2.5)

Необходимой линейной плотности, диаметра и равномерного распределения волокон по толщине волокнистого материала можно добиться, задавая диапазоны изменения случайных величин в модели.

На рисунке 2.3 изображено волокно, смоделированное согласно формулам (2.3), (2.5). Количество витков k выбрано равным 4. Показаны смещения r_1 , r_2 , r_3 волокна относительно начального положения. Для каждого волокна эти смещения, а также радиус a, выбираются случайным образом.

После генерации N_f числа волокон контролируется условие достижения линейной плотности модели пряжи (комплексной нити) T_{M} , значения фактической линейной плотности T_f , а также отсутствие пересечения отдельных волокон (филаментов).

После того, как сгенерировано N_f число волокон (филаментов) со случайным расположением внутри отрезка пряжи (нити), возможно их пересечение в пространстве, так как в процессе добавления каждого нового волокна не учитывается положение ранее добавленных. Наложение волокон (филаментов) негативно влияет на точность моделирования капиллярно-пористой структуры и расчет пористости волокнистого материала. Для корректировки положения волокон в применен метод пространстве моделирования взаимодействия элементарных отрезков волокон так, что соседние элементарные отрезки одного и того же волокна притягиваются, а элементарные отрезки разных волокон отталкиваются друг от друга. Для реализации притягивания элементарных отрезков одного волокна реализован метод скользящего среднего по трем соседним элементарным отрезкам.

Для реализации отталкивания элементарных отрезков различных волокон сначала для каждого отдельного отрезка находятся элементарные отрезки, принадлежащие другим волокнам, в пределах окрестности, равной диаметру отрезка. Затем вычисляются вектора воздействий этих отрезков на рассматриваемый. Элементарный отрезок перемещается в направлении равнодействующего вектора. Этот процесс повторяется несколько раз, до тех пор, пока перемещение отрезков не замедлится ниже пороговой величины.

Таким образом, алгоритм укладки волокон состоит из следующих этапов:

Для каждого волокна просматриваем точки по порядку.

- если точка первая или последняя в волокне, ее координаты не изменяются;
- для каждой i-й точки волокна, кроме первой и последней, находим расстояния L до всех j-х точек других волокон;
- если расстояние между точками i и j меньше суммы R радиусов волокон, к которым относятся рассматриваемые точки, то вычисляем вектор V воздействия j-й точки на i-ю по следующим формулам:

$$V_x = \left(x_i - x_j\right) \frac{R}{L} + x_j,\tag{2.6}$$

$$V_{y} = \left(y_{i} - y_{j}\right) \frac{\tilde{R}}{I} + y_{j}, \tag{2.7}$$

$$V_z = (z_i - z_j)\frac{\vec{R}}{L} + z_j, \tag{2.8}$$

— находим сумму SumV всех векторов V (равнодействующий

$$x_i = \frac{x_{i-1} + x_i + x_{i+1} + sumV_x}{3 + n \ sumV},\tag{2.9}$$

$$y_i = \frac{y_{i-1} + y_i + y_{i+1} + sumV_y}{3 + n \ sumV},\tag{2.10}$$

$$z_{i} = \frac{z_{i-1} + z_{i} + z_{i+1} + sumV_{z}}{3 + n \ sumV},$$
(2.11)

жто $_{\mathbf{F}}$, — вычис.. $x_i = \frac{x_{i-1} + \lambda_i}{3 + n \ sumv}$ $y_i = \frac{y_{i-1} + y_i + y_{i+1} + sumV_y}{3 + n \ sumV},$ $z_i = \frac{z_{i-1} + z_i + z_{i+1} + sumV_z}{3 + n \ sumV},$ Темен прои - пересчет координат каждой точки происходит на каждом шаге

Процесс укладки волокон продолжается до тех пор, пока наибольшее перемещение точки не станет меньше заданной малой величины, либо пока не будет достигнуто заданное количество шагов. После завершения процесса укладки волокон и моделирования расчет истинной пористости модели волокнистого проводится материала, т.е. объем пор, содержащихся в определенном объеме пряжи или комплексной нити [83]:

$$P_u = \left(1 - \frac{V_e}{V_o}\right) \cdot 100\% \,, \tag{2.12}$$

где P_u — истинная пористость модели; $V_e = \Sigma \pi \frac{{d_e}^2}{4} L$ — суммарный объем вещества волокон, м³; $V_o = \pi \frac{d_p^2}{4} l$ – общий объем пряжи (нити), м³.

При моделировании пористой структуры текстильной нити заданной линейной плотности необходимо знание поперечных размеров – диаметра. Известные формулы для расчета диаметра пряжи [84] не учитывают изменения объемной плотности в зависимости от линейной плотности волокон (филаментов), степени скрученности, в результате расчетные значения геометрических и структурных свойств пряжи не экспериментальными. Поэтому поставлена совпадают c

определения математических моделей для расчета диаметра пряжи (комплексной нити), учитывающих изменения объемной плотности в зависимости от линейной плотности и степени скрученности.

2.1.1 Исследование диаметра текстильных нитей, используемых для формирования текстильных композиционных материалов

Материалов

Известна формула для определения диаметра пряжи или нити на основании линейной плотности и объемной массы, которая различается для каждого вида волокна [84]:

$$d_p = 0.0357 \cdot \sqrt{\frac{T}{\delta}},\tag{2.13}$$

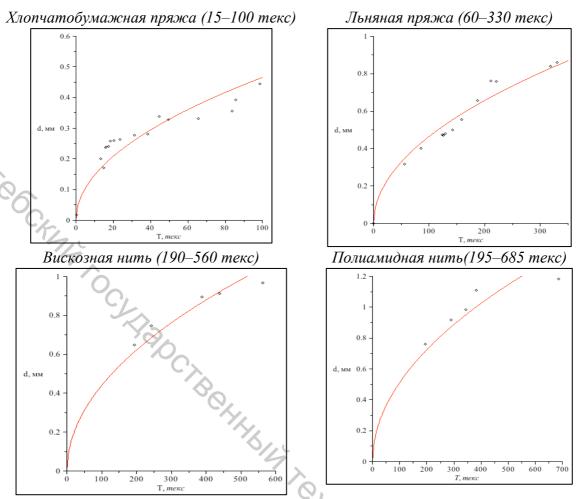
где d_p — расчетный диаметр пряжи (нити), мм; T — линейная плотность пряжи (нити), текс; δ — объемная плотность, г/см³.

Используемое в формуле (2.13) значение объемной плотности δ определяется из литературных источников и имеет постоянное значение, зависящее только от вида волокна. Причем значения объемной массы для пряжи или нити одного состава имеют значительный разброс [85].

результате экспериментальных исследований получены математические модели зависимости диаметра пряжи нитей, используемых при формировании тканых полотен для текстильных композиционных материалов, от линейной плотности (табл. 2.1). исследования, также результаты экспериментальных данных, проведенные в системе компьютерной алгебры Maple, представлены в приложении А. На рисунке 2.4 изображены зависимости диаметра используемых пряжи и комплексных нитей от линейной плотности и экспериментальные значения измерения диаметра цифровым методом.

Таблица 2.1 – Результаты расчета объемной плотности

Наименование вида пряжи (нити)	γ, г/cm ³	δ, г/cm ³	Модель
Кардная хлопчатобумажная	0,9-1,3	0,5873	$d_p = 0.0357\sqrt{T/0.5873}$
пряжа кольцевого способа			
прядения			
Льняная пряжа сухого способа прядения (кольцевая)	1,40	0,6704	$d_p = 0.0357\sqrt{T/0.6704}$
Вискозная комплексная нить	1,5	0,6575	$d_p = 0.0357\sqrt{T/0.6575}$
Полиамидная комплексная нить	1,14	0,4855	$d_p = 0.0357\sqrt{T/0.4855}$



* точками изображены экспериментальные значения

Рисунок 2.4 – Зависимость диаметра текстильной нити от линейной плотности

Анализ расчетных и экспериментальных значений диаметра показывает, что относительная погрешность составляет 5-7 %, что позволяет использовать полученные математические модели для расчета диаметра при моделировании капиллярно-пористой структуры используемых пряж и комплексных нитей.

2.1.2 Расчет диаметра волокон (филаментов)

BOOCH TON Для расчета объема волокна (филамента) требуется знание его диаметра. Диаметр каждого филамента круглого сечения комплексных химических нитей является величиной постоянной и известной, определяемой из технического описания используемого ассортимента нитей.

Диаметр натуральных волокон в пряже не имеет одинакового значения, что необходимо учитывать при моделировании капиллярнопористой структуры пряжи.

Диаметр хлопкового волокна составляет 10–25 мкм, средний диаметр волокон хлопка составляет 20 мкм [77, 86]. Форма поперечного сечения волокон хлопка сильно варьируется, но большинство источников утверждает, что она не является круглой, а близка к эллипсовидной [86]. В отличие от хлопкового, диаметр льняного волокна в пряже может изменяться в более широком диапазоне 12–37 мкм. Авторы работы [77] предположили, что распределение диаметра льняных волокон подчиняется закону логнормального распределения. Функция плотности вероятности для логнормального закона выглядит следующим образом:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln x - \overline{x})^2}{2\sigma^2}}, \text{при } x > 0,$$
(2.14)

где x — значение случайной величины (диаметр волокна, мкм); \bar{x} — математическое ожидание случайной величины (диаметра); σ — среднеквадратическое отклонение случайной величины (диаметра).

Выбор логнормального закона распределения для моделирования диаметра элементарных волокон льна и хлопка обусловлен тем, что эта величина не может быть отрицательной, а логнормальный закон обладает соответствующим свойством. Для распределения моделирования элементарных волокон с диаметрами, распределенными по логнормальному закону распределения, проанализированы данные о диаметрах элементарных волокон льна и хлопка, представленные авторами работ [77, 86, 87]. Определены параметры распределения (математическое ожидание μ и среднеквадратическое отклонение σ) с помощью программного пакета Statistica и проверена гипотеза о Параметры логнормальном распределении выборки. выборки приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Параметры экспериментальных значений

Кол- во	Сред- нее, мкм	Доверите- льный интервал среднего	Мин.,	Макс., мкм	Стандартное отклонение	Доверительный интервал стандартного отклонения		
			X.	лопок				
1992	14,56	14,39–14,74	4,21	26,26	4,04	3,91–4,16		
лен								
148	15,98	15,32–16,63	9,20	34,00	4,05	3,64–4,57		

На рисунке 2.5 изображены гистограммы частот выборки и графики ожидаемого распределения. Для проверки гипотезы о логнормальном законе распределения использовался критерий согласия Пирсона χ^2 .

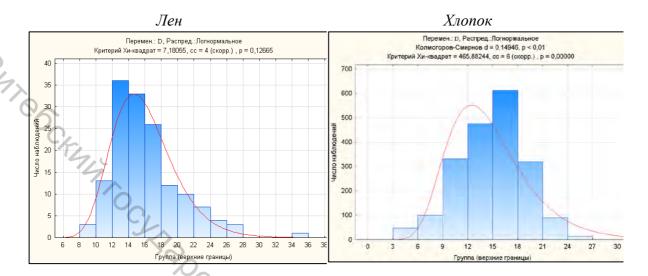


Рисунок 2.5 – График наблюдаемого и ожидаемого распределения диаметра волокон

Для генерации случайных величин, распределенных по логнормальному закону распределения, использован следующий алгоритм:

- генерируются две независимых псевдослучайных величины r и φ в диапазоне (0; 1] по равномерному закону распределения;
- используется преобразование Бокса Мюллера для получения случайной величины z, распределенной по нормальному закону с параметрами $\mu = 0$ и $\sigma = 1$, по формуле $z = cos(2\pi\varphi\sqrt{-2ln(r)})$;
- величина z преобразуется к величине ξ , распределенной по нормальному закону с заданными параметрами μ и σ по формуле $\xi = \sigma z + \mu$;
- величина ξ преобразуется к величине x_i , распределенной по логнормальному закону по формуле $x_i = e^{\xi}$.
- В результате применения вышеописанного алгоритма сгенерирован набор случайных значений с логнормальным законом распределения и параметрами μ и σ. Статистические параметры сгенерированного набора соответствуют значениям в таблице 2.2.

Таким образом, при имитационном моделировании структуры хлопчатобумажной и льняной пряжи приняты параметры масштаба логнормального распределения диаметра волокна μ и формы логнормального распределения диаметра волокна σ , представленные в таблице 2.3.

Блок-схема алгоритма имитации структуры и расчета текстильной нити представлена в приложении А.

Таблица 2.3 — Значения параметров масштаба логнормального распределения диаметра волокна μ и формы логнормального распределения диаметра волокна σ

Вид волокна	μ	σ
Хлопчатобумажная пряжа	2,6313	0,3283
Льняная пряжа	2,7422	0,2373

Разработанный алгоритм имитационного моделирования капиллярно-пористой структуры комплексных нитей, пряжи И используемых формировании при текстильных композиционных материалов, реализован в программном продукте, интерфейс которого представлен на рисунке 2.6 [88].

Результат применения описанного алгоритма укладки волокон к модели, представленной на рисунке 2.6, продемонстрирован на рисунке 2.7. Процесс укладки волокон обеспечивает отсутствие пересечения волокон в модели пряжи или нити, что повысит точность результатов моделирования структуры и расчета пористости.

Упрощенная имитационная капиллярно-пористой модель структуры пряжи и комплексных нитей учитывает изменение объемной зависимости от линейной плотности плотности скрученности, неровноту распределения волокон по их диаметру, неравномерную уплотненность волокнистого материала по сечению пряжи или нитей, позволяет оценить их пористость в зависимости от свойств. Разработанный алгоритм состава И модель использованы для моделирования капиллярно-пористой структуры тканей при формировании текстильных материалов клеевым способом и способом пропитки.

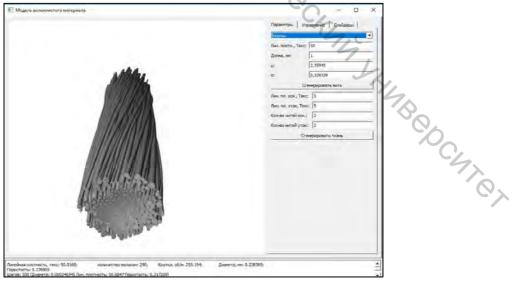


Рисунок 2.6 – Интерфейс программы для моделирования структуры и определения пористости текстильной нити



2.2 Имитационное моделирование капиллярно-пористой структуры тканей

В литературных источниках представлены различные способы моделирования структуры тканей [74, 77]. Необходимо отметить, что все они являются сложными, масштабными, универсальными и следовательно дорогостоящими. Рассматриваемые в работах [74, 77, 88, 91] способы моделирования являются закрытыми для использования и алгоритм их работы неизвестен.

В работах группы «Композиционные материалы», сотрудников Католического университета Лёвена (Бельгия), предложены методы прогнозирования строения свойств тканей, основанные на математических моделях механики ткани в свободном деформированном состоянии, разработаны специализированные пакеты прикладных программ для описания геометрии и численного решения краевых задач методом конечных элементов, позволяющие описать пространственное расположение нитей в ткани и рассчитывать на основе этого описания разнообразные геометрические характеристики ткани [88, 89, 90]. В указанных работах моделирование однослойных и многослойных текстильных полотен, в том числе тканей, проводится в среде WiseTex, которая отличается определенной степенью сложности используемого математического аппарата для решения прикладных задач.

учетом указанных причин, a также cотсутствием необходимости высокой степени универсальности модели и точности воспроизведения структуры используемых тканей, данном простой исследовании поставлена задача создания модели, позволяющей оценить важное для процесса пропитки геометрическое

свойство — общая пористость. При определении общей пористости ткани учтена пористость на уровне межволоконных промежутков пряжи или комплексной нити.

Общая пористость ткани характеризует долю всех промежутков между нитями, внутри нитей и волокон [92, 93]:

$$P_R = 1 - \frac{V_e}{V_{om}},\tag{2.15}$$

где V_{om} — суммарный объем ткани, м³.

При расчете общего объема пористого пространства в тканом полотне возможно сделать допущение — не учитывать форму пор и вид переплетения [93, 94].

При моделировании единичного объема тканого полотна учтены все допущения, используемые при моделировании пряжи (нити): вид волокнистого материала, линейная плотность, количество волокон, распределение диаметра волокна. Кроме того, заданы: количество нитей по основе и утку в моделируемом единичном объеме и характеристики нитей основы и утка. Для моделирования простейшего полотняного переплетения можно использовать предположение, что нити изгибаются в виде синусоид, характеристики которых зависят от количества и толщины нитей в моделируемом отрезке. При переплетении поперечное сечение нитей деформируется и уже не представляет собой окружность, что учитывается при построении модели.

Учитывая формулу (2.5), которая использовалась при моделировании каждой отдельной нити, для участка ткани в нее были внесены изменения, учитывающие изгибы нитей и искажения их поперечного сечения. Тогда параметрические уравнения для участка ткани примут вид:

поперечного сечения. Тогда параметрические уравнения для участка ткани примут вид:
$$t = \frac{t_2}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

$$y = b \cdot t$$

$$= a \cdot sin\left(t + \frac{r_2}{b}\right) + r_1 + \frac{l}{N_{\text{och}}} \cdot j \text{ , при } t_2 \in [0, L] \text{ с шагом } d$$

$$= \left(a \cdot cos\left(t + \frac{r_2}{b}\right) + r_3\right) \cdot C_{\text{och}} +$$

$$\vdash R_{\text{yT}} * \sin\left(\frac{y}{l} \cdot N_{\text{yT}} \cdot \pi + j \cdot \pi\right),$$

где N_{och} — количество нитей основы в моделируемом участке; j — порядковый номер моделируемой нити основы; C_{och} — коэффициент

отношения вертикального диаметра нити основы к горизонтальному диаметру (коэффициент искажения поперечного сечения); R_{vr} – вертикальный радиус нити утка; N_{ym} – количество нитей утка в моделируемом отрезке ткани; $\frac{l}{N_{\text{och}}} \cdot j$ – смещение каждой последующей нити вдоль оси X на половину периода изгиба для образования полотняного переплетения; $R_{\rm yr} * \sin\left(\frac{y}{l} \cdot N_{\rm yr} \cdot \pi + j \cdot \pi\right)$ — выражение для формирования изгибов нити с заданной амплитудой и периодичностью;

полотняного переплетения;
$$R_{\rm yT}*\sin\left(\frac{y}{l}\cdot N_{\rm yT}\cdot\pi+j\cdot\pi\right)$$
 — выражение для формирования изгибов нити с заданной амплитудой и периодичностью;
$$- \quad \text{для нитей утка:}$$

$$t = \frac{t_2}{\sqrt{a^2+b^2}}$$

$$x = b \cdot t - \frac{l}{N_{\rm och} \cdot 2}$$

$$y = a \cdot \sin\left(t+\frac{r_2}{b}\right) + r_1 + \frac{l}{N_{\rm yT}} \cdot j + \frac{l}{N_{\rm yT} \cdot 2}, \text{при } t_2$$

$$z = \left(a \cdot \cos\left(t+\frac{r_2}{b}\right) + r_3\right) \cdot C_{\rm yT} + \\ + R_{\rm och} * \sin\left(\frac{x}{l} \cdot N_{\rm och} \cdot \pi + (j+1) \cdot \pi\right),$$

$$\in [0,L] \text{ с шагом } d$$
 где $C_{\rm yT}$ — коэффициент отношения вертикального диаметра нити утка к горизонтальному диаметру; R_{och} — вертикальный радиус нити основы; j — порядковый номер моделируемой нити утка; — $\frac{l}{N_{\rm och} \cdot 2}$ — смещение нитей

где $C_{
m yr}$ – коэффициент отношения вертикального диаметра нити утка к горизонтальному диаметру; R_{och} — вертикальный радиус нити основы; j — порядковый номер моделируемой нити утка; — $\frac{l}{N_{\text{och}} \cdot 2}$ — смещение нитей утка вдоль оси х на четверть периода изгиба для совмещения изгибов нитей основы и утка; $\frac{l}{N_{\rm yr}\cdot 2}$ — смещение нитей утка вдоль оси у на четверть периода изгиба для совмещения изгибов нитей основы и утка.

Количество изгибов волокна соответствует количеству нитей основы N_{och} в моделируемом участке ткани.

имитационного моделирования ткани полотняного Алгоритм переплетения и определения общей пористости тканого полотна, представлен в приложении А.

представлен интерфейс рисунке 2.8 компьютерной программы, разработанной для моделирования капиллярно-пористой структуры тканого полотна [82, 95, 96]. В правой части окна осуществляется ввод исходных данных для моделирования: вид волокнистого состава, линейная плотность нитей основы и утка, длина моделируемого участка, количество нитей основы и утка.

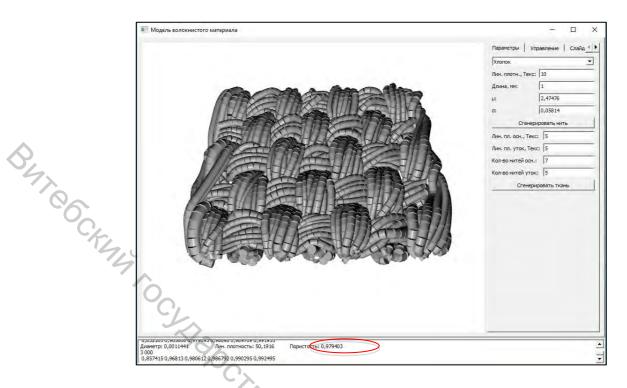


Рисунок 2.8 – Интерфейс программы для моделирования капиллярно-пористой структуры ткани

В нижней части окна показаны результаты расчета диаметра пряжи (нити) с учетом уточненного значения объемной плотности, показателя общей пористости ткани, а также распределения пористости по радиусу пряжи (нити).

Разработанные модели позволяют оценить влияние вида волокнистого состава, линейной плотности пряжи (нитей), плотности ткани по основе и утку на изменение пористости, прогнозировать на этапе проектирования способность к пропитке полимерным связующим в реальных условиях формирования, а также управлять технологическими режимами пропитки и склеивания.

2.3 Экспериментальное исследование капиллярно-пористой структуры текстильных материалов

Целью экспериментальных исследований являлось подтверждение возможности использования разработанного алгоритма моделирования капиллярно-пористой структуры текстильного материала и компьютерной программы для оценки общей пористости.

При моделировании определена истинная пористость – отношение истинного объема пор к объему образца пряжи (нити) и ткани. При пропитке суровых материалов происходит неполное

заполнение порового пространства из-за наличия тупиковых пор и пор, содержащих защемленный воздух. Объем незамкнутых пор, способных заполняться жидкостью, называют кажущийся объем пор (кажущаяся пористость).

Полнота заполнения порового пространства характеризуется коэффициентом пропитки, равным отношению кажущейся пористости к истинной. Для повышения коэффициента пропитки используют различные способы подготовки волокнистого материала с целью удаления защемленного воздуха и раскрытия ТУПИКОВЫХ предварительная щелочная отварка, вакуумирование, запаривание, плазменная обработка и другие. В данном исследовании использован способ предварительной щелочной отварки. Известно, что в процессе щелочной отварки число тупиковых пор и пор, содержащих защемленный воздух, снижается до 3 %.

Авторами работ [76, 97] для определения кажущейся пористости волокнистых материалов предложены методы погружения их в жидкость, полностью смачивающую волокно. В качестве такой жидкости выбраны бензол или этиловый спирт, показывающие краевой угол, близкий к нулю. Тогда расчет кажущейся пористости волокнистых материалов проводится по формуле:

$$P_{\rm K} = 1 - \frac{V_{\rm B}}{(V_{\rm K} + V_{\rm B})}, \tag{2.18}$$

где P_{κ} — кажущаяся пористость; $V_{\mathcal{H}}$ — средний объем впитанной жидкости, м³.

Предварительные экспериментальные исследования показали, что при использовании данного метода возникают затруднения из-за сложности точного определения объема впитанной жидкости. Поэтому для исследования пористости волокнистых материалов в данной работе предложена новая методика, описание которой представлено в приложении А.

исследования объема Для пор, способных заполняться жидкостью при пропитке, взяты пряжа и нити, используемые при формировании текстильных композиционных материалов, свойства которых представлены в таблице 3.4. Для повышения смачиваемости и достижения максимально возможного заполнения порового пространства жидкостью пряжа и нити предварительно подвергались Результаты щелочной отварке. расчета истинной пористости смоделированного волокнистого материала и экспериментального определения кажущейся пористости пряжи и нитей представлены в таблице 2.4.

Установлено, что отклонения значений истинной (теоретической) и кажущейся (экспериментальной) пористости, прошедших предварительную щелочную отварку пряжи и нитей, составляют не более 5–6 %, что подтверждает адекватность разработанного алгоритма моделирования капиллярно-пористой структуры и прогнозирования пористости [96].

Таблица 2.4 – Результаты определения истинной и кажущейся пористости пряжи и нитей

Линейная	Крутка, <i>К</i> ,	Диаметр,	Пористость, %					
плотность, T_f ,	кр/м	d_p , mm	теорет.	экспер.				
текс			(модель), P_u	P_{κ}				
Хлоп	чатобумажная	пряжа кольц	евого способа пряден	R ИI				
50	663	0,3293	39,33	37,37				
0	Льняная пряж	ка кольцевого	способа прядения					
87	391	0,4067	53,39	51,00				
317	225	0,7763	54,36	51,77				
	Полиам	иидная компл	ексная нить					
195	110	0,7154	59,27	56,94				
380	70	0,9987	56,22	56,33				
Вискозная комплексная нить								
195	140	0,6149	64,26	60,60				
390	70	0,8694	59,98	57,00				

Принято, что общая пористость тканого материала P_R слагается из [92, 97]:

- сквозной пористости (поры между нитями основы и утка) P_s ;
- внутренней пористости (межволоконные поры, находящиеся в промежутках между волокнами нитей основы и утка) P_u .

Сквозная пористость образуется при переплетении нитей основы и утка и может быть рассчитана по формуле [92]:

$$P_{s} = 1 - (E_{o} + E_{y} - 0.01E_{o} \cdot E_{y}), \qquad (2.19)$$

где E_o , E_y — заполнение тканого полотна вдоль нитей основы и утка, соответственно.

$$E_0 = \mu_0 \cdot \Pi_0 \,; \tag{2.20}$$

$$E_0 = \mu_0 \cdot \Pi_0, \tag{2.21}$$

где Π_o , Π_y – плотность по основе и утку, соответственно, нити на мм; μ_o и μ_y – максимальные размеры поперечного сечения нити в ткани вдоль большой оси при деформации, мм:

$$\mu_o = d_o \cdot \eta_{oz} \,; \tag{2.22}$$

$$\mu_{\mathbf{y}} = d_{\mathbf{y}} \cdot \eta_{\mathbf{y}z} \,, \tag{2.23}$$

где η_{or} , η_{ob} — коэффициент смятия нитей основы для сечения эллипс по горизонтальной и вертикальной оси, соответственно; η_{yr} η_{yb} — коэффициент смятия нитей утка для сечения эллипс по горизонтальной и вертикальной оси, соответственно.

и вертикальной оси, соответствение.

Согласно данным справочной литературы [98]: для вискозных η_{or} =1,27, η_{ob} =0,78, η_{yr} =1,28, η_{yb} =0,78; для полиамидных η_{or} =1,35, η_{ob} =0,67, η_{yr} =1,35, η_{yb} =0,7.

Внутренняя пористость P_u , образованная в промежутках между волокнами и элементарными нитями, определяется по формуле (2.12).

Размеры сквозной поры по направлению нитей основы a_o и утка a_v , мм, соответственно:

$$a_o = \frac{1}{\Pi_y} - \mu_y$$
; (2.24)

$$a_{y} = \frac{1}{\Pi_{o}} - \mu_{o}.$$
 (2.25)

Периметр сквозной поры, мм:

$$P = 2 \cdot a_o + 2 \cdot a_y \,. \tag{2.26}$$

Площадь сквозной поры, мм²:

$$S = a_o \cdot a_y \,. \tag{2.27}$$

Пористость пряжи или нитей, отнесенная ко всему объему ткани, равна:

$$P_o = P_{K} \cdot 0.01(E_o + E_{V} - 0.01E_o \cdot E_{V}). \tag{2.28}$$

Экспериментальное значение общей пористости ткани P_R определится как сумма пористости пряжи или нитей, отнесенной ко всему объему ткани P_o , и сквозной пористости ткани P_s .

Результаты теоретической и экспериментальной пористости тканых полотен из вискозных и полиамидных нитей представлены в таблице 2.5.

Как видно, отклонение экспериментальных данных от теоретических составляет не более 5–6 %, что подтверждает адекватность разработанной модели и возможность ее использования для прогнозирования кинетики пропитки, при проектировании капиллярно-пористой структуры пряжи, нити и ткани с заданными свойствами, а также выборе эффективных технологических режимов пропитки полимерными связующими.

Таблица 2.5 – Результаты определения пористости тканых полотен

Комбинированное переплетение 48 34 0,776 0,776 51,77 27,9 46,2 78,2 74,1 Комбинированное переплетение 80 62 0,715 0,999 56,94/ 54,7 3,9 61,7 58,6	Наименование переплетения образца	нит	Число Диаметр нитей на нитей, d_p , мм 10 см		Пористость, %					
Комбинированное переплетение 80 62 0,615 0,869 60,60/57,00 76,4 11,7 88,9 88,1 Тканое полотно из льняной пряжи Полотняное 48 34 0,776 0,776 51,77 27,9 46,2 78,2 74,1 Тканое полотно из полиамидных нитей Комбинированное переплетение 80 62 0,715 0,999 56,94/ 54,7 3,9 61,7 58,6		основы	утка	основы	утка	Р _к основа/ уток	P_o	сквозная, Р _S	теоретическая общая <i>Р</i> _R	экспериментальная общая
переплетение 80 62 0,615 0,869 60,60/57,00 76,4 11,7 88,9 88,1 Тканое полотно из льняной пряжи Полотняное 48 34 0,776 0,776 51,77 27,9 46,2 78,2 74,1 Тканое полотно из полиамидных нитей Комбинированное переплетение 80 62 0,715 0,999 56,94/ 54,7 3,9 61,7 58,6		T	каное п	олотно	из виско	зных нип	пей			
Полотняное 48 34 0,776 0,776 51,77 27,9 46,2 78,2 74,1 ———————————————————————————————————		80	62	0,615	0,869		76,4	11,7	88,9	88,1
Тканое полотно из полиамидных нитей Комбинированное переплетение 80 62 0,715 0,999 56,94/ 54,7 3,9 61,7 58,6		-	Тканое і	полотно	из льняі	ной пряж	си			
Комбинированное переплетение 80 62 0,715 0,999 56,94/ 54,7 3,9 61,7 58,6	Полотняное	48	34	0,776	0,776	51,77	27,9	46,2	78,2	74,1
переплетение 80 62 0,715 0,999 56,94/ 54,7 3,9 61,7 58,6		Тка	аное пол	потно из	в полиам	идных ні	ітей			
THAT OF THE PROPERTY OF THE PR		80	62	0,715	0,999				-	-
								441	4448	90

З СУШКА И ТЕРМООБРАБОТКА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ТЕКСТИЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Сушка и термообработка являются весьма продолжительными и энергоемкими операциями. Продолжительность и температура процесса сушки и термообработки должны строго соблюдаться во избежание высокой влажности готового материала или чрезмерной пересушки, нежелательного растрескивания, подплавления волокнистого компонента или разрушения слоев.

Сушку и термообработку текстильных композиционных материалов различают в зависимости от вида подвода тепла и осуществляют следующими способами.

Конвективный способ. Перемещение влаги К поверхности осуществляется за счет градиента влажности, а градиент температуры противоположно направлен, что несколько замедляет процесс сушки. За температур на поверхности и внутри материала счет разности движение влаги внутрь, В направлении температуры. В результате перемещение влаги к поверхности материала затрудняется, а температурное сопротивление переносу вещества увеличивается. В результате этого происходит миграция вещества полимерного связующего на поверхность текстильного материала.

Достоинствами конвективного способа подвода тепла являются простота, дешевизна оборудования, однако при этом низкий КПД процесса и высокие энергозатраты на нагрев. Необходимо отметить, что данный способ сушки все еще широко используется на предприятиях текстильной и легкой промышленности.

Ускорение процессов сушки и термофиксации при конвективном способе подвода тепла связано с повышением температуры. При этом возможно пересушивание и коробление слоистого композиционного материала, что является недопустимым.

Сушка инфракрасным излучением позволяет избежать перегрева материала. Градиент влагосодержания и температуры направлены в противоположные стороны, в первом периоде скорость сушки ЭТОМ снижена. Материал нагревается, несколько перемещается внутрь и при значительном градиенте влагосодержания и уменьшении градиента температуры происходит изменение потока влаги в обратном направлении, интенсивное движение к поверхности материала и ее испарение. Инфракрасная сушка эффективна для тонких материалов, позволяет увеличить скорость сушки в 1,5-2 раза при одновременном снижении энергозатрат в 1,5 раза. В текстильном производстве инфракрасную сушку используют для предварительной подсушки материала на стадии удаления капиллярно связанной влаги и

комбинируют с конвективной сушкой. К недостаткам инфракрасного нагрева можно отнести низкую эффективность при обработке толстых материалов, неравномерность нагрева, высокий расход энергии (более 1,5 кВт час на 1 кг испаренной влаги), а также высокая вероятность перегрева материала на заключительной стадии сушки, когда влагосодержание резко снижается и температура резко увеличивается. Остановка движения полотна при включенных излучателях может привести к его возгоранию.

При контактном способе тепло, необходимое для испарения влаги и нагревания материала, передается теплопроводностью от нагретой поверхности. Контактный способ широко используют в бумажной промышленности. Направление градиентов температуры и влагосодержания совпадает, что способствует ускорению переноса влаги в первом периоде сушки, во втором периоде градиент температур уменьшается, следовательно, И интенсивность суки снижается. Скорость подвода тепла внутренним слоям К лимитируется термическими характеристиками объекта сушки.

Однако контактный способ сушки эффективен для тонких материалов, а также не рекомендуется для текстильных полотен, содержащих более 33 % синтетических волокон из-за возможного изменения внешнего вида и туше текстильного полотна.

В настоящее время основными способами сушки и термообработки текстильных материалов являются конвективный, радиационный контактный и комбинированный. Наиболее простым и распространенным является конвективный способ, что объясняется простотой и дешевизной используемого оборудования. Использование контактного способа при формировании текстильных композитов ограничивается их толщиной, природой волокон и полимерных связующих. В случае материалов, имеющих значительную толщину, необходимо увеличивать время контакта поверхностного слоя с нагреваемой поверхностью, что приводит к ухудшению качества готовых материалов. Контактный способ нагрева находит применение при формировании структурных эффектов (тиснения) на поверхности материала в процессе каландрирования.

Текстильные материалы из натуральных и химических волокон чувствительны к действию высоких температур, при которых возможно протекание термодеструкционных процессов и разрушение волокнообразующего полимера. Внешним проявлением этих процессов являются усадка, повышенная жесткость и блеск, изменение окраски, нарушение структуры, расслаивание.

При формировании текстильных композиционных материалов к режимам процесса сушки и термообработки предъявляются следующие требования:

- температура теплоносителя должна быть ниже температуры, при которой протекают термодеструкционные процессы в волокнистых материалах и полимерных связующих;
- равномерное прогревание слоев, исключение «теплового удара», что способствует диффузии полимерного связующего в поры волокнистого материала и предотвращает его усадку.

При выборе рациональных режимов сушки и термообработки необходимо учитывать способ формирования текстильного композита, который определяет его свойства и структуру.

3.1 Кинетика сушки капиллярно-пористых материалов

Сушка капиллярно-пористых материалов, к которым относятся текстильные материалы (пряжа, нити, ткани, трикотажные и нетканые полотна), подробно изучена такими учёными, как А.В. Лыков, П.А. Ребиндер, С.П. Рудобашта и др. [99, 100, 101, 102, 103, 104].

Установлено, что кинетика сушки волокнистых материалов носит сложный характер, зависящий от видов связей присутствующей в них влаги. В зависимости от формы связи влаги с волокнистым материалом различают физико-механическую (макро- и микрокапиллярную), физико-химическую (адсорбционно и осмотически связанную) и химическую [103].

Механически удерживаемую влагу называют влагой намокания. У волокнистых материалов имеются достаточно большие поры и пустоты (например, между нитями в ткани), которые могут заполняться влагой при полном смачивании материала в случае формирования текстильного композита способом пропитки. Наполняя поры текстильного материала, влага намокания не изменяет его размеры и форму.

Макрокапиллярная влага находится в капиллярах радиусом более 10-7 м, которые заполняются при смачивании. Микрокапиллярная влага находится в капиллярах радиусом менее 10-7 м, заполняемых при адсорбции влажного. Влага прочно удерживается силами ИЗ капиллярности в порах и удаляется из материала путем испарения или приложения внешнего давления большего, чем капиллярное. Чем меньше радиус капилляра, тем прочнее удерживается влага. Наличие осмотически связанной влаги, присутствие которой обусловлено наличием растворенных частиц вещества, для волокнистых материалов не характерно [76]. Адсорбционная влага прочно удерживается на поверхности, а также в порах, и после химической является наиболее прочно связанной с материалом. Удаление адсорбционной влаги из материала связано с дополнительным расходом тепла. Химическая

влага входит в состав молекул вещества, имеет большую энергию связи с веществом и при сушке не удаляется. Скорость сушки текстильных материалов определяется удалением капиллярной влаги [100].

Влажность материала можно классифицировать на удаляемую влагу и равновесную влажность (рис. 3.1) и можно выделить следующие участки [100]:

- I. Влажное состояние материала, при котором его влажность $W_{\scriptscriptstyle M}$ больше гигроскопической $W_{\scriptscriptstyle C}$. Давление паров воды над материалом равно давлению насыщенного пара воды при температуре материала и не зависит от его влажности $p_{\scriptscriptstyle R}=p_{\scriptscriptstyle H}$.
- II. Гигроскопическое состояние материала, при котором его влажность $W_{\scriptscriptstyle M}$ меньше гигроскопической $W_{\scriptscriptstyle C}$. Давление паров воды в материале меньше давления насыщенного пара воды и зависит от влажности и температуры материала $p_n = f(W_{\scriptscriptstyle M}, t_{\scriptscriptstyle M})$.

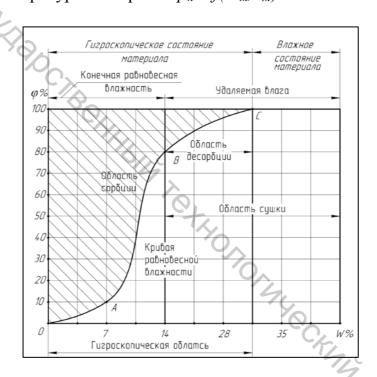


Рисунок 3.1 – Схема состояния влаги в материале

При прохождении влажного материала ($W_M >> W_c$) через сушильную камеру с температурой среды t_c большей, чем температура материала t_h , в результате большего давления паров воды над поверхностью материала, чем в воздухе ($p_n > p_h$), происходит испарение влаги.

В состоянии равновесия температура материала равна температуре воздуха, а давление паров воды в материале $p_{\scriptscriptstyle M}$ равно парциальному давлению в воздухе $p_{\scriptscriptstyle 6}$ ($p_{\scriptscriptstyle M}=p_{\scriptscriptstyle 6}$). Равновесная влажность, соответствующая полному насыщению материала влагой, называется гигроскопической влажностью — предельная влажность, при которой

давление паров воды в материале равно давлению насыщенных паров чистой воды при тех же давлении и температуре ($p_{\scriptscriptstyle M} = p_{\scriptscriptstyle H}$) [100, 101].

На рисунке 3.2 представлены характерные кривые изменения влажности и температуры материала в процессе сушки. На участке (АВ) температура материала повышается от $t_{\scriptscriptstyle H}$ до температуры мокрого термометра $t_{M,}$ соответствующей данному состоянию окружающего воздуха (период прогрева материала), скорость сушки в этом периоде повышается. Участок (ВС) характеризует период постоянной скорости сушки, температура материала остается постоянной $t_{M} = const$, а изменение влажности происходит по линейному закону ($tg\alpha = const$). В периоде постоянной скорости сушки из материала удаляется вся механически связанная влага. Скорость сушки определяется скоростью испарения влаги с поверхности материала (внешняя диффузия). Участок (CD) соответствует периоду падающей скорости сушки, изменяющейся по экспоненте, переходящей в асимптоту, ордината которой есть равновесная влажность W_p . Температура материала резко возрастает. В этот период удаляется влага с физико-химической формой связи (период внутренней диффузии). Влажность в точке С и Е соответствует критической влажности $W_{\kappa p}$. Значение критической влажности зависит от скорости и температуры воздуха в сушильной камере, размера материала и его начальной влажности.

Количество влаги, удаленной с 1 м² поверхности материала в единицу времени, называется интенсивностью сушки. Количество влаги, удаляемое в единицу времени, — скорость сушки (в %/ч или в 1/ч), равная: $N = \Delta W/\Delta \tau$.

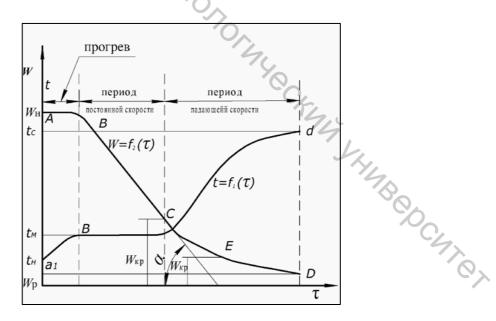


Рисунок 3.2 — Изменение влагосодержания и температуры материала в процессе сушки при постоянных температуре t_c и влажности φ_c среды

В технологии формирования текстильных композитов используется конвективный способ сушки (рис. 3.3).

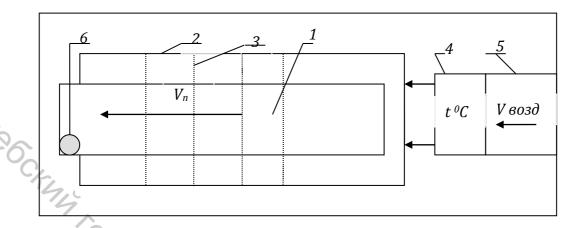


Рисунок 3.3 – Схема сушильной установки: 1 – сушильная камера; 4 – нагревательные элементы; 2 – нагревательный элемент; 5 – вентилятор; 3 – тепловой поток; 6 – отсос воздуха

При конвективной сушке тепло из воздуха передается материалу путем соприкосновения. Выбор температурных условий сушки осуществляется с учетом теплофизических и гигроскопических свойств материалов и полимерных связующих, используемых при формировании слоистых текстильных материалов (табл. 3.1).

Таблица 3.1 – Тепловые и гигроскопические свойства материалов и полимерных связующих

Вид	Наименование показателя							
материала	Теплостойкость, ⁰ С	Термостойкость, ⁰ С	Равновесная W					
			$W_{\text{возд}}=65 \%$	W _{возд} =95 %				
Хлопок	130-140	180-220	7-8	18-20				
Лен	160-170	180-220	11-12	19-21				
Вискоза	140-150	175-200	12-13	35-40				
Нитрон	160-170	200-210	0,5-1,0	5-6				
Капрон	100-110	196-215	3,5-4,5	7-8				
Бумага	-	-	6-9	-70				
Флизелин	-	140-150	-	- 2				
ПВС	$(T_{cr} = 85-90)$ $135-145$	170-230	-	-				
ПВА	$(T_{cr} = 28) 37 - 38$	100-120	-	-				
Стирол- акрилат		180-200	-	-				

Под теплостойкостью материала понимают температуру T_{menn} , до которой можно нагревать материал при определенной его влажности, механическом воздействии и продолжительности нагрева, получая при этом обратимые изменения форм и размеров. Теплостойкость материала — величина непостоянная. Чем меньше нагрузка и время теплового воздействия, тем выше теплостойкость материала.

Применительно к сушке и термообработке текстильных материалов необходимо различать понятия «теплостойкость волокнообразующего полимера» и «теплостойкость материала».

Максимальная температура $T_{mерм}$, до которой можно нагревать полимерный материал, не нарушая его физико-механических свойств, называется термостойкостью. При сушке и термообработке текстильных материалов, используемых при формировании композитов, необходимо знать температуру теплостойкости красителей $T_{\kappa p}$, которые применены при их производстве. При этом должно соблюдаться условие:

$$T_{men\pi}$$
, T_{mepm} , $T_{\kappa p} > t_{e}$. (3.1)

Кинетика сушки — построение кривой сушки $W=f(\tau)$ и кривой нагрева $t=f(\tau)$, исследуется экспериментально с целью определения продолжительности процесса снижения влажности материала от начального влагосодержания $W_{\scriptscriptstyle H}$ до некоторого конечного W_{κ} , а также конечной температуры материала, для расчета количества тепла, необходимого для нагревания.

Для расчета кривой конвективной сушки текстильных композиционных материалов воспользуемся приближенным методом [100], основанным на замене реальной кривой скорости сушки $\frac{dW}{d\tau} = f(W)$ ее упрощенной идеализированной моделью [105].

На рисунке 3.4 представлена кривая скорости сушки для слоистых текстильных материалов. С целью определения общих закономерностей процесса сушки текстильных композиционных материалов проведен предварительный эксперимент.

Условия проведения эксперимента:

- слоистый текстильный материал нетканая основа (бумага)/полимерное связующее (поливиниловый спирт)/ворсовое покрытие (нитрон);
 - температура воздуха в сушильной камере 140 °C;
 - режим работы сушильной установки установившийся.

Уравнение отрезка прямой, соответствующей кривой скорости сушки, проходящей через точки с координатами $W=W_{p,r}$, $dW/d\tau=0$ и $W=W_{\kappa p,n}$, $dW/d\tau=N$), принимает вид:

$$\frac{dW}{d\tau} = -N \frac{W - W_p}{W_{\kappa p.n.} - W_P}.$$
(3.2)

где $W_{\kappa p.n.}$ — критическое приведенное влагосодержание; W_p — равновесное влагосодержание.

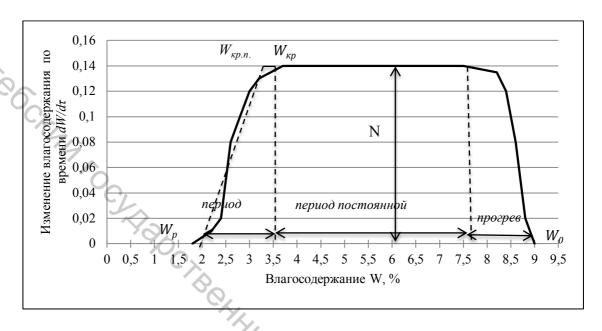


Рисунок 3.4 – Кривая скорости сушки для слоистого ворсового материала

Интегрируя уравнение (3.2) для периода падающей скорости сушки, получим:

$$\frac{W - W_p}{W_{\kappa p.n.} - W_p} = e^{-K\tau} = e^{-\chi N\tau} \,, \tag{3.3}$$

где K — постоянный коэффициент сушки, ч⁻¹, зависящий от режима сушки, прямопропорционален N; χ — относительный коэффициент сушки, зависит от свойств материала и его начальной влажности (принимаем равным 1/%).

$$1/\%$$
).
$$K = \frac{N}{W_{\kappa p.n.} - W_p} = \chi N \ . \tag{3.4}$$
 было показано [100, 101], что в широком диапазоне

Лыковым А.В. было показано [100, 101], что в широком диапазоне начальных влагосодержаний для различных материалов относительный коэффициент сушки обратно пропорционален начальному влагосодержанию материала:

$$\chi = \frac{1.8}{W_0}. (3.5)$$

По уравнению (3.3) находим продолжительность сушки в периоде падающей скорости:

$$\tau_2 = \frac{1}{\chi N} \ln \frac{W_{\kappa p.n.} - W_p}{W_{\kappa p} - W_p} \,. \tag{3.6}$$

Для периода постоянной скорости сушки: $\tau_{1} = \frac{1}{N} \big(W_{0} - W_{\kappa p.n.} \big) \, ,$

$$\tau_1 = \frac{1}{N} (W_0 - W_{\kappa p.n.}), \tag{3.7}$$

тогда общая продолжительность сушки т определяется по формуле:

$$\tau_{1-2} = \frac{1}{N} \left[W_0 - W_{\kappa p.n.} + \frac{1}{\chi} ln \frac{W_{\kappa p.n.} - W_p}{W_{\kappa p} - W_p} \right].$$
 (3.8)

Таким образом, используя формулу (3.8), можно определить продолжительность сушки текстильных композиционных материалов, а также скорость движения полотна при непрерывном способе формирования.

В результате экспериментальных исследований процесса конвективной сушки при температуре 140 0 С были построены кривые сушки $W=f(\tau)$ и скорости сушки $\frac{dW}{d\tau}=f(W)$ (рис. 3.5, 3.6), а также проведено сравнение экспериментально полученных значений режимных параметров сушки с рассчитанными по уравнениям (3.2)—(3.8) (табл. 3.2).

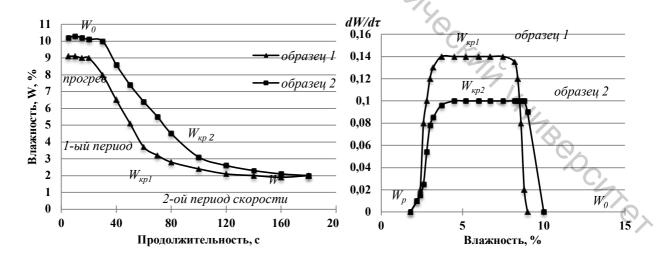
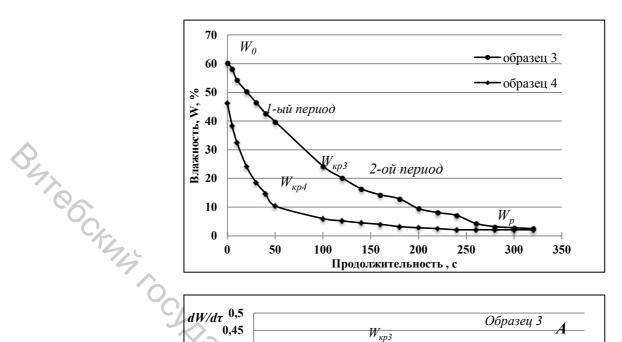
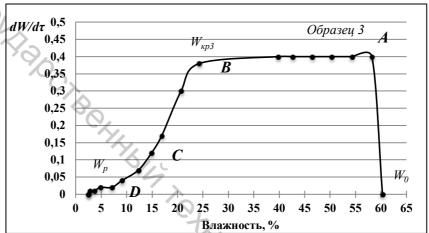


Рисунок 3.5 — Кинетика сушки слоистых текстильных композиционных материалов (формирование клеевым способом): образец 1 — флизелин/нитроновый ворс 140 г/m^2 ; образец 2 — флизелин/льняная ткань 280 г/m^2

Таблица 3.2 – Расчетные и экспериментальные данные сушки текстильных композиционных материалов

Параметр	Обозна	зна Единица	образец 1		образец 2		образец 3		образец 4	
Параметр	чение	измерения	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.
Начальное влагосодержание	W_0	%	ı	9,2	ı	10,3	1	60,0	ı	39,7
Критическое влагосодержание	$W_{\kappa p}$	%	-	3,7	-	4,5	-	24,3	-	10,4
Критическое приведенное влагосодержание	$W_{\kappa p.n.}$	90%	3,5	-	3,8	-	35,6	-	27,3	-
Конечное влагосодержание	W_{κ}	%	-	3,0						
Равновесное влагосодержание	W_p	%	Y _{1/2}	1,8	-	2,0	-	2,3	-	1,8
Относительный коэффициент сушки	χ	1/%	0,19	-	0,17	-	0,03	-	0,04	-
Постоянный коэффициент сушки	K	e ⁻¹	0,027	C+X	0,017	-	0,012	-	0,022	-
Продолжительность периода прогрева	$ au_0$	С	-	21,0	<u>}</u>	25,0	-	5,0	-	5,0
Продолжительность в периоде постоянной скорости	$ au_1$	c	39,3	40,0	58,0	60,0	89,3	90,0	64,1	65,0
Продолжительность в периоде падающей скорости сушки	τ_2	c	30,5	32,0	63,1	64,0	259,1	260,0	60,3	63,0
Продолжительность сушки	τ ₁₋₂	c	69,8	93,0	121,3	149,0	348,4	355,0	124,4	133,0
Скорость сушки в периоде постоянной скорости	N	%/c	0,1421	0,14	0,1	0,1	0,4	0,4	0,55	0,56





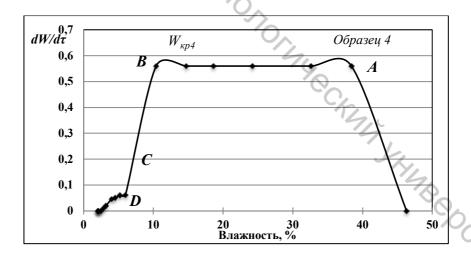


Рисунок 3.6 – Кинетика сушки текстильных каркасных композиционных материалов (формирование способом пропитки): образец 3 – композиционный материал (560 г/м²) (вискозная ткань – полимерное связующее стирол-акрилат 300 г/л); образец 4 – композиционный материал (520 г/м²) (полиамидная ткань – полимерное связующее стирол-акрилат 300 г/л)

Анализируя полученные теоретические и экспериментальные результаты, можно сделать следующие выводы:

- уменьшение влагосодержания слоистых текстильных композиционных материалов (образец 1,2) начинается при $\tau = 20$ -40 с, т. е. наблюдается период прогрева (τ_0) до температуры начала испарения влаги, содержащейся в полимерном связующем; для текстильных каркасных композиционных материалов (образец 3,4) период прогрева непродолжителен по сравнению с общей продолжительностью сушки, поэтому им можно пренебречь;
- для слоистых материалов (образец 1,2), полученных клеевым способом, продолжительность сушки в периоде постоянной скорости сопоставима с продолжительностью в периоде падающей скорости сушки, что можно объяснить малым начальным влагосодержанием и небольшим количеством связанной влаги в материале;
- для текстильных каркасных композиционных материалов из гидратцеллюлозных волокон (образец 3) в первый период сушки испаряется влага намокания и частично физико-механическая влага (макрокапиллярная), затем удаляется влага микрокапиллярная осмотическая и адсорбционная, при этом лимитирующей стадией является период падающей скорости сушки, что объясняется большей пористостью вискозных волокон;
- для текстильных каркасных композиционных материалов из синтетических волокон (образец 4) большая часть влаги удаляется в первом периоде сушки, влаги с физико-химической формой связи практически не содержится, $\tau 1 \ge \tau 2$.

Результаты исследований подтверждают применимость теории сушки, разработанную А.В. Лыковым, однако возникает необходимость уточнения методики расчета продолжительности сушки слоистых композиционных текстильных материалов в зависимости от способа формирования, природы и структуры текстильного компонента, а также состава и свойств полимерного связующего.

3.2 Исследование кинетики нагрева слоистых текстильных композиционных материалов

В процессе сушки слоистых текстильных композиционных материалов происходит удаление растворителя (воды) из полимерного связующего в результате испарения, формирование пленки полимерного связующего и образование адгезионного соединения между слоями текстильного композита.

Влажность слоистых материалов клеевого способа формирования не превышает 10–12 %. Сушка таких материалов происходит за счет

перемещения воды, содержащейся, в основном, в полимерном связующем, внутри текстильного материала и нетканой основы, парообразования и перемещения влаги с поверхности материала в окружающую среду.

В большинстве случаев общая продолжительность процесса сушки влажных материалов складывается из продолжительности первого (постоянной скорости) и второго (падающей скорости) периодов сушки, продолжительность начального периода прогрева материала небольшая, поэтому не учитывается. Однако результаты экспериментальных исследований показали, что процесс сушки слоистых текстильных материалов необходимо делить на три периода: 1-й период – прогрев слоистого текстильного материала; 2-й период – постоянной скорости сушки; 3-й период – падающей скорости сушки.

Исследование кинетики нагрева слоистого композита проводилось на опытно-экспериментальном стенде, представляющим собой конвективную сушку (рис. 3.3). В образце (рис. 3.7) материала послойно зафиксированы термопары, показания термопар снимались каждые 10 секунд. На рисунке 3.8 представлены графики изменения температуры.

слоистый текстильный материал клеевого способа формирования



Рисунок 3.7 – Образец и зафиксированные термопары

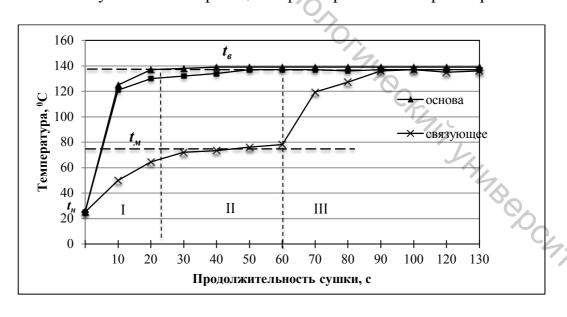


Рисунок 3.8 – Изменение температуры слоистого текстильного композиционного материала в процессе сушки

Так как текстильный материал (волокно или ткань) и полотно основы не содержат механической влаги, то в начальный период сушки (I) происходит быстрое увеличение их температуры. Раствор или дисперсия полимерного связующего прогревается до температуры мокрого термометра $t_{\rm M}$, при которой начинается испарение свободной влаги из тонкой пленки. Так как общая пористость текстильного материала (70–85 %) выше пористости используемой нетканой основы (бумаги, флизелина) (30–40 %), диффузия влаги происходит внутри текстильного полотна к его поверхности.

Для текстильного полотна и нетканой основы отсутствует период постоянной скорости сушки, наблюдается период падающей скорости сушки (II). В периоде (II) температура полимерного связующего достигает температуры мокрого термометра ($t_{\scriptscriptstyle M} = const$) и незначительно изменяется, что связано с наличием растворенных веществ. Происходит интенсивное испарение влаги с поверхности тканого полотна, температура поверхности тканого полотна несколько снижается, давление паров воды над поверхностью материала $p_{\scriptscriptstyle M}$ равно давлению насыщенных паров чистой воды $p_{\scriptscriptstyle H}$ при температуре материала.

Когда свободная влага из полимерного связующего полностью удалена, происходит его структурирование и образование пленки. Так как диффузия влаги внутри текстильного полотна прекращается, температура текстильного полотна и нетканой основы повышается до температуры воздуха в сушильной камере $t_{\rm g}$.

В результате неравномерного нагрева или перегрева слоистых материалов из-за различной усадки слоев, имеющих отличные друг от друга тепловые свойства, могут образовываться складки, морщины, трещины в результате коробления, а также изменение цвета или его расслоение. С целью определения рациональных режимов необходимо установить зависимость между свойствами слоистых текстильных композиционных материалов (количественный и качественный состав компонентов и их теплофизические свойства) и условиями проведения процесса сушки и термообработки.

Анализ литературных источников [102, 105, 107] показал, что имеющиеся точные решения задач теплопроводности многослойных материалов достаточно сложны для практического использования. Поэтому для инженерных расчетов продолжительности термообработки слоистых текстильных материалов актуальным является приближенное решение задачи нестационарной теплопроводности многослойной пластины [108, 109].

С этой целью преобразуем слоистый текстильный материал, состоящий из двух плотно прилегающих друг к другу различных по свойствам компонентов, в эквивалентный однослойный, длина которого L, толщина $\delta = 2R$, и проанализируем процесс нагревания на

основе общих законов теплопередачи. Для решения задачи используем аппарат классической теории теплопроводности А.В. Лыкова [102].

Примем некоторые допущения (рис. 3.9):

- в слоистых текстильных материалах основная роль в передачи тепла принадлежит кондукции воздуха и волокон, а роль излучения и конвективного переноса малы и ими можно пренебречь [107];
- так как L >> δ , то рассмотрим неограниченную пластину толщиной 2R;
- в начальный момент времени система имеет одинаковую начальную температуру (t_0) ;
- слоистый текстильный материал находится в среде горячего воздуха с температурой $t_{\rm g} > t_{\rm 0}$;
- в начальный момент времени поверхности тканого полотна и материала основы нагреваются до температуры $t_{\rm e}$, которая поддерживается постоянной на протяжении всего процесса;
- теплообмен между поверхностью материала и окружающей средой происходит одинаково по всей поверхности, температура материала зависит только от продолжительности нагревания и толщины (симметричная задача);
- теплообмен на внешних поверхностях происходит по закону Ньютона-Рихмана, теплообмен между поверхностью материала и средой с постоянной температурой происходит при $\frac{\alpha}{\lambda} \to \infty$.

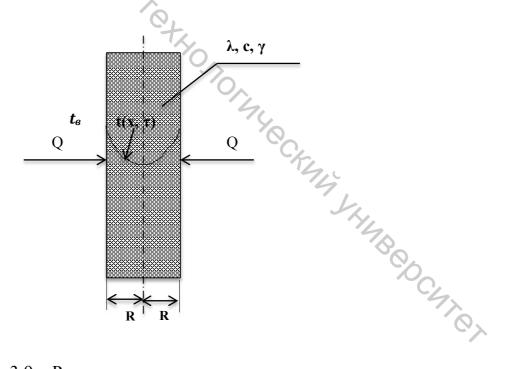


Рисунок 3.9 — Расчетная схема прогревания слоистого текстильного материала

Вместо традиционной системы уравнений теплопроводности для каждого слоя и граничных условий четвертого рода (на границе соприкосновения слоев) используем одно уравнение теплопроводности.

Дифференциальное уравнение теплопроводности запишется в виде:

$$\frac{\partial t(x,\tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t(x,\tau)}{\partial x^2} \right); (\tau > 0; -R < x < +R).$$
 (3.9)

$$t(x,0) = f(x); (3.10)$$

$$t(+R,\tau) = t(-R,\tau) = t_{\beta} = const$$
, (3.11)

Краевые условия: t(x,0)=f(x); $t(+R,\tau)=t(-R,\tau)=t_{\it g}=const\,,$ $t(+R,\tau)=t(-R,\tau)=t_{\it g}=t(-R,\tau)=t_{\it g}=t_{\it g}=t_{\it$ где $a = \frac{\lambda}{cv}$ – коэффициент температуропроводности (м²/c); $\frac{\partial t(x,\tau)}{\partial \tau}$ – температурное поле; t_{g} – температура воздуха в термокамере, К; λ – коэффициент теплопроводности, Bт/м*град); теплоемкость, Дж/кг*град; γ – плотность, кг/м³.

> Дифференциальное уравнение теплопроводности после применения преобразования Лапласа имеет вид [102]:

$$T_L''(x,s) - \frac{s}{a}T_L(x,s) + \frac{t_0}{a} = 0,$$
 (3.12)

где s – оператор Лапласа в интегральном преобразовании функции, t(x, t)au); $T_L^{"}(x,S)$ – изображение функции t(x,преобразовании Лапласа.

Граничные условия для изображения будут иметь вид:/

$$T_L(R,s) = \frac{t_g}{s};$$
 $T'_L(0,s) = 0.$
(3.13)

Решение дифференциального уравнения (3.12) можно записать в виде:

$$T_L(x,s) - \frac{t_0}{s} = Ach \sqrt{\frac{s}{a}} x + Bsh \sqrt{\frac{s}{a}} x , \qquad (3.14)$$

где A и B – постоянные, не зависящие от x, и определяемые из граничных условий (5.13).

По условию симметрии B=0. Постоянную A находим из первого граничного условия (3.13)

$$T_L(R,s) = \frac{t_0}{s} + Ach\sqrt{\frac{s}{a}}R = \frac{t_e}{s},$$
(3.15)

$$A = \frac{(t_{\scriptscriptstyle G} - t_{\scriptscriptstyle 0})}{s \cdot ch \sqrt{\frac{s}{a}}R},\tag{3.16}$$

Таким образом, решение для изображения (3.14) будет иметь вид:

$$\frac{t_0}{s} - T_L(x, s) = \frac{(t_s - t_0)ch\sqrt{\frac{s}{a}x}}{s \cdot ch\sqrt{\frac{s}{a}R}} = \frac{\Phi(s)}{\psi(s)}.$$
(3.17)

При переходе решения для изображения (3.12) к решению для оригинала соблюдены условия теоремы разложения, которую можно записать:

$$L^{-1} \left[\frac{\Phi(s)}{\psi(s)} \right] = \sum_{n=1}^{n} \frac{\Phi(s_n)}{\psi(s_n)} e^{s_n \tau}, \tag{3.18}$$

где s_n – корни полинома $\psi(s_n)$.

n=1— корни полинома $\psi(s_n)$.

Найдем корни функции $\psi(s_n)$, приравняем ее к нулю.

- простой корень s=0;
- бесчисленное множество простых корней, определяемых из соотношения

$$i\sqrt{\frac{s_n}{a}}R = \mu_n = (2n-1)\frac{\pi}{2},$$
 (3.19)

Откуда

$$s_n = \frac{a\mu_n^2}{R^2} = -\frac{(2n-1)^2\pi^2a}{4R^2}. (3.20)$$

Найдем $\psi'(s)$:

$$\psi'(s) = \frac{sR}{2\sqrt{as}} sh \sqrt{\frac{s}{a}} R + ch \sqrt{\frac{s}{a}} R = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{s}{a}} R sh \sqrt{\frac{s}{a}} R + ch \sqrt{\frac{s}{a}} R, \qquad (3.21)$$

имеем

$$\lim_{S \to S_n} \psi'(s) = \frac{1}{2} i \mu_n shi \mu_n = -\frac{1}{2} \mu_n sin \mu_n = \psi'(s) , \qquad (3.22)$$

$$\Phi(s_n) = (t_e - t_0) cos \mu_n \frac{x}{R}, \qquad (3.23)$$

найдем
$$\Phi(s_n)$$
:
$$\Phi(s_n) = (t_e - t_0)cos\mu_n \frac{x}{R},$$
окончательно получим:
$$L^{-1} \left[\frac{t_0}{s} - T_L(x, \tau) \right] = L^{-1} \left[\frac{(t_B - t_0)ch\sqrt{\frac{s}{a}x}}{sch\sqrt{\frac{s}{a}R}} \right],$$

$$(3.24)$$

$$t_0 - t(x, \tau) =$$

$$(t_0 - t_e) - (t_0 - t_e) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n} (-1)^{n+1} cos\mu_n \frac{x}{R} \exp(-\mu_n^2 \frac{a\tau}{R^2}),$$

$$t_{0} - t(x,\tau) = (3.25)$$

$$(t_{0} - t_{e}) - (t_{0} - t_{e}) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_{n}} (-1)^{n+1} cos \mu_{n} \frac{x}{R} \exp(-\mu_{n}^{2} \frac{a\tau}{R^{2}}),$$

$$\theta = \frac{t(x,\tau) - t_0}{t_s - t_0} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \mu_n \frac{x}{R} \exp(-\mu_n^2 F_0),$$
(3.26)

где $\frac{2}{\mu_n}(-1)^{n+1}$ — начальная тепловая амплитуда; *Fo* — число Фурье, $Fo = \frac{a\tau}{R^2}$; μ_n – характеристические числа, равны:

$$\mu_n = (2n - 1)\frac{\pi}{2}.\tag{3.27}$$

Анализируя решение уравнения (3.26), для практических расчетов можно ограничиться одним первым членом ряда (сходящийся ряд).

Получим удобную для практических расчетов формулу [108]:

$$t(0,\tau) = t_0 + 1,27(t_e - t_0) \cdot e^{-1,57\frac{a_{9K6}\tau}{R^2}} , \qquad (3.28)$$

где $t(0,\tau)$ — температура в центре слоистого текстильного материала в момент времени τ , 0 С; t_{6} — температура воздуха в термокамере, 0 С; t_{0} — исходная температура материала, 0 С; $a_{3\kappa6}$ — коэффициент эквивалентной температуропроводности, M^2/c ; $R - \frac{1}{2}$ толщины слоистого текстильного материала, м; τ – продолжительность термообработки, с.

Уравнение (3.28) позволяет для слоистых текстильных композиционных материалов различного сырьевого состава и толщины рассчитать:

- продолжительность периода прогревания при заданной температуре в сушильной камере;
- температуру в секциях сушильной камеры, необходимую для полного прогревания слоистого текстильного материала в течение заданного времени.

Проанализируем процесс прогревания слоистых текстильных композиционных материалов.

Так как текстильные материалы обладают сложной пористой структурой, поры располагаются как между волокнами, так и внутри них, формы и размеры их разнообразны: микро- и макрокапилляры, сквозные и замкнутые, то для более точного расчета коэффициента теплопроводности тканых полотен использовали формулу, предложенную С.Г. Зыриным [93]:

$$\lambda = \lambda_{6030} \left[1 + \frac{\beta}{(1 - \beta)/4 + \lambda_{6030}/(\lambda_{60\pi} - \lambda_{6030})} \right], \tag{3.29}$$

где λ_{eo3} λ_{eo7} — соответственно коэффициенты теплопроводности воздуха и волокна, Bt/(mK); β — доля объема волокон в объеме ткани.

Значения коэффициентов теплопроводности ворса и тканых полотен, используемых для формирования слоистых текстильных композиционных материалов, представлены в таблице 3.3. Результаты преобразования слоистого материала в однослойный представлены в таблице 3.4.

Исходя из правила аддитивности для слоистого текстильного материала рассчитаны объемная плотность и теплоемкость. Эквивалентный коэффициент теплопроводности $\lambda_{_{9KB}}$ для преобразованного двухслойного материала в однослойный определим по формуле [93, 107]:

$$\lambda_{_{\mathcal{H}G}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \delta_{i}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_{i}'}{\lambda_{i}'}} \tag{3.30}$$

где δ_i – толщина і-го слоя, м; λ_i – теплопроводность і-го слоя, Вт/м К.

Таблица 3.3 – Исходный слоистый материал

Наименование слоя	Флизелин	Нитроновый	Льняна	я ткань
		ворс	180 г/м ²	270 г/м ²
Толщина, м	$344 \cdot 10^{-6}$	$1000 \cdot 10^{-6}$	1160·10 ⁻⁶	2040 ·10 ⁻⁶
Объемная плотность,	$0.378 \cdot 10^3$	$1,17\cdot10^3$	$0,155\cdot10^3$	$0.132 \cdot 10^3$
$\kappa\Gamma/M^3$				
Пористость, %	-	-	89,3	90,9
Теплоемкость, Дж/моль	1420	1550	1510	1510
K				
Теплопроводность, Вт/м	0,13	0,035	0,0272	0,0271
C K				

Таблица 3.4 — Результаты преобразования слоистого текстильного композиционного материала в однослойный

Название показателя	Значение показателя				
9	слоистый ворсовой	слоистый с тканым покрытием			
72.	материал	180 г/м ²	270 г/м ²		
Толщина, м	1144 · 10 ⁻⁶	1504· 10 ⁻⁶	2384·10 ⁻⁶		
Объемная плотность, кг/м3	$0,466 \cdot 10^3$	$0,103 \cdot 10^3$	$0.083 \cdot 10^3$		
Теплоемкость, Дж/моль К	1511,0	1489,3	1497,2		
Теплопроводность, Вт/м К	0,044	0,033	0,031		
Коэффициент	$6,37 \cdot 10^{-8}$	2,16· 10 ⁻⁷	2,45 · 10-7		
температуропроводности, м ² /с	4				

Для прогревания расчета слоистого текстильного составлена композиционного материала программа системе компьютерной алгебры Maple (приложение A), а также построены графики распределения температуры ПО толщине слоистого текстильного материала.

Экспериментальные и расчетные исследования кинетики нагрева слоистых текстильных материалов представлены на рисунке 3.10 и в таблице 3.5. Исследования процесса прогревания проведены на предварительно высушенных образцах с целью исключения влияния испаряющейся влаги на распределение температуры.

Анализ кинетических кривых прогревания слоистых текстильных композиционных материалов позволяет сделать следующие выводы:

- с ростом температуры воздуха в сушильной камере прогревание слоистых композитов до заданной температуры протекает интенсивнее;
- с увеличением поверхностной плотности текстильного покрытия продолжительность прогревания возрастает;
- отклонение расчетных и экспериментальных значений не превышает 5 %, что подтверждает правильность преобразования слоистого текстильного композиционного материала в эквивалентный однослойный и возможность использования математической модели (3.28) для расчета продолжительности периода прогревания;

— наибольшая погрешность в скорости прогревания слоистого текстильного композиционного материала наблюдается в начальный момент времени, время экспериментальное и расчетное достижения установившейся температуры совпадает.

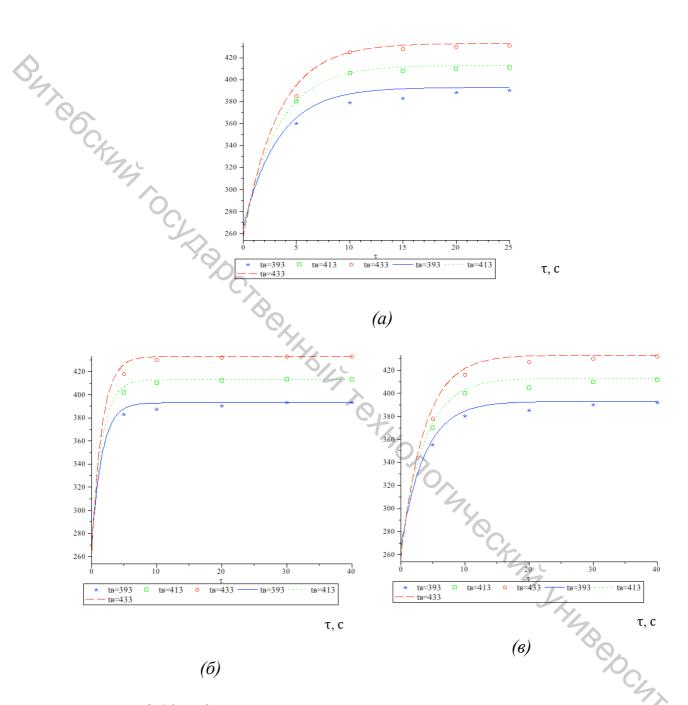
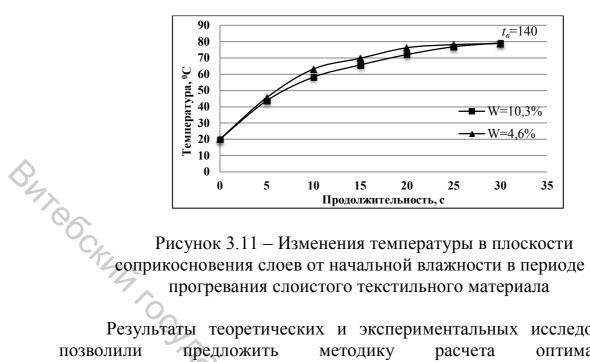


Рисунок 3.10 — Кинетика прогревания слоистого ворсового материала (а) и с тканым покрытием 180 г/м^2 (б), 270 г/м^2 (в) *(линиями обозначены расчетные значения, точками — экспериментальные)

Таблица 3.5 — Расчетные и экспериментальные значения температуры в центре слоистого текстильного композиционного материала

Температура в центре слоистого текстильного композиционного материала, К								
Ворсовое покрытие 140 г/м²		Тканое полотно 120 г/м²			Тканое полотно 270 г/м²			
τ, c	расч.	эксп.	τ, c	расч.	эксп.	расч.	эксп.	
	Темпе	ратура воз	духа в с	ушильной н	камере, t_{e}	= 393 K		
5	365,43	360	5	386,71	383	360,33	355	
10	387,02	379	10	392,25	387	384,59	380	
15	391,70	383	20	392,68	390	392,44	385	
20	392,72	388	30	393,00	393	392,96	390	
25	393,00	393	40	-	-	393,00	393	
	Темпе	ратура воз	духа в с	ушильной н	камере, t_e	=413 K		
5	379,92	380	5	405,45	402	373,80	370	
10	405,82	406	10	412,62	410	402,91	400	
15	411,44	408	20	412,99	412	412,33	405	
20	412,66	410	30	413,00	413	412,95	412	
25	413,00	413	40	-	-	413,00	413	
Температура воздуха в сушильной камере, $t_g = 433 \text{ K}$								
5	394,42	385	5	424,19	418	387,26	378	
10	424,62	425	10	432,56	430	421,23	416	
15	431,18	428	20	432,99	432	432,22	427	
20	432,60	430	30	433,00	433	432,94	432	
25	433,00	433	40	-7/	-	433,00	433	

От условий формирования слоистых текстильных композиционных материалов, в частности, от толщины клеевой пленки, концентрации раствора полимерного связующего зависит глубина его проникновения в текстильное полотно и, соответственно, начальная влажность материала. Как известно [93], влажность влияет и на теплофизические свойства текстильных материалов теплопроводность, теплоемкость. Однако исследования зависимости изменения температуры в плоскости соприкосновения слоев от начальной влажности (рис. 3.11) показали незначительное влияние на режим прогревания, что связано, по-видимому, со значительно большей толщиной текстильного полотна по сравнению с пленкой полимерного связующего.



Результаты теоретических и экспериментальных исследований позволили предложить методику оптимальной расчета продолжительности процесса сушки слоистых текстильных композиционных материалов.

3.3 Методика расчета продолжительности сушки слоистых текстильных композиционных материалов

Результаты анализа экспериментальных и расчетных данных позволяют предложить следующую методику расчета продолжительности сушки процесса слоистых текстильных композиционных материалов:

- 1. Из условия (5.1) задается температура воздуха в сушильной камере t_{e} .
- 2. Задается начальная W_0 , равновесная W_p , критическая $W_{\kappa p}$, и критическая приведенная $W_{\kappa p,n}$ влажность материала, скорость сушки в периоде постоянной скорости сушки N.
- 3. Задаются геометрические и теплофизические свойства слоев Opc4707 текстильного композита:
 - δ_1 толщина материала основы, м;
 - δ_2 толщина текстильного покрытия, м;
 - Р пористость текстильного материала, %;
 - ω_1 доля материала основы;
 - ω_2 доля текстильного материала;
 - λ_1 теплопроводность материала основы, Bt/(м·град);
 - λ_{s} теплопроводность волокна, BT/(м·град);
 - c_1 теплоемкость материала основы, Дж/ кг·град);
 - c_2 теплоемкость материала основы, Дж/ кг·град);

 γ_1 – объемная плотность материала основы, кг/м³;

 γ_2 – объемная плотность текстильного покрытия, кг/м³.

4. Расчет теплопроводности текстильного материала с учетом его пористости по формуле:

$$\lambda = 0.0259 \cdot \left[1 + \frac{(1-P)}{\frac{P}{4} + \frac{0.0259}{\lambda_{6} - 0.0259}} \right].$$

1. Преобразование двухслойного материала в однослойный:
 □ пасчет эквивалентного коэффициента теплопроводности

$$\lambda_{\scriptscriptstyle \mathrm{SKB}} = \frac{\delta_1 + \delta_2}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}},$$

расчет теплоемкости

$$c = \omega_1 c_1 + \omega_2 c_2$$

- расчет объемной плотности

$$\gamma = \frac{\omega_1 \gamma_1 + \omega_2 \gamma_2}{2},$$

расчет толщины

$$R = \delta_1 + \delta_2,$$

коэффициента температуропроводности ДЛЯ преобразованного в однослойный слоистого материала

$$a=\frac{\lambda_{{}_{{}^{9KB}}}}{c\cdot\gamma}.$$

6. Расчет продолжительности периода прогревания слоистого материала по формуле:

$$t(0,\tau) = t_0 + 1,27(t_B - t_0) \cdot e^{-1,57\frac{a\tau_0}{R^2}}$$

$$\tau_0 = \frac{-R^2}{1,57a} \ln \left(\frac{t - t_0}{1.27(t_B - t_0)} \right).$$

7. Расчет относительного коэффициента сушки

$$\chi = \frac{1.8}{W_0} \ .$$

8. Расчет суммарной продолжительности первого (постоянной скорости) и второго (падающей скорости) периодов сушки

$$\tau_{1-2} = \frac{1}{N} \left[W_0 - W_{\text{кр.п.}} + \frac{1}{\chi} \ln \frac{W_{\text{кр.п.}} - W_p}{W_{\text{кр}} - W_p} \right] \cdot$$

9. Расчет общей продолжительности сушки слоистого текстильного композиционного материала

$$\tau = \tau_0 + \tau_{1-2} \quad .$$

3.4 Исследование сушки и термообработки текстильных каркасных композиционных материалов, полученных способом пропитки тканого полотна полимерным связующим

Текстильный композиционный материал, формируемый способом пропитки тканого полотна водной дисперсией полимерного связующего, в отличие от слоистых материалов, после отжима содержит влаги 40–70 %. При сушке таких материалов расходуется большое количество тепловой энергии. Кроме того, важным является вопрос миграции дисперсных частиц полимерного связующего к поверхностным слоям, что приводит к неравномерности распределения по толщине и ухудшению свойств готового материала.

Анализируя кинетику сушки композиционных материалов (рис. 3.6), можно выделить два характерных участка. На участке ABбыстрый подвод влаги к поверхности материала и происходит испарение. В ЭТОМ периоде удаляется основная часть влаги (механически связанной), содержащейся в сквозных и межволоконных порах текстильного материала независимо от его сырьевого состава. В точке B начинается уменьшение скорости сушки, граница испарения перемещается к поверхности материала до тех пор, пока не удалится капиллярная влага. Согласно классификации П.А. Ребиндера различают три вида капиллярной влаги:

собственно капиллярная влага заполняет капилляры пористого материала;

- фуникулярная влага находится в капиллярах в виде сравнительно коротких разобщенных газовой фазой столбиков с менисками на концах;
- пендулярная влага присутствует в материале в виде разобщенных менисков в местах стыка волокон.

Как видно (рис. 3.6), интенсивность сушки во втором периоде зависит от природы волокнистого материала. Для текстильных композиционных материалов из синтетических волокон наклон участка BC больше, чем для материалов из вискозных волокон. Для материалов из вискозных волокон общую продолжительность сушки определяет продолжительность периода падающей скорости (BC). На участке CD удаляется влага с физико-химической связью и скорость сушки зависит от скорости ее диффузии внутри вещества, из которого состоит текстильный композит. Для материалов из синтетических волокон на этом участке влажность материала практически достигла своего равновесного значения.

При сушке текстильных каркасных композиционных материалов особое значение имеет перемещение капиллярной влаги, количество которой зависит от природы волокнистого материала, пористости текстильного полотна и концентрации полимерного связующего. Результаты исследований влияние пористости волокнистого материала на общую продолжительность сушки представлены в работах [76, 100, 101]. Установлено, что с увеличением пористости скорость сушки в первом и втором периоде возрастает. Поэтому целью дальнейших исследований является исследование зависимости скорости сушки текстильных композиционных материалов от концентрации полимерного связующего.

3.4.1 Исследование зависимости скорости сушки текстильного каркасного композиционного материала от концентрации полимерного связующего

В зависимости от назначения текстильных композиционных материалов сушке подвергаются тканые полотна, пропитанные водной дисперсией полимерного связующего, концентрация которого варьируется в диапазоне 50–500 г/л. Одновременно с сушкой волокнистого материала происходит сушка самой дисперсии.

Изучение сушки растворов и дисперсий на различных подложках проводилось учеными научной школы профессора В.И. Коновалова ТГТУ [110]. Установлены основные типы температурных кривых при сушке дисперсий по характеру формирования температурных площадок [106]. Характер формирования температурных площадок зависит от

физических изменений, происходящих при сушке дисперсии, таких как структурирование и кристаллообразование. Исследование кинетики нагревания композиционных материалов из полиамидных нитей, пропитанных водной дисперсией стирол-акрилата (рис. 3.12), показало, что наблюдается формирование только одной температурной площадки, близкой по значению к температуре мокрого термометра $t_{\rm M}$, независимо от концентрации полимерного связующего структурирования не происходит.

Пленкообразование при сушке дисперсии условно можно разделить на три стадии (рис. 3.13).

На *первой стадии* при испарении воды происходит сближение частиц дисперсии, усиление взаимодействия между ними и повышение вязкости. Сушка протекает с постоянной скоростью, содержание воды в дисперсии по окончании этого периода не превышает 30 %. *Вторая стадия* характеризуется дальнейшим удалением воды, разрушением имеющихся на поверхности глобул адсорбционно-гидратных оболочек, конденсацией частиц, образование псевдопленки — плотно уложенных деформированных частиц в форме многогранников.

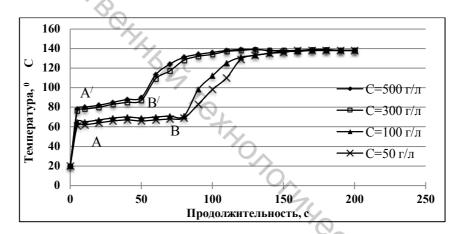


Рисунок 3.12 — Температурные кривые сушки текстильных каркасных композиционных материалов из полиамидных нитей $(t_e=140~^{0}\mathrm{C})$

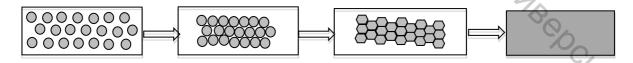


Рисунок 3.13 – Схема процесса пленкообразования

На *третьей стадии* происходит слияние глобул, полимерные частицы коалесцируют. Чем выше капиллярное давление и поверхностное натяжение полимерной дисперсии, тем выше скорость пленкообразования. При образовании пленки полимер должен

находиться в высокоэластическом или вязкотекучем состоянии, т. е. при температуре стеклования (t_c) .

Анализ температурных кривых (рис. 3.12) показывает, что в начальный момент времени происходит быстрое прогревание материала до температуры мокрого термометра. Далее уровень и наклон температурных площадок AB и $A^\prime B^\prime$ зависит от концентрации полимерной дисперсии.

Несмотря на то, что дисперсные частицы малоактивны в смысле молекулярно-кинетического взаимодействия с водой, однако при увеличении концентрации дисперсии выше 100 г/л наблюдается температуры повышение кипения снижение давления воды, паров воды над насыщенных поверхностью материала соответственно интенсивность сушки в периоде постоянной скорости уменьшается, при этом увеличивается наклон температурной площадки увеличении области t_{M} . При концентрации увеличивается поверхностное натяжение И капиллярное давление дисперсии, возрастает скорость пленкообразования во втором периоде сушки.

С целью определения влияния концентрации связующего на интенсивность и общую продолжительность проведены исследования сушки материалов из полиамидных и вискозных нитей в первом и втором периоде при различных концентрациях полимерного связующего (рис. 3.14, 3.15). Свойства полимерного связующего представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Свойства полимерного связующего для формирования каркасного текстильного материала

Наименование показателя	Значение показателя				
Состав	дисперсия стирол-акрилата,				
	самосшивающая				
Внешний вид	низковязкая дисперсия белого цвета				
Ионогенность	анионактивная				
рН	около 4-6				
Растворимость	смешивается с холодной и теплой (до 50				
	⁰ C) водой в любом соотношении				
Содержание сухого вещества, %	50±1				
Динамическая вязкость, мПа с	4÷8				
Средний размер частиц, нм	100÷140				

Кинетика в периоде постоянной скорости сушки описывается линейной зависимостью со скоростью N (%/c), в периоде падающей скорости сушки – экспонентной:

$$lnW = b_2 x + a_2,$$

где W — влажность композиционного текстильного материала, %; x — продолжительность сушки, c; b_2 — скорость убыли скорости сушки во втором периоде, c^{-1} ; a_2 — коэффициент.

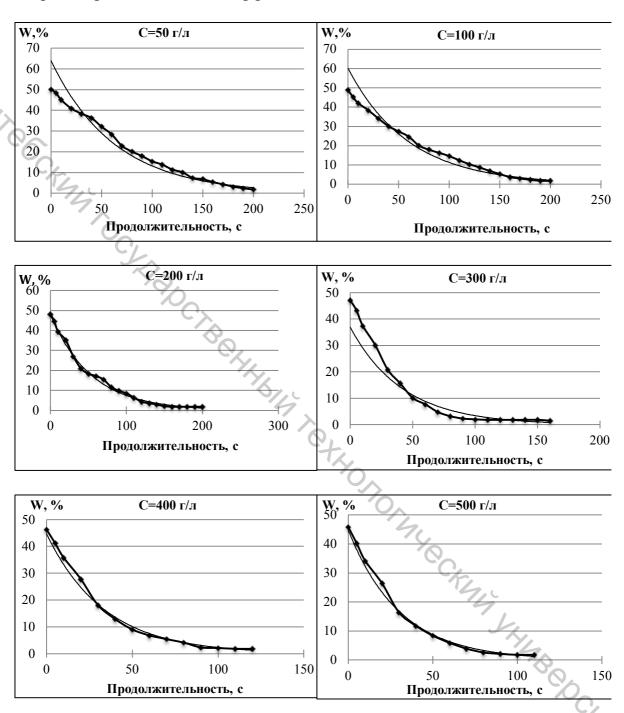


Рисунок 3.14 — Зависимость кинетики сушки текстильных композиционных материалов из полиамидных нитей от концентрации полимерного связующего (t_e =140 0 C)

_____ экспериментальная ____ расчетная

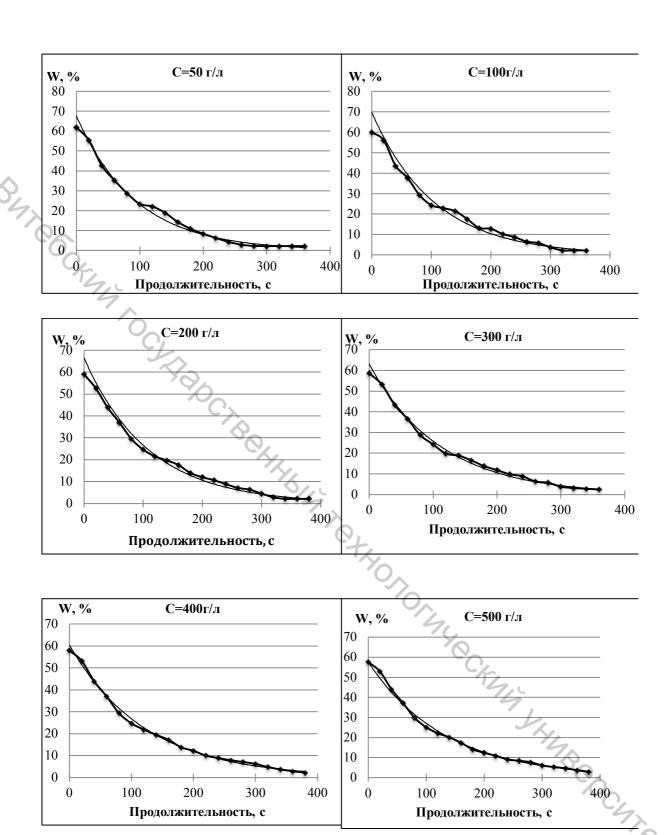


Рисунок 3.15 — Зависимость кинетики сушки текстильных композиционных материалов из вискозных нитей от концентрации полимерного связующего (t_e =140 0 C)

_____ экспериментальная ____ расчетная В таблице 3.7 представлены результаты исследования влияния концентрации дисперсии полимерного связующего на кинетику сушки текстильных композиционных материалов.

Изменение концентрации полимерного связующего влияет на начальную влажность материала W_0 , с увеличением концентрации водной дисперсии полимерного связующего уменьшается начальное влагосодержание.

Таблица 3.7 – Влияние концентрации полимерного связующего на

кинетику сушки

Вид материала	Начальная	Скорост	ь сушки	Продолжительность			
1/2	влажность,			сушки до W_p , с			
4	W_{θ} , %	в периоде	в периоде	расч. табл.	эксп.		
^		постоянной	падающей	2/расч.			
		скорости,	скорости,	формула			
2		<i>N</i> %/c	$b_2, { m c}^{-1}$	(3.8)			
Полиамидная	2						
ткань	50,1	0,36	-0,021	223/226	215		
50 г/л	48,9	0,38	-0,023	206/208	200		
100 г/л	48,2	0,62	-0,024	172/162	165		
200 г/л	47,1	0,75	-0,027	125/130	133		
300 г/л	46,3	0,84	-0,029	107/114	110		
400 г/л	45,8	0,86	-0,032	97/95	100		
500 г/л		14					
Вискозная ткань							
50 г/л	62,0	0,40	-0,011	311/305	310		
100 г/л	60,0	0,38	-0,011	345/353	340		
200 г/л	58,8	0,35	-0,01	377/375	370		
300 г/л	58,6	0,34	-0,01	378/386	380		
400 г/л	58,0	0,32	-0,009	414/406	400		
500 г/л	57,4	0,31	-0,008	414/415	400		

Так, для композиционных материалов из гидрофобных полиамидных нитей начальная влажность W_0 уменьшается с 50,1 % при концентрации дисперсии полимерного связующего 50 г/л до 45,8 % при концентрации 500 г/л; для материалов из гидрофильных вискозных нитей с 62,0 % при концентрации дисперсии стирол-акрилата 50 г/л до 57,6 % при концентрации 500 г/л.

При увеличении концентрации водной дисперсии полимерного связующего скорость сушки в периоде постоянной скорости N увеличивается для материалов из гидрофобных полиамидных нитей и уменьшается для материалов из гидрофильных вискозных нитей.

Анализируя результаты по скорости во втором периоде и общей продолжительности сушки, можно сделать вывод, что для материалов из гидрофобных синтетических нитей интенсивность испарения влаги во втором периоде с увеличением концентрации водной дисперсии увеличивается и общая продолжительность сушки уменьшается. И

совсем обратная закономерность наблюдается для материалов из гидрофильных вискозных нитей – с увеличением концентрации полимерной дисперсии интенсивность испарения влаги во втором периоде уменьшается, общая продолжительность сушки увеличивается. Это можно объяснить тем, что материалы из синтетических волокон обладают менее развитой пористостью и способностью удерживать влагу, чем целлюлозные и гидратцеллюлозные. Основная часть влаги удаляется из сквозных пор и капилляров в периоде постоянной скорости сушки. Синтетические волокна практически не содержат осмотической влаги (влаги набухания). К началу второго периода сушки, когда для полимерной дисперсии увеличивается скорость пленкообразования, влагосодержание материала достигает 10 % при концентрации полимерной дисперсии 50 г/л и 15 % при концентрации дисперсии 500 Γ/Π .

Вискозные волокна и нити имеют развитую систему сквозных и тупиковых пор. При сушке сначала удаляется свободная влага, находящаяся в капиллярах и порах, осмотическая и влага в фуникулярном состоянии. Затем удаляется влага пендулярная и влага с физико-химической формой связи. С увеличением концентрации дисперсии полимерного связующего повышается ее вязкость и скорость продвижения влаги из глубинных слоев к поверхности материала уменьшается. Кроме того, при увеличении концентрации возрастает скорость пленкообразования, что также затрудняет удаление влаги из мелких и тупиковых капилляров волокнистого материала.

В результате экспериментальных исследований кинетики сушки текстильных композиционных материалов из полиамидных и вискозных нитей получены математические модели, позволяющие рассчитать продолжительность сушки до W_{p} при концентрации водной дисперсии 50-500 г/л (табл. 3.8).

Скорость сушки в периоде постоянной скорости N в диапазоне концентраций полимерного связующего 50-500 г/л имеет линейную (3.31) зависимость от концентрации:

для полиамидных материалов:

$$N = 0.0012 \cdot c + 0.3178; \tag{3.31}$$

для вискозных материалов:

$$N = -0.0002 \cdot c + 0.4178. \tag{3.32}$$

Таблица 3.8 – Математические модели сушки текстильных

каркасных композиционных материалов

Концентрация	Полиамидные материалы	Вискозные материалы
полимерного		
связующего		
50 г/л	$W_{50} = 64,02 \cdot e^{-0,016 \cdot \tau}$	$W_{50} = 67,71 \cdot e^{-0,011\tau}$
	$R^2=0.97019$	$R^2=0.97325$
100 г/л	$W_{100} = 60,17 \cdot e^{-0,017 \cdot \tau}$	$W_{100} = 69,73 \cdot e^{-0.01 \cdot \tau}$
	$R^2=0.96985$	$R^2=0,97719$
200 г/л	$W_{200} = 47.82 \cdot e^{-0.019 \cdot \tau}$	$W_{200} = 66,50 \cdot e^{-0,009 \cdot \tau}$
0	$R^2=0.97805$	$R^2 = 0.98219$
300 г/л	$W_{300} = 36,86 \cdot e^{-0,024 \cdot \tau}$	$W_{300} = 63,00 \cdot e^{-0,009 \cdot \tau}$
17_	$R^2=0.91576$	$R^2 = 0.99175$
400 г/л	$W_{400} = 44,75 \cdot e^{-0.03 \cdot \tau}$	$W_{400} = 60,44 \cdot e^{-0,008 \cdot \tau}$
	$R^2 = 0.98541$	$R^2=0,90218$
500 г/л	$W_{500} = 44,74 \cdot e^{-0.033 \cdot \tau}$	$W_{500} = 59,63 \cdot e^{-0,008 \cdot \tau}$ $R^2 = 0,99651$
	$R^2 = 0.98501$	$R^2 = 0,99651$

Обобщая результаты экспериментальных исследований процесса сушки текстильных композиционных материалов из химических нитей, можно сделать следующие выводы:

- при увеличении концентрации водной дисперсии стиролакрилата уменьшается начальное влагосодержание текстильного композиционного материала W_0 ;
- при сушке текстильных композиционных материалов из гидрофобных полиамидных нитей с увеличением концентрации водной дисперсии стирол-акрилата более 200 г/л скорость сушки в первом и втором периодах возрастает, общая продолжительность сушки сокращается в 2–2,5 раза;
- при сушке текстильных композиционных материалов из гидрофильных вискозных нитей с увеличением концентрации полимерной дисперсии скорость сушки в первом и втором периодах уменьшается, общая продолжительность сушки возрастает.

3.4.2 Исследование процесса термофиксации текстильного каркасного композиционного материала

Текстильный композиционный материал, полученный способом пропитки тканого полотна, подвергается процессу термообработки. Образованная полимерного связующего после сушки пленка характеризуется наличием нескоалисцированных глобул, неоднородной структурой, что не обеспечивает придание требуемых свойств готовому Последующая сушки термообработка материалу. после (термофиксация) необходима для структурирования полимерной пленки на поверхности волокнистого материала, что достигается при температуре 160-180 0 C.

В процессе термообработки текстильный композиционный материал приобретает такие важные свойства, как необходимую жесткость и формоустойчивость, грязе-, водоотталкивание, огне-, термостойкость и другие в зависимости от используемого состава полимерной композиции.

Выбор рациональных режимов термообработки (продолжительности, температуры) зависит от свойств текстильного композиционного материала. Критерием оценки оптимальной температуры формирования ориентировочно может служить температура стеклования полимерного связующего t_c .

После сушки материал нагревается до температуры воздуха в сушильных секциях и на входе в секции термофиксации имеет начальную температуру $t_{\scriptscriptstyle M} = t_{\scriptscriptstyle 6}$. В непрерывном технологическом процессе материал проходит через секции термокамеры в течение заданного времени. Необходимо определить зависимость между температурой и временем термообработки, необходимого для прогревания материала до заданной температуры термофиксации $t_{\scriptscriptstyle t}$ и завершения процессов структурообразования полимерной композиции.

Для выработки практических рекомендаций по определению рациональных режимов термофиксации воспользуемся формулой (3.28), которая для текстильных композитов имеет следующий вид:

$$t(0,\tau) = t_{\rm M} + 1.27(t_t - t_{\rm M}) \cdot e^{-1.57 \frac{a\tau_t}{R^2}}, \tag{3.33}$$

где $t(0,\tau)$ — температура в центре текстильного композиционного материала в момент времени τ , ${}^{0}\mathrm{C}$; t_{t} — температура термофиксации, ${}^{0}\mathrm{C}$; t_{m} — температура материала на выходе из сушильных секций, ${}^{0}\mathrm{C}$; a — коэффициент температуропроводности текстильного композиционного материала, $\mathrm{M}^{2}/\mathrm{c}$; R — ${}^{1}\!\!/_{2}$ толщины текстильного композиционного материала, м; τ_{t} — продолжительность термофиксации, с.

Для расчета тепловых полей в поперечном сечении композиционного материала необходимо определить его теплофизические свойства (теплопроводность и теплоемкость) после пропитки водной дисперсией полимерного связующего различной концентрации, последующей сушки в процессе которой дисперсные частицы распределились в объеме текстильного полотна, а также их зависимость от температуры.

Для гетерогенных систем, которыми являются композиционные материалы, известна расчетная формула теплопроводности, полученная на основании теории Максвелла, рассчитавшего поле системы,

состоящей из изотропной среды, в которую вкраплены посторонние частицы сферической формы [111, 112]:

$$\lambda_{9\varphi\varphi} = \lambda_1 \left(\frac{\lambda_2 + 2\lambda_1 - 2\omega(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_2 + 2\lambda_1 + \omega(\lambda_1 - \lambda_2)} \right), \tag{3.34}$$

где $\lambda_{9\varphi\varphi}$ — эффективная теплопроводность гетерогенной системы; λ_1 — теплопроводность непрерывной фазы; λ_2 — теплопроводность диспергированной фазы; ω — объемная концентрация диспергированной фазы.

Однако композиционные текстильные материалы являются анизотропными и вышеуказанные формулы не пригодны для расчета коэффициента теплопроводности.

Известны формулы для расчета коэффициента теплопроводности полимерных композиционных материалов с волокнистым наполнителем, учитывающие пространственную ориентацию армирующих волокон по отношению к тепловому потоку [20].

при расположении армирующих волокон вдоль теплового потока

$$\lambda = \lambda_{\scriptscriptstyle g} \omega_{\scriptscriptstyle g} + \lambda_{\scriptscriptstyle M} (1 - \omega_{\scriptscriptstyle g}), \tag{3.35}$$

- при перпендикулярном расположении армирующих волокон

$$\lambda = \lambda_{\scriptscriptstyle M} + \frac{2,54\omega_{\scriptscriptstyle B}\lambda_{\scriptscriptstyle M}}{1 - 1,27\omega_{\scriptscriptstyle B} + \frac{2,5\lambda}{\lambda_{\scriptscriptstyle B} - \lambda_{\scriptscriptstyle M}}},\tag{3.36}$$

где $\lambda_{\scriptscriptstyle B},~\lambda_{\scriptscriptstyle M}$ — коэффициенты теплопроводности армирующих волокон и полимерной матрицы; $\omega_{\scriptscriptstyle B}~\omega_{\scriptscriptstyle M}$ — доля армирующих волокон и полимерной матрицы.

«парциальных» Другие модели, основанные на полимерного связующего текстильного материала, / также И экспериментальными В процессе согласуются данными. теплопереноса существенную роль играют не только свойства и композиционного относительные содержания компонентов форма дисперсных частиц, текстильного материала, НО И распределение в текстильном материале, агрегация частиц, изменение пористости материала.

Зависимость коэффициента теплопроводности композиционных текстильных материалов от температуры выражается формулой:

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \beta t \,, \tag{3.37}$$

где λ_0 – коэффициент теплопроводности при t = 0 ⁰C, Вт/(м K); $\lambda(t)$ – коэффициент теплопроводности при текущей температуре материала, Вт/(м K); β – эмпирический коэффициент.

По данным работы [107] в интервале температур от 30 до 75 0 С коэффициент теплопроводности изменяется незначительно и для инженерных расчетов ею можно пренебречь, однако при увеличении температуры выше 75 0 С происходит заметное увеличение λ .

Теплоемкость композиционных текстильных материалов, в отличие от теплопроводности, в меньшей мере зависит от распределения дисперсных частиц и пористости, при расчетах применимо правило аддитивности:

$$C = \omega_{\rm B} C_{\rm B} + \omega_{\rm CB} C_{\rm CB}. \tag{3.38}$$

Проведены экспериментальные исследования зависимости коэффициента теплопроводности, а также теплоемкости текстильных композиционных материалов из полиамидных и вискозных нитей от концентрации полимерного связующего и температуры. Для пропитки тканых полотен крепового переплетения использовалась водная дисперсия полимерного связующего в диапазоне концентраций 50–500 г/л.

Измерение коэффициента теплопроводности и его зависимости от температуры ДЛЯ текстильных композиционных материалов проводились на калориметре ИТ- λ -400 методом монотонного нагрева материала, для измерения коэффициента удельной теплоемкости и ее зависимости от температуры использовался калориметр ИТ-с-400 методом монотонного нагрева материала в адиабатическом режиме. композиционных текстильных плотность определялась весовым методом, толщина – в соответствии с ГОСТ 12023-2003 «Материалы текстильные и изделия из них. Методы определения толщины». Исследования проведены в лаборатории кафедры «Экология и химические технологии» УО «ВГТУ». Результаты представлены в таблицах 3.9, 3.10 и на рисунке 3.16.

Таблица 3.9 - Геометрические свойства текстильных композитов

Концентрация	Полиами	дный	Вискозный		
дисперсии	Объемная	Толщина,	Объемная	Толщина,	
полимерного	плотность,	M	плотность,	M	
связующего, г/л	кг/см ³		кг/см ³	4	
0	219	0,0021	218	0,00192	
50	221	0,0019	220	0,00189	
100	223	0,0020	221	0,0019	
150	223	0,0020	222	0,0020	
200	224	0,0020	226	0,0021	
300	227	0,0022	229	0,0021	
400	229	0,0022	234	0,0022	
500	233	0,0024	238	0,0025	

Таблица 3.10 - Изменение теплофизических свойств текстильных композитов в зависимости от концентрации связующего и температуры возлуха

Температура,								
0°C		Композиционный Композиционный					Ĭ	
	текстильный материал из			ал из	текстильный материал из			
	no	<i>олиамидн</i>	ых нит	ей		вискознь	іх нитей	į
	200	300	400	500	200	300	400	500
	Γ/Π	г/л	Γ/Π	Γ/Π	Γ/Π	г/л	г/л	г/л
25	0,102	0,203	0,410	0,825	0,075	0,140	0,291	0,560
50	0,109	0,205	0,412	0,822	0,074	0,141	0,289	0,562
75	0,112	0,217	0,414	0,831	0,075	0,144	0,325	0,563
100	0,119	0,231	0,431	0,854	0,077	0,146	0,346	0,570
125	0,126	0,247	0,467	0,868	0,079	0,149	0,351	0,572
150	0,129	0,264	0,513	0,880	0,081	0,150	0,353	0,574
175	0,131	0,298	0,531	0,891	0,084	0,153	0,361	0,575
200	0,134	0,303	0,550	0,896	0,087	0,155	0,366	0,577
	Коэфф	ициент у,	дельной '	геплоемь	CОСТИ C , A	Дж/ кг К		
25	1323	1327	1328	1331	1140	1142	1174	1181
50	1321	1329	1422	1465	1138	1140	1234	1238
75	1354	1348	1594	1598	1176	1192	1296	1310
100	1379	1412	1636	1675	1218	1224	1368	1396
125	1410	1468	1695	1715	1257	1272	1436	1445
150	1454	1491	1732	1744	1291	1314	1541	1568
175	1486	1554	1793	1812	1315	1327	1671	1683
200	1515	1567	1855	1865	1366	1393	1754	1792

Так как размер пор текстильного композиционного материала мал, влиянием процессов передачи тепла путем конвекции и излучения можно пренебречь [107]. Анализ результатов показывает, что при увеличении концентрации полимерного связующего коэффициент теплопроводности возрастает, что можно объяснить уменьшением пористости текстильного композиционного материала.

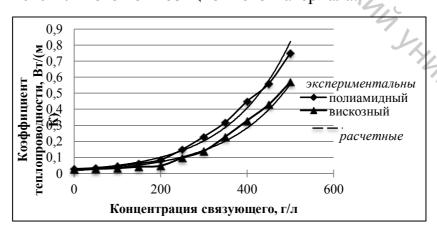


Рисунок 3.16 — Зависимость коэффициента теплопроводности от концентрации полимерного связующего при $t=20\ ^{0}\mathrm{C}$

одинаковой концентрации полимерного связующего теплопроводность материала из вискозных нитей меньше, чем для материала из полиамидных нитей, что объясняется большей долей аморфных областей вискозного волокна. В области концентраций от 50 до 200 г/л коэффициент теплопроводности монотонно возрастает, при увеличении концентрации выше 200 г/л происходит его резкое увеличение. Для инженерных расчетов уравнения коэффициента теплопроводности текстильных композиционных материалов от концентрации полимерного связующего:

- материал из полиамидных нитей

$$\lambda_c = 0.025 \cdot e^{0.007 \cdot c}. \tag{3.39}$$

- материал из вискозных нитей

$$\lambda_c = 0.0189 \cdot e^{0.0068 \cdot c}. \tag{3.40}$$

Теплоемкость текстильных композиционных материалов при температуре 20-25 ⁰C рассчитывается по формуле (3.38) и для композитов вискозных нитей практически не ИЗ концентрации полимерного связующего, так как для используемой дисперсии полимерного связующего и вискозной нити теплоемкость практически одинакова (1,5–1,6 кДж/кгК [203]). С уменьшением пористости материала за счет распределения частиц полимерного связующего теплоемкость увеличивается, что объясняется большей теплоемкостью материала по сравнению с теплоемкостью воздуха (0,94 кДж/кгК). Для материалов из полиамидных нитей теплоемкость изменяется незначительно, что связано с уменьшением полимерного связующего, обладающего меньшей теплоемкостью, и пористости материала.

С увеличением температуры теплопроводность и теплоемкость текстильных композитов из полиамидных и вискозных нитей возрастает. Значения коэффициентов λ_t и C_t при промежуточных температурах в интервале от 25 до 200 0 С могут быть определены методом интерполяции [107]:

$$\lambda_{c,t} = \lambda_{c,min} + \frac{(\lambda_{c,max} - \lambda_{c,min}) \cdot (t_{\text{M}} - t_{\text{min}})}{t_{max} - t_{min}},$$
(3.41)

$$C_t = C_{min} + \frac{(C_{max} - C_{min}) \cdot (t - t_{min})}{t_{max} - t_{min}},$$
 (3.42)

где λ_{max} , λ_{min} , C_{max} , C_{min} , t_{max} , t_{min} — граничные значения коэффициентов теплопроводности, удельной теплоемкости и температуры, между которыми находится текущее значение t.

Коэффициент температуропроводности текстильных композитов при температуре t и концентрации полимерного связующего cопределяется по формуле:

$$a_{c,t} = \frac{\lambda_{c,t}}{c_t \cdot \gamma}.\tag{3.43}$$

 $a_{c,t} = \frac{1}{c_t \cdot \gamma}$.

Для исследования прогревания композиционного текстильного температуры термофиксации составлена программа в Марle, которая представлена в толщине текстильного композиционного ПО Экспериментальные и расчетные результаты исследования кинетики нагрева композитов представлены на рисунке 3.17.

В результате исследований установлено, что продолжительность прогревания не зависит от сырьевого состава текстильного полотна, а температуры материала после сушки, определяется также концентрацией полимерного связующего, а также толщиной материала (рис.3.18). При концентрации полимерного связующего 50–200 г/л прогревание протекает в течение 20-25 с, при увеличении концентрации продолжительность сокращается до 5 с.

Погрешность экспериментальных и расчетных данных превышает 5 %, что позволяет использовать формулу (3.33) для продолжительности определения прогревания при производстве текстильных композиционных материалов способом пропитки водными дисперсиями полимерных связующих с размером частиц дисперсной фазы 100-200 нм.

Для определения продолжительности процесса термофиксации и завершения пленкообразования проведены исследования зависимости показателя жесткости композиционного текстильного материала от продолжительности термообработки при температурах 160–180 °С. Кинетические кривые процесса пленкообразования представлены на рисунке 3.19.

Как видно, зависимости носят одинаковый для двух концентраций нелинейный характер и их можно условно разделить на три участка, различающихся углом наклона кривых. На первом участке показатель жесткости практически не изменяется. Этот участок соответствует прогреванию композиционного текстильного материала до температуры t_t и его продолжительность зависит от концентрации полимерного связующего и не зависит от сырьевого состава тканого полотна.

Текстильный композит из полиамидных нитей полимерное связующее 200 г/л полимерное связующее 500 г/л T, K Т, К 450 450 440 440 430 430 420 420 410 400 390 tB=453 tB=433 · · · · tв=443 tB=453

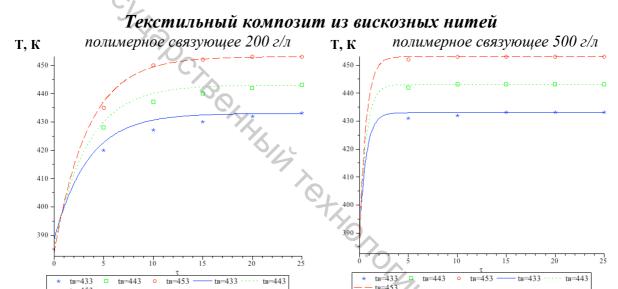


Рисунок 3.17 — Кинетика прогревания текстильных композитов (температура материала на выходе из сушильной камеры 125 0 C)

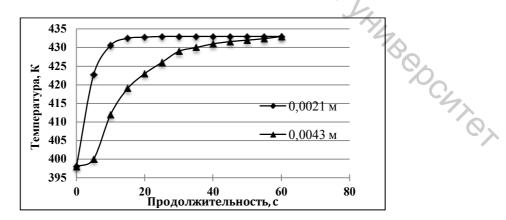


Рисунок 3.18 – Зависимость продолжительности прогревания от толщины текстильного композита из вискозных нитей (c=200 г/л)

На втором участке происходят процессы пленкообразования, возрастает, причем жесткость полотна чем выше температура термофиксации, тем быстрее протекают процессы пленкообразования. Точка перегиба на кривых соответствует завершению пленкообразования оптимальному значению И температуры продолжительности термофиксации.

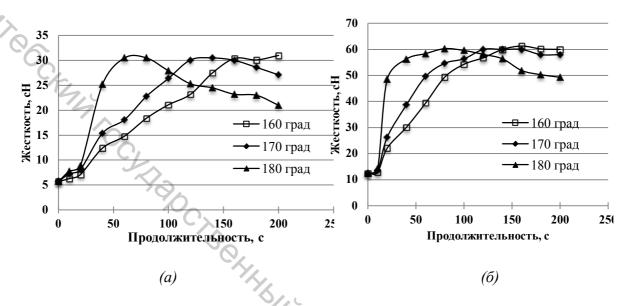


Рисунок 3.19 — Кинетические кривые процесса пленкообразования: (а) — концентрация полимерного связующего 200 г/л; (б) — концентрация полимерного связующего 500 г/л

При t_t =170–180 0 С жесткость снижается после оптимального значения продолжительности. Это свидетельствует о протекании деструктивных процессов, что снижает качественные показатели и внешний готового материала. Установлена ВИД оптимальная продолжительность процесса термофиксации, которая составляет 60 с при t_t =180 0 С, 120 с при t_t =170 0 С и 180 с при t_t =160 0 С. При этом необходимо учитывать продолжительность прогревания композиционного текстильного материала, которая зависит от его геометрических свойств и концентрации полимерного связующего.

Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований процесса сушки и термообработки текстильных каркасных композиционных материалов позволил предложить методику расчета оптимальной продолжительности.

Методика расчета продолжительности термообработки текстильных каркасных композиционных материалов

Методика расчета продолжительности сушки и термообработки текстильных каркасных композиционных материалов состоит следующих этапов:

- 1. Из условия (3.1) задается температура воздуха в сушильной камере t_e , t_{min} , t_{max} ($t_{min} < t_e < t_{max}$) и в камере термофиксации t_t .
 - 2. Задается начальная W_0 и равновесная W_p влажность материала.
- геометрические и теплофизические 3. Задаются текстильного композита:
 - δ толщина композиционного текстильного материала, R=0,5 δ м;
 - ω_I доля тканого полотна;
 - ω_2 доля полимерного связующего;
 - C_I теплоемкость тканого полотна, Дж/ кг·град);
 - C_2 теплоемкость полимерного связующего, Дж/ кг·град);
- λ_{min} , λ_{max} коэффициенты теплопроводности композиционного текстильного материала при t_{min} и t_{max} соответственно, Вт/м К (табл. 3.9);
- C_{min} , C_{max} коэффициенты теплоемкости композиционного текстильного материала при t_{min} и t_{max} соответственно, Дж/ кг К (табл. 3.9);
 - c концентрация полимерного связующего, г/л;
- объемная плотность композиционного текстильного материала, $\kappa \Gamma / M^3$.
 - 4. Расчет скорости сушки N в первом периоде
 - для полиамидных материалов:

$$N = 0.0012 \cdot c + 0.3178.$$

для вискозных материалов:

$$N = -0.0002 \cdot c + 0.4178.$$

5. Расчет относительного коэффициента сушки

$$\chi = \frac{1.8}{W_0}.$$

CKM4 KHMBOOCHTOX 6. Расчет суммарной продолжительности первого (постоянной скорости) и второго (падающей скорости) периодов сушки

$$\tau_{1-2} = \frac{1}{N} \left[W_0 - W_{\kappa p.n.} + \frac{1}{\chi} ln \frac{W_{\kappa p.n.} - W_p}{W_{\kappa p} - W_p} \right].$$

- 7. Расчет теплопроводности текстильного композиционного материала при заданной концентрации полимерного связующего по формулам:
 - материал из полиамидных нитей

$$\lambda_c = 0.025 \cdot e^{0.007 \cdot c}.$$

$$\lambda_c = 0.0189 \cdot e^{0.0068 \cdot c}$$

$$C = \omega_1 C_1 + \omega_2 C_2$$

 $\lambda_c = 0.0189 \cdot e^{\omega_c}$. 8. Расчет теплоемкости композиционного текстильного материала $C = \omega_1 \, C_1 + \omega_2 \, C_2.$ температуре $t_{M} = t_{6}$

$$\lambda_{\square,\square} = \lambda_{c,min} + \frac{(\lambda_{c,max} - \lambda_{c,min}) \cdot (t_{M} - t_{min})}{t_{max} - t_{min}}.$$

Расчет коэффициента удельной теплоемкости C_t на выходе из сушильной камеры при температуре $t_{\scriptscriptstyle M} = t_{\scriptscriptstyle g}$

$$C_{\square} = C_{min} + \frac{(C_{max} - C_{min}) \cdot (t - t_{min})}{t_{max} - t_{min}}.$$

температуропроводности 11. Расчет коэффициента текстильного композиционного материала на выходе из сушильной камеры

$$a=\frac{\lambda_{c,t}}{c_{\Box}\cdot\gamma}$$
.

Расчет продолжительности термофиксации при температуре 12. t₁ по формуле:

$$t(0,\tau) = t_{M} + 1,27(t_{t} - t_{M}) \cdot e^{-1,57\frac{a\tau_{t}}{R^{2}}}$$
$$\tau_{t} = \frac{-R^{2}}{1,57a} \ln\left(\frac{t - t_{M}}{1.27(t_{t} - t_{M})}\right).$$

13. Расчет суммарной продолжительности сушки и термообработки каркасного текстильного материала

$$\tau = \tau_{1-2} + \tau_t.$$

4 СПОСОБЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ СУШКИ И ТЕРМООБРАБОТКИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ТЕКСТИЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Универсальным способом интенсификации процессов сушки и термообработки, позволяющим обрабатывать материалы любой толщины и сырьевого состава без ухудшения свойств, обеспечивать высокие скорости процесса и легко ими управлять, является нагрев в поле токов высокой и сверхвысокой частот [11, 113, 114].

Диэлектрический способ включает высокочастотный (ВЧ) и сверхвысокочастотный (СВЧ) нагрев. Сущность высокочастотного (ВЧ) способа обработки заключается в том, что при прохождении влажного материала в электрическом поле токов высокой частоты происходит его нагрев путем преобразования энергии электрического поля в тепловую энергию. Основное отличие СВЧ-нагрева от ВЧ заключается в виде и частоте электрического излучения: излучение ВЧ-диапазона представляет собой переменное электрическое поле, создаваемое а СВЧ-излучение существует обкладками конденсатора, электромагнитной генерируемой волны, специальными электровакуумными приборами. Получаемая при ЭТОМ частота излучения при СВЧ-обработке электромагнитного приблизительно на два порядка, что приводит к значительному увеличению эффективности процесса обработки.

СВЧ-обработка текстильных материалов позволяет интенсифицировать тепло-, массообменные и диффузионные процессы, при этом достигается улучшение физико-механических свойств материалов вследствие благотворного воздействия волокнистых электромагнитного излучения на структуру волокнообразующего полимера. Возможности СВЧ-нагрева как метода интенсификации достаточно широки, что делает его практически универсальным эффективности технологий обработки способом повышения текстильных материалов из натуральных и химических волокон.

СВЧ-способ обработки обладает рядом достоинств:

Равномерное объемное нагревание материала. Позволяет избежать возникновения температурного градиента от периферии к центру материала, который имеет место в традиционных технологиях сушки, а также перегрева поверхности слоев обрабатываемого текстильного композита. Особенно актуально при термообработке материалов с большим поперечным сечением и высокой плотностью, диэлектрический нагрев обеспечивает практически равномерный нагрев материалов по всему объему.

Высокая интенсивность нагрева в результате термодиффузии. Диэлектрический нагрев дает возможность передачи значительных

мощностей на единицу поверхности (объема) материала, благодаря чему резко возрастает скорость его нагрева, и, как следствие, эффективность процесса термообработки.

Избирательное удаление влаги из неоднородного по структуре материала, которое основано на зависимости диэлектрических потерь $tg\delta$ в нагреваемом материале от длины волны. При этом в многокомпонентной системе, в частности слоистых (композиционных) текстильных материалах будут нагреваться только части, где высокий $tg\delta$.

Саморегулируемость. При нагревании текстильных композиционных содержащих материалов, водную дисперсию полимерного связующего с уменьшением влажности в процессе обезвоживания, диэлектрические потери уменьшаются, продолжается только в тех участках обрабатываемого материала, где еще сохранилась повышенная влажность. Это исключает опасность местного перегрева материала, уменьшается возможность коробления поскольку высушенных нагрев мест автоматически прекращается.

Тепловая безинерционность. Поскольку диэлектрический нагрев целиком и полностью определяется воздействием на материал электрического излучения, то в момент его прекращения образование тепла в диэлектрике также прекращается.

Особенностью нагрева текстильных материалов в условиях воздействия электромагнитных волн СВЧ-диапазона является преобразование энергии электромагнитного излучения в тепловую непосредственно в материале, что обеспечивает его объемное нагревание независимо от теплопроводности.

образом, отмеченные преимущества СВЧ-обработки предпосылки разработки прогрессивных ДЛЯ высокоэффективных способов интенсификации при формировании материалов натуральных текстильных композиционных формирования химических волокон. Для освоения технологий СВЧ-воздействия композитов использованием текстильных c необходимо изучить закономерности протекания основных физикохимических процессов и разработать рекомендации для практического использования.

распределения полимерного Равномерность связующего многом определяется условиями и режимами сушки пропитанного текстильного При соприкосновении поверхности полотна. водной дисперсией полимерного пропитанного связующего, текстильного полотна с горячим воздухом происходит испарение влаги, в результате чего возникает градиент концентрации влаги и ее перемещение из слоев с большей концентрацией к слоям с меньшей концентрацией как в виде жидкости, так и в виде пара. Влага,

содержащаяся в волокнистых материалах, перемещается в основном в виде жидкости под влиянием капиллярных сил. Вода поднимается по капиллярам к поверхности материала медленно и к моменту закипания практически испаряется. Поэтому вместе с влагой в виде жидкости в процессе сушки также мигрируют дисперсные частицы полимерного связующего и отлагаются на поверхности текстильного полотна, что является нежелательным процессом. Для уменьшения миграции влаги в виде жидкости к поверхности волокнистого материала необходимо создать условия для диффузии капиллярной влаги в виде пара, тогда все растворенные или взвешенные жидкости, равномерно распределяться по толщине материала [76]. Известные современные способы сушки текстильных материалов [113, 114, 115] позволяют воздействия создавать такие условия счет электромагнитных инфракрасного волн высоко-, ИЛИ сверхвысокочастотного диапазона.

Высокие скорости транспортирования тканого полотна на линии текстильных композитов формирования способом пропитки термофиксацией последующей сушкой и не всегда достигнуть высокого качества готового материала, особенно при использовании полимерных связующих высокой концентрации и толщины, материалов большой поэтому необходимость интенсификации является актуальной задачей.

Для интенсификации пропитки тканых полотен и сушки готовых комбинированных текстильных материалов применяют инфракрасный (ИК), высокочастотный (ВЧ) и сверхвысокочастотный (СВЧ), вакуумный, плазменный, ультразвуковой и другие способы. В настоящей работе выбран диэлектрический способ интенсификации, который может быть реализован на существующем оборудовании без существенной модернизации.

4.1 Теоретические основы диэлектрического нагрева текстильных материалов в электромагнитном поле сверхвысокой частоты (СВЧ)

Наиболее значимые исследования В области применения высокоэффективных методов обработки текстильных материалов в работах отечественных представлены И зарубежных авторов: Б.Н. Мельникова, Г.С. Княжевской, А.В. Лыкова, Ю.Л. Кавказова, В.В. Красникова, В.С. Сажина, В.В. Сафонова, В.С. Побединского, М.С. Губермана, А.Л. Никифорова, О.Г. Циркиной, Л.В. Шарниной и др. Авторами исследованы диэлектрические свойства текстильных материалов и произведена их систематизация, установлены зависимости диэлектрических характеристик текстильных материалов от различных факторов и разработаны математические модели, учитывающие условия обработки тканей на различных этапах их отделки, в том числе нанесения полимерных покрытий, доказана эффективность и энергетическая выгодность процесса обработки текстильных материалов в условиях СВЧ-воздействия.

Под СВЧ-нагревом понимают процесс, в котором энергия с частотой от 300 МГц до 300 ГГц проникает в нагреваемый материал в качестве электромагнитной волны с длиной волны в диапазоне от 1 м до 1 мм, а затем преобразуется в тепло.

Текстильные материалы и полимерные связующие относятся к диэлектрикам, которые делятся на полярные и неполярные. Когда диэлектрик помещают в электромагнитное поле, то в нем развиваются поляризационные процессы — деформационная (электронная) для неполярных диэлектриков и релаксационная (дипольная) для полярных [114, 115].

Диэлектрический нагрев происходит при воздействии переменного электромагнитного диэлектрик поля, котором происходит преобразование энергии электромагнитного поля в тепловую за счет диэлектрических потерь [205, 206]. Величина зависит электрофизических диэлектрических потерь otвлагосодержания и строения материала.

При воздействии электромагнитных волн СВЧ-диапазона на текстильный материал из полярного волокнообразующего полимера происходит его дипольная поляризация, вследствие чего макромолекулы приобретают вращательный момент. Для перемещения макромолекул, совершающих колебательные движения в электромагнитном поле, затрачивается энергия, которая из-за наличия межмолекулярного трения выделяется в материале в форме теплоты [116, 117].

При расчете мощности, выделяющейся в виде тепла в единице объема диэлектрика, используется фундаментальная зависимость, описываемая формулой [114, 116]:

рормулой [114, 116]:
$$P_{y\partial} = 0.55 \cdot 10^{-12} \cdot \varepsilon \cdot tg\delta \cdot E^2 \cdot f , \qquad (4.1)$$

где P_{yo} . — удельная мощность, $B T/M^3$; ε — диэлектрическая проницаемость; $tg\delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь; E — напряженность электромагнитного поля, B/M; f — частота поля, Γ ц.

Эффективность диэлектрического нагрева не зависит от теплопроводности текстильного материала, что позволяет увеличить его скорость по сравнению с традиционными способами подвода тепла.

При пропитке тканого полотна в условиях СВЧ-обработки

удельная мощность, подводимая к генератору СВЧ-волн, расходуется на нагрев полимерного связующего, и ее величина может быть рассчитана по формуле [100, 115]:

$$P_{y\partial} = 4.18 \frac{\rho \cdot c}{\eta_t} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta \tau'} \tag{4.2}$$

где ρ — плотность нагреваемого вещества, г/см³; c — удельная теплоемкость вещества, Дж/(кг·град); $\Delta T/(\Delta \tau)$ — скорость нагрева вещества, град/с; η_t — термический КПД процесса, учитывающий потери тепла в окружающую среду.

При сушке комбинированного текстильного материала удельная мощность, подводимая к генератору СВЧ-волн, расходуется на нагрев материала (4.2) и испарение из него влаги:

$$P_{\rm y, I} = 4.18 \cdot r \frac{\Delta M}{\Delta t}, \tag{4.3}$$

где r — скрытая теплота испарения при данной температуре нагрева, Дж/кг; $\Delta M/(\Delta t)$ — скорость испарения, кг/(м 3 ·с).

Для расчёта удельной мощности сверхвысокочастотного генератора предложено использовать балансовое уравнение, учитывающее расход тепла на нагрев материала и испарение влаги [100, 115]:

$$P = \rho/\tau[c(t_2 - t_1) + r \cdot G_{en.}/G], \text{ Bt/m}^3, \qquad (4.4)$$

где τ — продолжительность нагрева, c; t_2 — конечная температура материала, K; t_1 — начальная температура материала, K; r — удельная теплота парообразования, Дж/кг влаги; $G_{\text{вл.}}$ — масса удалённой влаги, кг; G — масса материала, кг.

Тогда потребляемая мощность генератора с учётом КПД установки определяется по уравнению:

$$P_{\text{ген.}} = PV/1000 \cdot \eta_{\text{с.к.}} \cdot \eta_{\text{ген.}} , \qquad (4.5)$$

где $\eta_{\text{с.к.}}$ – КПД СВЧ-камеры, учитывающий потери теплоты в окружающую среду, %; $\eta_{\text{ген.}}$ – КПД генератора, %.

В работе [118] произведен расчет мощности генератора СВЧ для пропитки и сушки текстильных материалов с учетом расхода тепла на нагрев материала, полимерного связующего и испарения из него влаги,

рекомендуемые значения 300-850 Вт при частоте 2450 МГц.

Диэлектрическая проницаемость ε и тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$ являются основными электрофизическими характеристиками текстильного композиционного материала, а их произведение ε - $tg\delta$ представляет собой коэффициент диэлектрических потерь материала k, который определяется его влагосодержанием, температурой и частотой электрического поля [124, 126, 208, 209].

Таким образом, эффективность СВЧ-нагрева зависит от частоты электромагнитного поля f, квадрата напряженности электрического поля E и от диэлектрических свойств материала, характеризуемых величиной ϵ ·tg δ .

Увеличение напряженности поля ограничивается электрической прочностью обрабатываемого материала, поэтому повышение эффективности может быть достигнуто повышением частоты электромагнитного поля: чем выше частота, тем больше выделяемая удельная мощность. Для промышленного использования выделены частоты 915 МГц и 2450 МГц.

При выборе длины волны источника СВЧ-энергии надо учитывать то обстоятельство, что с увеличением частоты уменьшается глубина проникновения электромагнитной волны в диэлектрик с потерями [113, 114]. Глубина проникновения электромагнитных волн СВЧ-диапазона варьируется от нескольких сантиметров до 1–2 метров в зависимости от длины волны и диэлектрических свойств обрабатываемого материла. Одним из условий равномерного СВЧ-нагрева текстильного материала является превышение глубины проникновения электромагнитной волны над его толщиной [113]. Низкая частота 915 МГц имеет определенные технические затраты, которые лишь в определенных случаях оправдывают свое применение. Большинство промышленных СВЧ-установок для обработки текстильных материалов имеют экономичную «частоту» 2450 ± 50 МГц.

влияющим на эффективность СВЧ-Следующим фактором, обработки текстильных материалов, являются его диэлектрические свойства – диэлектрическая проницаемость (ε) и диэлектрические потери $(tg\delta)$. Диэлектрические свойства текстильного материала зависят от вида волокна, присутствия полярных веществ и электролитов, влажности материала, температуры частоты внешнего Основной электрофизической электромагнитного поля. характеристикой материала, определяющей возможность его нагрева в электромагнитном поле токов высокой частоты, является тангенс угла диэлектрических потерь – $tg\delta$ [113, 114].

Коэффициент $tg\delta$ является диэлектрической характеристикой нагреваемого материала, который определяет отношение активной мощности P_a , преобразующейся в тепло, к отражающей мощности P_o .

При этом полная мощность электромагнитного поля, подведенная к магнетрону, равна:

$$P = P_a + P_o. (4.6)$$

Произведение $tg\delta$ представляет собой коэффициент диэлектрических потерь материала k. Неполярные материалы, к которым относится полиэфирное, полипропиленовое, жесткоцепные не термопластичные волокна – хлопок, лен, вискоза, обладают низким значением коэффициента диэлектрических потерь и в СВЧ-поле нагреваются слабо. Полярные полиамидные полиакрилонитрильные материалы имеют на порядок выше коэффициент диэлектрических потерь и поэтому в электромагнитном поле нагреваются сильнее. Зависимость коэффициента диэлектрических потерь различных тканей от температуры (рис. 4.1) с равновесным влагосодержанием в электромагнитном поле мощностью 5,5 КВт частотой 15 МГц представлена в работе [114].

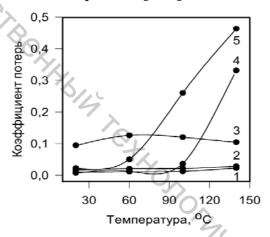


Рисунок 4.1 — Зависимость коэффициента диэлектрических потерь тканей от температуры: 1 — лавсан; 2 — триацетат; 3 — хлопок; 4 — полиакрилонитрил; 5 — полиамид

Таким образом, эффективный нагрев текстильного материала в СВЧ-поле происходит в случае, если он состоит из полярного волокнообразующего полимера, либо содержит полярное вещество, например, воду. Разогрев текстильного материала обеспечивается быстрым нагреванием полярного вещества. С ростом температуры эффективность СВЧ-нагрева повышается.

При формировании композиционных материалов способом пропитки водными дисперсиями связующих систему «волокнистый материал – вода» можно рассматривать как полярный диэлектрик, электрофизические характеристики которого близки к воде, а теплофизические – к текстильному материалу. Анализ зависимости

коэффициента диэлектрических потерь от влажности волокнистого материала, представленной в таблице 4.1 [114, 119], показывает, что при 100 %-ной влажности вид волокнообразующего полимера практически не влияет на диэлектрические свойства [114].

Таблица 4.1 – Зависимость фактора диэлектрических потерь

волокнистых материалов от влагосодержания

Волокно	Фактор потерь при содержании воды в тканях, %				
2	0,4	2	8	100	
Хлопок	0,062	0,075	0,13	1,4	
Полиамидное	0,015	0,020	0,5	1,5	
Полиакрилонитрильное	0,007	0,016	_	_	

Целью исследований, представленных в данной главе, является доказательство интенсифицирующего действия СВЧ-излучения на процессы формировании текстильных композиционных материалов, установить зависимость оптимальных режимов СВЧ-обработки от мощности излучения в рабочем диапазоне 300–850 Вт при частоте 2450 Гц, продолжительности воздействия электромагнитного излучения при концентрации полимерного связующего 100–300 г/л, провести сравнительный анализ физико-механических свойств текстильных композиционных материалов при традиционном способе формирования и с использованием СВЧ-обработки, рекомендовать рациональные режимы СВЧ-обработки для промышленного освоения.

4.2 Исследование равномерности распределения полимерного связующего в объеме материала в условиях СВЧ-сушки

Для предварительной оценки полноты пропитки тканого полотна полимерным связующим использована формула [61]:

$$N_{a\partial c} = \frac{c \cdot \left[k_0 \cdot \rho \cdot (\gamma \cdot b - m_0) + 640 \cdot \gamma \sqrt{\rho \cdot \eta \cdot V} \right]}{c \cdot \left[k_0 \cdot \rho \cdot (\gamma \cdot b - m_0) + 640 \cdot \gamma \sqrt{\rho \cdot \eta \cdot V} \right] + \gamma \cdot m_0} \cdot 100,$$
(4.7)

где c – концентрация полимерного связующего, г/л; k_0 – коэффициент пропитывания; ρ – плотность полимерной композиции, кг/м³; γ – плотность волокна, кг/м³; b – толщина тканого полотна, м; m_0 – масса 1 м² тканого полотна, кг; V – скорость движения тканого полотна на поточной линии, м/с; η – динамическая вязкость, Па·с.

В результате экспериментальных и теоретических исследований установлено значительное отклонение экспериментальных и расчетных значений при сушке текстильного материала в условиях СВЧ-обработки. Это позволило предположить, что в условиях СВЧ-обработки необходимо учесть заполнение полимерным связующим тупиковых пор и капилляров, содержащих защемленный воздух.

Совместно с проф. А.Г. Коганом, проф. В.И. Ольшанским, научными сотрудниками А.Н. Бизюком и С.В. Жерносеком разработана методика и проведены экспериментальные исследования равномерности распределения полимерного связующего в объеме тканой основы в СВЧ-обработки. Методика определения условиях основана измерении количества связующего, поглощенного волокнистым материалом при СВЧ-пропитке за определенное время. При этом будем считать, что дисперсные частицы полимера, размеры которых много капилляров размера пор И волокнистого меньше перемещаются силами вязкого трения вместе с дисперсионной средой. Введен коэффициент пропитки, характеризующий относительное содержание полимерного связующего в единице объема волокнистого материала:

$$k_{npon} = \frac{V_{cs}}{V_{npon}}, \tag{4.8}$$

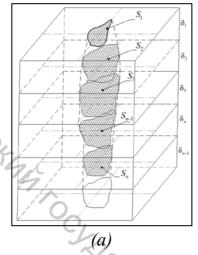
где V_{cs} – исходный объем полимерного связующего, мм³; V_{npon} – объем распространения полимерного связующего в материале после обработки, мм³.

При $V_{ce} = const$, чем больше объем пропитанного текстильного материала, тем меньше коэффициент пропитки и, соответственно, более полно протекает процесс пропитки.

В качестве модельного использован многослойный материал, состоящий из n слоев тканых полотен из вискозных нитей. На поверхность многослойного материала наносился заданный объем полимерного связующего ($V_{cs}=0.5\,$ мл), далее образцы подвергались воздействию СВЧ-излучения при различных режимах. После полного высыхания в естественных условиях образцы разделялись на слои и подвергались фотосьемке (рис. 6.10). Фотографии загружались в приложение Ascon Компас-3D и на каждом слое с помощью инструментального аппарата приложения обводился контур видимой границы полимерного связующего и определялась площадь его распространения.

Для тарирования значений в процессе получения снимков применялась измерительная линейка. Суммарный объем распространения полимерного связующего определяется умножением

суммарной площади распространения полимерного связующего на толщину одного слоя тканого полотна. Толщина ткани δ определялась согласно ГОСТ 12023-2003.



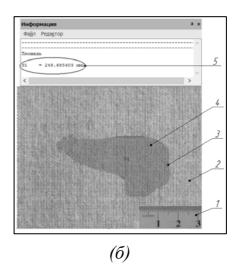


Рисунок 4.2 — Схема определения объема распространения связующего: а — схема распространения полимерного связующего в многослойном материале; б — определение площади распространения полимерного связующего с помощью приложения Ascon Komnac-3D:

1 – линейка; 2 – тканое полотно; 3 – контурная граница; 4 – пропитанный участок; 5 – численное значение площади в окне измерений

Для исследования зависимости коэффициента пропитки тканого полотна водной дисперсией полимерного связующего от режимов СВЧ-обработки проведен полный факторный эксперимент, уровни и интервалы варьирования факторов представлены в таблице 4.2.

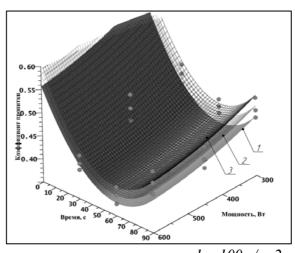
Таблица 4.2 – Уровни и интервалы варьирования факторов

эксперимента

Наименова	ние фактора	Обозначение	Уровни варьирования			Интервал варьирования	
			-1	0	+1	7/_	
Мощность, Е	B_{T}	P	300	450	600	150	
Продолжите	льность, с	τ	30	60	90	30	
Концентраци акрилата, г/л	-	c	100	200	300	100	

В результате статистической обработки экспериментальных данных получена регрессионная модель (4.9) и графическая интерпретация (рис. 4.3) зависимости коэффициента пропитки от концентрации связующего (c), мощности (P) и продолжительности (τ) СВЧ-обработки:

$$k_{\text{проп}} = (0.021\tau^2 - 2.54\tau + 238) \cdot (-2.79 \cdot 10^{-3}P^2 + 3.59P - 4170) \quad (4.9)$$
$$\cdot (-3.91 \cdot 10^{-10}c - 7.78 \cdot 10^{-7})$$



DATE OCKALL

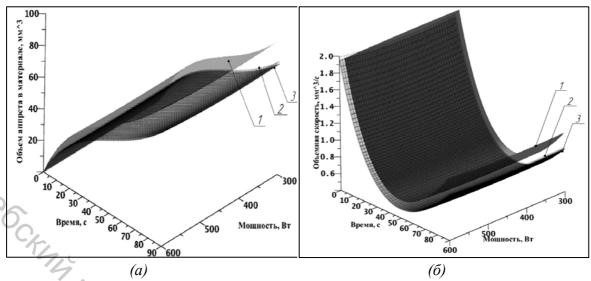
концентрация полимерного связующего: 1-100 г/л; 2-200 г/л; 3-300 г/л

Рисунок 4.3 — Зависимость коэффициента пропитки тканого полотна от мощности и продолжительности СВЧ-обработки

При увеличении мощности СВЧ-излучения эффективность пропитки возрастает, что подтверждается уменьшением коэффициента пропитки, оптимальная продолжительность обработки, которая соответствует минимуму функциональной зависимости (4.9), составляет 60 с.

Зная коэффициент пропитки, его зависимость от мощности СВЧизлучения и продолжительности обработки, возможно определить объем связующего, содержащегося в поровом пространстве тканого полотна, а также объемную скорость пропитки. Объем пропитанного произведению участка тканого полотна V_{npon} равен высоты полимерной композиции капиллярного поднятия толщину материала. На рисунке 4.4 а представлена зависимость объема полимерного связующего, содержащегося в поровом пространстве тканого полотна из вискозных нитей, которая определялась как коэффициента пропитки k_{npon} (4.8) на объем произведение участка V_{npon} . Объемная скорость v_{v} определена как пропитанного производная объема впитанного полимерного связующего по времени (рис. $4.4 \, \delta$).

Для характеристики капиллярно-пористой структуры используем эффективный радиус капилляра $r_{9\phi\phi}$. Существует ряд приближенных соотношений, позволяющих рассчитывать эффективный радиус в зависимости от схемы укладки волокон и нитей [120].



концентрация полимерного связующего: 1-100 г/л; 2-200 г/л; 3-300 г/л

Рисунок 4.4—Зависимость объема полимерного связующего в поровом пространстве (а) и объемной скорости пропитки (б) от параметров СВЧ-обработки

Для определения эффективного радиуса капилляра и его зависимости от параметров СВЧ-обработки использована формула Пуазейля [76]:

$$v_{v} = \frac{\pi \cdot r_{3\phi\phi}^{4}}{8\eta \cdot l_{k}} \left(\frac{2\sigma \cdot \cos\theta}{r_{3\phi\phi}} - \rho_{CB} \cdot g \cdot l_{k} \cdot \sin\alpha_{k} \right), \tag{4.10}$$

где v_{v} – объемная скорость течения полимерного связующего, м³/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; $r_{9\phi\phi}$ – эффективный радиус, м; $\rho_{\text{св}}$ – плотность полимерного связующего, кг / м³; $l_{\text{к}}$ – длина впитывания полимерного связующего в капилляр, м; α_{k} – угол наклона капилляра к поверхности связующего, град.

С использованием зависимости для объемной скорости и свойств водной дисперсии полимерного связующего установлена математическая зависимость эффективного радиуса капилляров тканого материала из вискозных нитей от мощности и продолжительности СВЧ-обработки, графическое изображение которой представлено на рисунке 4.5. Как видно, за 10 с СВЧ-обработки эффективный радиус капилляра увеличивается в 3 раза.

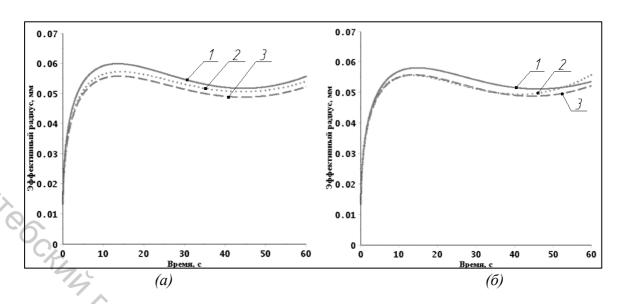


Рисунок 4.5 — Зависимость эффективного радиуса от концентрации полимерного связующего и режимов СВЧ-обработки: а — мощность СВЧ-излучения 450 Вт, концентрация полимерного связующего: 1-100 г/л; 2-200 г/л; 3-300 г/л;

б – мощность СВЧ-излучения: 1 – 300 Вт; 2 – 450 Вт; 3 – 600 Вт

С использованием математической модели зависимости коэффициента пропитки (4.9) от режимов обработки проведен расчет объема водной дисперсии полимерного связующего V_{cs} , содержащегося в поровом пространстве тканого полотна (табл. 4.3).

Таблица 4.3 – Расчетные и экспериментальные значения объема связующего, содержащегося в поровом пространстве текстильного полотна

Концентрация дисперсии, с,	Объем V_{npon} , мм 3	Коэффициент пропитки, <i>к_{проп}</i>	Объем расч. $V_{c\theta}$, мм 3	Объем эксп. V_{c_6} , мм 3		
г/л	npon)	(формула 4.9)	C	20)		
		τ=60 c, P=300 Bτ	7,0			
100	186,07	0,4404	81,95	80,9		
200	149,03	0,4615	68,77	66,4		
300	139,76	0,4826	67,45	64,6		
	τ=60 c, P=450 Bτ					
100	200,83	0,4108	82,49	81,4		
200	160,85	0,4305	69,24	67,9		
300	150,80	0,4502	67,89	68,3		
τ=60 c, P=600 B _T						
100	218,10	0,3978	86,76	86,0		
200	174,70	0,4168	72,81	69,4		
300	163,80	0,4359	71,40	70,4		

Отклонение расчетных значений V_{cs} от экспериментальных составляет не более 5 %, поэтому математическая модель может

использоваться для расчета рациональных режимов СВЧ-обработки при формировании текстильных каркасных композиционных материалов способом пропитки.

Результаты экспериментальных исследований подтверждают эффективность интенсификации процесса сушки в условиях воздействия электромагнитных волн СВЧ-диапазона. С увеличением мощности СВЧ-обработки объем порового пространства, заполняемого полимерным связующим, увеличивается.

4.3 Исследование процессов сушки и термофиксации при формировании комбинированных текстильных материалов в условиях СВЧ-нагрева

Для завершения процессов сушки и термофиксации комбинированных текстильных материалов при использовании в качестве теплоносителя горячего воздуха ($120-180~^{\circ}$ C) требуется 2-7 мин, в зависимости от сырьевого состава тканого полотна и концентрации полимерного связующего. Причем продолжительность термофиксации определяется лишь концентрацией полимерного связующего.

Сушка комбинированных текстильных материалов в условиях нагреве СВЧ-излучения основана на диэлектрическом содержащейся в полимерном связующем. Известно, что при влажности материала, приближающейся к 100 %, вид волокнистого материала не оказывает влияние на электрофизические свойства материала и эффективность диэлектрического нагрева [119]. Система «текстильный материал – водная дисперсия полимерного связующего» представляет собой диэлектрик, электрофизические характеристики которого близки к воде, а теплофизические - к тканому материалу. В работе [118] получена упрощенная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь tgδ от влагосодержания и температуры комбинированных каркасных текстильных материалов из вискозных нитей (рис. 4.6).

Основное отличие СВЧ-сушки от конвективной состоит в следующем. В процессе конвективной сушки температура на поверхности материала выше, чем в центре, что препятствует перемещению влаги от центра к поверхности. Перемещение влаги к поверхности и ее испарение происходит за счет концентрационного градиента. При СВЧ-сушке температура в центре выше, чем на поверхности материала, термодиффузия направлена от центра к поверхности, но при этом влагосодержание на поверхности выше, чем в центре, т. е. концентрационная диффузия влаги направлена в обратном направлении и оказывает сопротивление перемещению влаги.

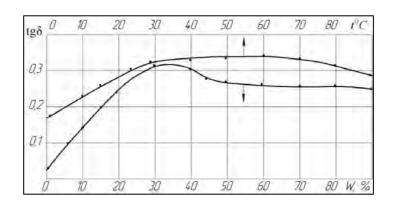


Рисунок 4.6 – Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь tgδ от влагосодержания и температуры для комбинированных текстильных материалов

Испарение влаги в центре материала больше, чем на поверхности, так как температура в центре выше, чем на поверхности. Возникающий градиент давления является движущей силой переноса влаги в виде пара в объеме комбинированного материала [99, 100].

Проведены экспериментальные исследования процесса СВЧтекстильных каркасных композиционных материалов полиамидных и вискозных нитей и сравнение с кинетикой сушки тех же материалов в условиях конвективного нагрева. Сушка в условиях СВЧ-излучения проводилась при мощности генератора 300, 600 и 850 Кинетические частоте 2450 $M\Gamma_{II}$. кривые СВЧ-сушки представлены на рисунке 4.7.



Рисунок 4.7 – Кинетические кривые сушки текстильных композиционных материалов в условиях СВЧ-нагрева

В СВЧ-обработки влажный начале процесса текстильный быстро нагревается материал И скорость испарения влаги увеличивается, достигая максимального значения. Испарение влаги

происходит при температуре близкой к 100 ⁰C — температуре кипения воды. После достижения максимального значения происходит снижение интенсивности испарения и температура материала повышается. На кривых сушки практически не наблюдается периода постоянной скорости, сушка протекает в периоде падающей скорости. Эта особенность СВЧ-сушки характерна для тонких материалов [100].

Анализируя и сравнивая конвективную и СВЧ-сушку текстильных каркасных композиционных материалов, можно сделать следующие выводы:

- при одинаковой мощности СВЧ-излучения $P_{\text{ген}}$ и начальном влагосодержании W_0 кривые сушки для полиамидных и вискозных материалов практически совпадают, изменение концентрации полимерного связующего также не изменяет зависимости, что можно объяснить высокой скоростью испарения влаги с объема композиционного материала, толщина которого не превышает $4*10^{-3}$ м;
- с увеличением мощности генератора СВЧ-излучения интенсивность испарения влаги возрастает и продолжительность сушки до равновесного влагосодержания сокращается;
- СВЧ-сушка обеспечивает достижение равновесного влагосодержания материала за 70–90 с при мощности $P_{\it ген}=600$ –850 Вт, в то время как конвективная сушка за 130–200 с для полиамидных материалов и 340–380 с для вискозных при $t_{\rm B}=120$ –140 $^{\rm 0}{\rm C}$ и концентрации полимерного связующего 100–300 г/л;

В работе [121] доцентом А.И. Ольшанским и профессором В.И. Ольшанским установлено, что сокращение продолжительности СВЧ-сушки пропорционально возрастанию мощности генератора СВЧ, а также получена формула для расчета продолжительности СВЧ-обработки тонких текстильных материалов до заданного влагосодержания:

$$\tau = -\frac{1}{k} lg \frac{W - W_p}{W_0 - W_p}, \tag{4.11}$$

где k – коэффициент, не зависящий от параметров процесса обработки, выражается линейной зависимостью $k = 4 \cdot 10^{-5} P_{\text{reh}}$ [121].

С использованием формулы (4.11) рассчитана требуемая продолжительность СВЧ-обработки для достижения равновесного влагосодержания текстильных каркасных композиционных материалов из вискозных и полиамидных нитей (табл. 4.4). Из приведенных данных следует, что по сравнению с конвективной СВЧ-сушка позволяет сократить продолжительность в 2–3 раза для полиамидных материалов и 4–5 раз для вискозных материалов.

Таблица 4.4 — Расчетные и экспериментальные значения продолжительности СВЧ-сушки текстильных каркасных композиционных материалов

Каркасные текстильные материалы из вискозных и полиамидных нитей						
	$P_{\text{2PH}} = 300 \text{ Br}$					
W_p , %	2,3	5	10	20	30	
$ au_{'_{\mathfrak{I}KCN}}$, C	190	108	77	43	31	
$ au_{pacy.}$, c	193	110	75	45	29	
$P_{\text{\tiny ZEH}} = 600~\mathrm{Br}$						
$ au_{'_{\mathfrak{I}KCN},\mathcal{C}}$	92	54	35	21	16	
$ au_{pacy.}$, c	95	55	37,5	23	15	
$P_{eeh} = 850 \; \mathrm{Br}$						
$ au_{{}^{\prime}\!$	72	41	26	14	11	
$ au_{pacu.}, c$	68	39	26	16	10	

Следующей важнейшей задачей, решаемой в данном разделе, исследование распределения дисперсии связующего в объеме тканого полотна после сушки. При сушке каркасных текстильных материалов, толщина которых составляет более возникает проблема миграции частиц дисперсной связующего к поверхности полимерного тканого полотна высушивании. В результате миграции на поверхности образуется пленка, а глубинные слои обедняются связующим. Это приводит к физико-механических и эксплуатационных ухудшению готового материала: уменьшается воздухопроницаемость, возрастает способность к расслаиванию, повышается жесткость. Кроме того, возникают проблемы при термофиксации, так как образующаяся на поверхности пленка при высоких температурах (170–180 °C) начинает разрушаться, что также приводит к ухудшению свойств и внешнего вида материалов декоративно-отделочного назначения.

Для исследования использован метод послойного анализа, позволяющий судить о равномерности распределения дисперсии по объему ткани [76]. Тканое полотно из вискозных нитей пропитывалось водной дисперсией стирол-акрилата — 100 и 500 г/л, продолжительность пропитки — 10 минут, температура пропитки — 20 °C. Затем одна часть образцов подвергалась конвективной сушке при температуре 120 °C в течение 340—400 с, другая часть — CBЧ-сушке при мощности 600 Вт в течение 90 с.

Количество отложившейся дисперсной фазы определялось на уточных нитях длиной 10 см, взятых из различных слоев пропитанного полотна, путем их взвешивания и вычитания из найденного значения веса таких же нитей, взятых из непропитанного тканого полотна. Взвешивание нитей осуществлялось на лабораторных аналитических весах с точностью 0,0001 г. Результаты проведенных экспериментов представлены на рисунках 4.8, 4.9.

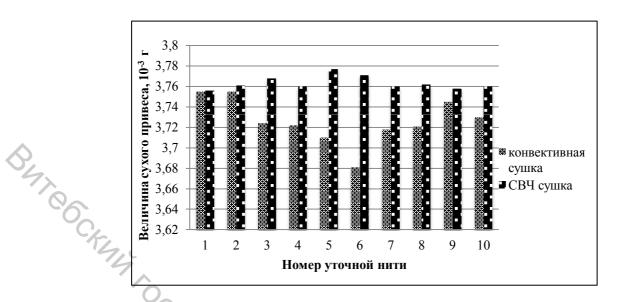


Рисунок 4.8 – Величина сухого привеса нитей утка тканого полотна композита при концентрации дисперсии стирол-акрилата 100 г/л

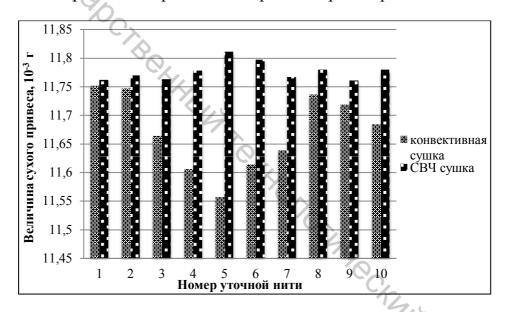


Рисунок 4.9 — Величина сухого привеса нитей утка тканого полотна композита при концентрации стирол-акрилата 500 г/л

Как видно из представленных диаграмм, в случае конвективной сушки количество отложившейся дисперсной фазы в глубинных слоях меньше, чем в поверхностных. Это подтверждает миграцию частиц полимерного связующего к поверхностным слоям вместе с удаляемой при конвективной сушке влагой. При СВЧ-сушке влага удаляется в виде пара, не увлекая дисперсную фазу к поверхности материала.

Так как сушка осуществляется изнутри наружу, поверхность материала остается «холодной» и влажной до тех пор, пока изнутри больше не добавится пара и поверхность не начнет сохнуть. Это предотвращает, во-первых, преждевременное образование полимерной

пленки, которая препятствует сушке глубинных слоев, во-вторых, длительное действие высоких температур на волокнообразующий полимер и частицы полимерного связующего, которое вызывает деструкцию волокна и связующего, в результате чего происходит ухудшение свойств готового материала.

Результаты, характеризующие эффективность СВЧ-обработки, представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Сравнительный анализ конвективной и СВЧ-сушки

композиционных текстильных материалов из вискозных нитей Наименование показателя Концентрация Концент

Наименование показателя	Концентрация		Концентрация	
Transcriobanne nokasaresin	дисперсии 100 г/л		дисперсии 500 г/л	
4	конвек-	СВЧ-	конвек-	СВЧ-
	тивная	сушка	тивная	сушка
	сушка	(600 BT)	сушка	(600 BT)
Продолжительность сушки, с	340	90	400	90
Содержание дисперсной фазы в	16,	,2	35	5,5
количестве дисперсии,				
соответствующей привесу нитей, %				
Общее количество	9,5	9,6	29,8	30,0
адсорбированной дисперсии на				
нитях при традиционной пропитке,				
% от массы сухих нитей				
Общее количество	// -	14,3	-	32,8
адсорбированной дисперсии на	7			
нитях при СВЧ-пропитке, % от				
массы сухих нитей	4			
Относительный прирост количества	- '//	48,9	-	9,3
адсорбированной дисперсии, %		>		
Коэффициент вариации величины	0,65	0,17	0,54	0,12
привеса уточных нитей по слоям, %		4,		

Анализируя результаты исследований, можно сделать следующие выводы:

- продолжительность сушки в условиях СВЧ-нагрева не зависит от концентрации полимерного связующего и сокращается в 4 раза;
- при пропитке тканого полотна в условиях СВЧ-обработки повышается степень полезного использования водной дисперсии полимерного связующего, так как количество дисперсной фазы, отложившейся на волокне, немного ниже ее содержания в количестве дисперсии, соответствующей привесу нитей;
- в условиях СВЧ-сушки значительно снижается миграция дисперсной фазы к поверхностным слоям материала, о чем свидетельствует коэффициент вариации величины сухого привеса уточных нитей по слоям.

Заключительной операцией технологического процесса формирования текстильных композиционных материалов является

термофиксация, в результате которой они приобретают необходимую жесткость.

Для подтверждения эффективности использования СВЧизлучения при термофиксации проведены экспериментальные исследования зависимости жесткости от продолжительности СВЧнагрева, пропитанного полимерным связующим тканого полотна, и сравнение с эталонным образцом, подготовленным по традиционной технологии конвективной сушки.

В таблице 4.6 представлена последовательность операций и режимы формирования эталонного образца и объекта исследований. Продолжительность сушки и термообработки горячим воздухом выбрана в зависимости от концентрации полимерного связующего.

Таблица 4.6 – Последовательность операций при формировании текстильных каркасных композиционных материалов

Классическая технология	Формирование в условиях			
70	СВЧ-обработки			
Пропитка раствором полимерного связующего (200 г/л) $t=40^{-0}$ C, $\tau=600$ с				
Отжим 60–80 %				
Сушка $t=140~^{0}$ С; $\tau=360~c$ СВЧ-обработка $P_{eeh}=600~BT$, $\tau=90~c$				
Термофиксация t=170 °C, τ=120 с	-			

Графическая зависимость показателя жесткости текстильных каркасных композитов продолжительности термофиксации OT 4.10. Вид полученных зависимостей представлена на рисунке продолжительности СВЧ-нагрева показателя жесткости OT свидетельствует о том, что процесс СВЧ-обработки протекает в две стадии. Как видно, на начальном этапе обработки происходит сушка текстильного композиционного материала и показатель жесткости изменяется незначительно. Продолжительность этой стадии составляет 25-50 с в зависимости от мощности СВЧ-излучения.

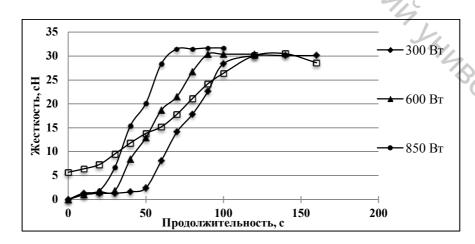


Рисунок 4.10 – Зависимость показателя жесткости текстильных композиционных материалов от продолжительности термофиксации

Сушка происходит в режиме запаривания, что облегчает диффузию полимерного связующего в волокнистый материал за счет пластифицирующего действия водяного пара.

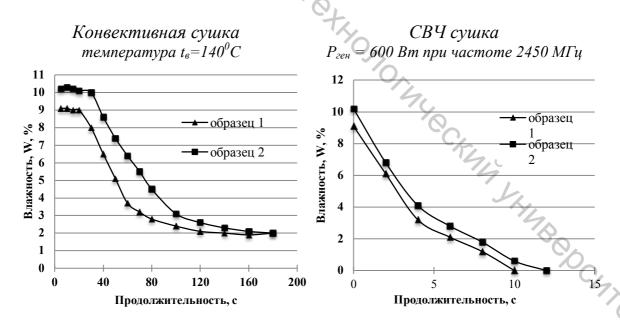
Вторая стадия соответствует операции термофиксации. Скорость изменения показателя жесткости при СВЧ-нагреве значительно выше, чем при термообработке в среде горячего воздуха. Это можно объяснить большей скоростью диффузии полимерного связующего в структуру волокнистого материала и значительным разогревом в СВЧ-поле по всему объему.

Использование СВЧ-нагрева технологии формирования материалов текстильных каркасных композиционных позволяет совместить операции термофиксации, сушки сократить И продолжительность теплового воздействия на материал.

Проведено исследование СВЧ-сушки при формировании слоистых текстильных композитов. В качестве объектов исследования выбраны: слоистый материал флизелин — льняная ткань 180 г/m^2 ; слоистый текстильный материал флизелин — льняная ткань 270 г/m^2 . При соединении полотна основы (флизелин) и декоративной льняной ткани использовано полимерное связующее следующего состава:

- поливиниловый спирт (4 %) 99,6–99,8 %;
- ортофосфорная кислота (85 %) 0,2–0,4 %.

Кинетические кривые сушки слоистых материалов в условиях СВЧ и сравнение с конвективной сушкой представлены на рисунке 4.11.



образец 1 — слоистый материал (нетканое полотно — льняная ткань $180 \ \text{г/m}^2$); образец 2 — слоистый материал (нетканое полотно — льняная ткань $270 \ \text{г/m}^2$)

Рисунок 4.11 – Кинетические кривые сушки слоистых текстильных композиционных материалов

Из полученных графиков изменения влагосодержания слоистого текстильного материала в процессе сушки видно, что при конвективной сушке выход на равновесное значение достигается за 160–180 с, в то время как СВЧ-сушка позволяет достигнуть нулевой влажности за 10–12 с. Очевидное отличие кинетики сушки — отсутствие стадии прогревания, что объясняется спецификой СВЧ-нагрева, термодиффузия направлена от центра к поверхности материала. Отсутствие воздействия высокой температуры на текстильный материал положительно влияет на его свойства.

4.4 Исследование влияния СВЧ-обработки на свойства текстильных композиционных материалов

Степень воздействия СВЧ-излучения на структуру и свойства материала зависит диэлектрических волокнистого OT волокнообразующего полимера и от влагосодержания материала в процессе диэлектрического нагрева. При СВЧ-нагреве полярных происходит дипольная поляризация, сопровождающаяся волокон сегментальной подвижностью макромолекул, разрыв межмолекулярных связей и образование новых, более энергетически выгодных, релаксация внутренних напряжений [119]. При воздействии электромагнитных волн на неполярные волокна эффективность процесса определяется наличием полярного компонента - воды. Релаксационные процессы протекают в волокне в результате создающегося при закипании воды эффекта запаривания, при этом повышаются прочностные свойства, стабилизируются линейные размеры текстильного материала.

В ходе исследования пропитки, сушки и термообработки текстильных композиционных материалов в условиях СВЧ-обработки установлено следующее:

- происходит более полное и равномерное заполнение капиллярно-пористой структуры волокнистого материла полимерным связующим;
- отсутствует миграция дисперсной фазы полимерного связующего к поверхностным слоям материала;
- мягкие условия воздействия высоких температур на волокно, так как СВЧ-излучение нагревает не волокнообразующий полимер, а воду, содержащуюся в связующем.

Следствием вышеуказанных преимуществ является улучшение их свойств. Проведено сравнение некоторых физико-механических свойств текстильных каркасных композиционных материалов из вискозных нитей, полученных по традиционной и с использованием СВЧ-поля технологиям формирования.

Исследование микроструктуры готового материала проведено с инвертированного микроскопа. На рисунке представлены снимки срезов материала ИЗ вискозных нитей, полученных по традиционной и СВЧ-технологиям с 50-кратным увеличением. Полученные изображения доказывают, во-первых, более полное и равномерное распределение связующего в объеме тканого SHIP COCKING TOCK полотна, во-вторых, – отсутствие нескоалисцированных глобул.

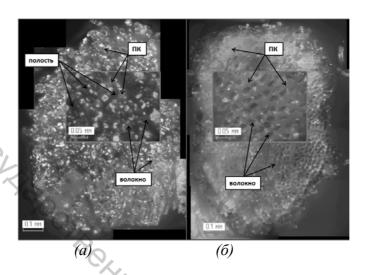


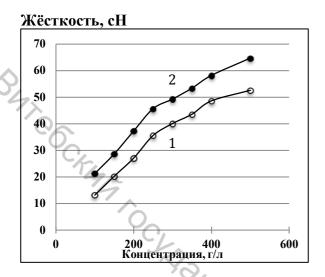
Рисунок 4.12 – Микрофотографии текстильного каркасного композиционного материала из вискозных нитей: а – традиционная технология; б – СВЧ-технология

Сравнение технологий проведено по некоторым значимым показателям качества текстильных композиционных материалов для всех классификационных групп: жесткость, устойчивость к истиранию, разрывная нагрузка, водоотталкивающие свойства. Рекомендуемые значения показателей зависят от конкретного назначения материала.

Полученные экспериментальные данные (рис. свидетельствуют о том, что под воздействием электромагнитного поля СВЧ-диапазона происходит улучшение физико-механических свойств при меньшей концентрации водной дисперсии полимерного связующего и продолжительности тепловых обработок.

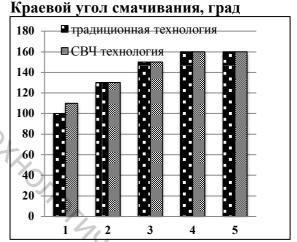
Использование СВЧ-нагрева позволило увеличить жесткость комбинированных каркасных текстильных материалов в среднем на 25-30 %, стойкость к истиранию – в 1,5–1,7 раза, прочность – на 15–20 %.

исследования процесса придания композиционным материалам водоотталкивающих свойств показали, что краевой угол смачивания практически не отличается от значений по традиционной технологии. Это связано с тем, что достижение необходимого эффекта отталкивания смачивающей жидкости зависит от глубины и равномерности распределения гидрофобизатора. Образующаяся на поверхности пленка, даже в случае значительной миграции дисперсной фазы, создает требуемые показатели водоотталкивания. Однако необходимый эффект достигается при значительном сокращении продолжительности термообработки.









Концентрация препарата Nuva FHN: 1-20 г/л; 2-30 г/л; 3-40 г/л; 4-50 г/л; 5-60 г/л

Рисунок 4.13 — Результаты сравнения физико-механических свойств текстильных каркасных композиционных материалов из вискозных нитей: 1 — традиционная технология; 2 — СВЧ-технология

Для слоистых текстильных композиционных материалов, в том числе ворсовых, проведены исследования показателей качества — прочность связи между слоями и устойчивость ворсового покрытия к истиранию после конвективной сушки полотен и в условиях СВЧ-нагрева. Объектами исследования являлись:

– слоистый текстильный материал, состоящий из полотна основы (бумага/флизелин) и льняной ткани (270 г/м 2), полимерного связующего – поливиниловый спирт (4–6 %);

– слоистый ворсовой материал, состоящий из полотна основы (бумага/флизелин/ткань), декоративное покрытие из полиамидного ворса, полимерного связующего – поливинилацетатная дисперсия, поливиниловый спирт (90/10).

Результаты исследований представлены на рисунках 4.14, 4.15.

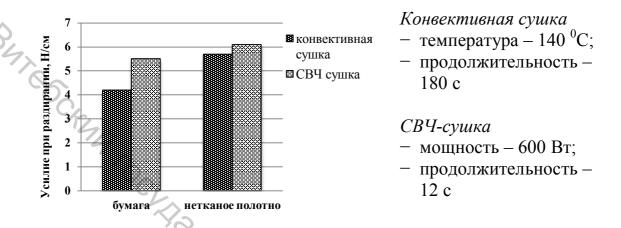


Рисунок 4.14 – Результаты сравнения физико-механических свойств слоистых текстильных композиционных материалов

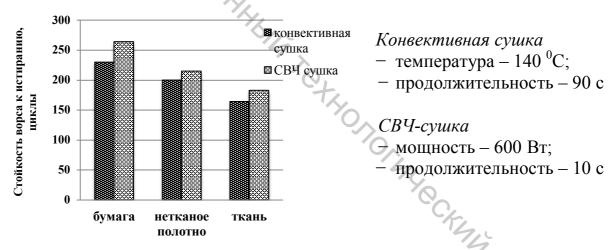


Рисунок 4.15 — Результаты сравнения физико-механических свойств слоистых материалов с ворсовым покрытием

Таким образом, использование СВЧ-обработки при формировании текстильных композиционных материалов позволяет решать следующие задачи:

- интенсифицировать процессы пропитки и сушки: скорость пропитки возрастает в 10–12 раз по сравнению с традиционным способом, продолжительность сушки сокращается в 3–5 раз для каркасных и 15–20 раз для слоистых текстильных материалов;
- уменьшить расход водной дисперсии полимерного связующего при формировании каркасных текстильных материалов на 10–15 % по сравнению с традиционным способом при достижении аналогичной

жесткости;

– получать свойствами: материалы с улучшенными каркасных текстильных материалов повысить стойкость к истиранию в 1,5-2 раза, прочность на 10-20 %; для слоистых материалов увеличить BOL BANDOCKANA TOCKANA TOCKANA VANABED CONTROL прочность связи между слоями на 30-40 % (бумажная основа, 3-5 % (флизелиновая основа); для слоистых ворсовых увеличить устойчивость

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Новые материалы / под ред. Ю. С. Карабасова. Москва : MИСИС, 2002. 362 с.
- 2. [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.jeccomposites.com. Дата доступа: 23.10.2016.
- 3. Дружинина, Т. В. Полимерные композиционные материалы: основные понятия, получение и свойства полимерных матриц: учебное пособие / Т. В. Дружинина [и др.]. Москва : МГТУ им. А. Н. Косыгина, 2010. 44 с.
- 4. Власенко, В. И. Возможности использования многослойных многофункциональных текстильных композитов / В. И. Власенко, С. И. Ковтун, Н. П. Березненко // Технический текстиль. 2005. № 12. С. 23—25.
- 5. Ясинская, Н. Н. Композиционные текстильные материалы : [монография] / Н. Н. Ясинская, В. И. Ольшанский, А. Г. Коган. Витебск : УО «ВГТУ», 2016. 299 с.
- 6. Пинчук, Л. С. Материаловедение и конструкционные материалы / Л. С. Пинчук [и др.]; под ред. В. А. Белого. Минск: Вышэйшая школа, 1989. 461 с.
- 7. Трещалин, Ю. М. Композиционные материалы на основе нетканых полотен. Москва : МГУ им. М. В. Ломоносова, 2015. 220 с.
- 8. Ульвачева, Л. А. Ассортимент многослойных текстильных материалов и разработка их классификации / Л. А. Ульвачева [и др.] // Дизайн и технологии. 2015. N 44 (86). С. 71—78.
- 9. Ульвачева, Л. А. Ассортимент многослойных текстильных материалов / Л. А. Ульвачева, В. И. Бесшапошникова // Сб. науч. трудов аспирантов МГУДТ. Москва, 2014. С. 38–44.
- 10. Липатова, Л. А. Разработка методов оценки и исследование формовочной способности многослойных композиционных текстильных материалов : дисс. ... канд. техн. наук : 05.19.01 / Л. А. Липатова. Москва, 2017. 201 с.
- 11. Кузьмичев, В. Е. Теория и практика процессов склеивания деталей одежды: учебное пособие / В. Е. Кузьмичев, Н. А. Герасимова. Москва: Академия, 2005. 255 с.
- 12. Усманова, Э. Д. Способы получения многофункциональных текстильных материалов с различными полимерными покрытиями / Э. Д. Усманова, И. В. Усманов // Вестник Казанского технологического университета. 2014. № 11. С. 283—284.
- 13. Панин, М. И. Разработка композиционных материалов на базе мотальных паковок специального назначения : дисс. ... канд. техн. наук : 05.19.02 / М. И. Панин. Москва, 2012. 158 с.

- 14. Бесшапошникова, В. И. Текстильные материалы в производстве одежды: учебное пособие / В. И. Бесшапошникова. Саратов: Изд-во СГТУ, 2011. 208 с.
- 15. Кербер, М. Л. Композиционные материалы / М. Л. Кербер // Соросовский образовательный журнал. 1999. \mathbb{N}_2 5. С. 33—41.
- 16. Перепелкин, К. Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты / К. Е. Перепелкин. СПб. : Научные основы и технологии, 2009. 380 с.
- 17. Федосеева, О. Ю. Разработка нового типа комплексного текстильного материала и экспрессного метода оценки его износостойкости: На примере обивочного материала автомобильного назначения: дисс. ... канд. техн. наук: 05.19.01 / О.Ю. Федосеева. Москва, 2000. 183 с.
- 18. Стельмашенко, В. И. Материалы для одежды и конфекционирование / В. И. Стельмашенко, Т. В. Розаренова. Москва: Академия, 2010. 320 с.
- 19. Milašius, R. Development of an electrospun nanofibrous web with hyaluronic acid / Milašius R., Ragaišiene A., Rukuižiene Ž., Mikučioniene D., Ryklin D., Yasinskaya N., Yeutushenka A. // Fibres and Textiles in Eastern Europe. 2017. T. 25, № 5. C. 8–12.
- 20. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / М. Л. Кербер [и др.]; под ред. А. А. Берлина. СПб. : Професссия, 2008. 560 с.
- 21. Перепелкин, К. Е. Полимерные композиты на основе химических волокон: основные виды / К. Е. Перепелкин // Технический текстиль. -2006. N = 13. C. 18 26.
- 22. Применение прямых методов формования при производстве крупногабаритных деталей из стеклопластиков / В. А. Нелюб [и др.] // Химическая технология. 2012. Т. 13. № 12. С. 735—739.
- 23. Патент 2011511 РФ. Способ пропитки пористых материалов и устройство для его осуществления / Д. А. Беленков, В. Г. Новосёлов, Ю. А. Сров, А. Е. Озерский, С. А. Аксельрод; заявл. 18.12.1991; опубл. 30.04.1994.
- 24. Патент 2290468 РФ. Способ обработки синтетических и искусственных текстильных материалов парашютов / В. М. Зачёсов, О. Н. Чумакова; заявл. 05.05.2005; опубл. 27.12.2006, Бюлл. № 36.
- 25. Патент 1490187. Способ пропитки ткани раствором и устройство для его осуществления. / Н. П. Иванов, М. Ю. Бурмистрова, О. В. Смирнова; заявл. 26.05.1987; опубл. 30.06.1989.
- 26. Кордикова, Е. И. Поведение тканого наполнителя при пропитке под давлением / Е. И. Кордикова, А. В. Спиглазов // Труды БГТУ.

- Сер. IV. Химия и технология органических веществ. 2008. Вып. XVI. С. 136–138.
- 27. Ватул, А. Нетканые материалы Spanlaced и Airlaid для производства протирочных средств и изделий медицинского назначения / А. Ватул // Текстильная промышленность: спецвыпуск «Научный альманах». Москва, 2005. № 7–8. С. 14.
- 28. Капкаев, А. А. Нетканые материалы: тенденции развития рынка / А. А. Капкаев // Текстильная промышленность. Москва, 2007. № 11. С. 25.
- 29. Айзенштейн, Э. М. Женевская международная выставка и научная конференция по нетканым материалам / Э. М. Айзенштейн // Текстильная промышленность. Москва, 2005. Вып. № 10. С. 42–45.
- 30. Айзенштейн, Э. М. Нетканые материалы и технический текстиль на выставке в Майами-Бич (США) / Э. М. Айзеншейн // Технический текстиль. 2004. № 10. С. 4.
- 31. Андреев, А. А. Возможности практического применения нетканых полотен Viledon® для изготовления композиционных материалов / А.А. Андреев // Нетканые материалы. Продукция, оборудование, технологии. Москва, 2008. Вып. № 2. С.17–22.
- 32. Многослойный нетканый материал. Multi-Layer nonwoven fabuic: пат. 6992028 США, МПК7 D 04 H 1/54, D 04 H 3/14 Kimberly-Clark World Wide, Inc., Thomaschefsky Gvaig F., Brown Lawrence М.; №10/237455; заявл. 09.02.2002; опубл. 31.01.2006. НПК 442/411 // Англ. Легкая промышленность: РЖ 12 / ВИНИТИ. 2006. № 9, 06.09. 12Б.84П. С.12.
- 33. Способ получения слоистых звукопоглощающих композиционных материалов : пат. 2575102, МПК B60R / С. Н. Бухаров, В. П. Сергеенко, Н. А. Кушунина, А. С. Хмара, Н. В. Якимович, В. В. Кожушко ; заявл. 31.10.2014, опубл. 10.02.2016 , Бюлл. № 4.
- 34. Пат. 2157866 РФ, МПК7 D06N3/04 D06N3/06 В 32В5/28 В 32 В 27/12, В 32 В 27/32 В 32 В 27/34. Способ получения дублированного материала / А. Е. Рассин, Ю. А. Соколов, С. В. Бабушкин, И. А. Батурина; заявл. 12.07.1998; опубл. 20.10.2000.
- 35. Способ и машина для изготовления волокнистых полотен из холстов, ориентированных в различных направлениях : пат. 2200777, МПК В29С D04Н / Бомпар Бруно, Олри Пьер, Дюваль Рено, Брюйер Ален, Купе Доминик, Окань Жан ; заявитель Сосьете Насьональ Д`этюд Е де Конструксьон де Мотор Д`авиасьон; заявл. 25.03.1998; опубл. 20.03.2003.

- 36. Нетканые текстильные полотна: справочное пособие / Е. Н. Бершев [и др.]; под общей ред. Е. Н. Бершева. Москва: Легпромбытиздат, 1987. 400 с.
- 37. Способ получения замшеподобного нетканого материала без использования органических растворителей. Process for the production of microfibrous suede-finish nonwoven fabric without using organic solvents: заявка 1243691 ЕПВ, МПК7 D 06 N 3/00, D 06 N 3/14. Alcontara S.p.A., Latini David, Pomani Gianni (Cioni, Carloclo STUDIO CIONI & PIPPARELLI Viale Caldara 38 20122 Milano (IT)), № 02004291.7; заявл. 28.02.2002; опубл. 25.09.2002. Приор. 12.03.2001, № М 1010516 (Италия). Англ. // Легкая промышленность: РЖ 12/ ВИНИТИ. 2003. № 2, 03.02. 12Б.100П. С. 13.
- 38. Гаппаров, Х. Г. Виды и способы металлизирования текстильных материалов для пошива специальной одежды / Х. Г. Гаппаров, Я. Я. Хомидов, Г. К. Файзиева // Молодой ученый. 2016. № 11. С. 310—313. https://moluch.ru/archive/115/30702/. Дата обращения: 26.09.2018.
- 39. Пат. 2404896 РФ, МПК7 В 32 В 27/12, В 32 В 27/40. Полимернотекстильный многослойный материал и изделие, выполненное из него / С. Н. Козлов, Т. Б. Сорокина, Н. А. Бондарева, Т. А. Хохлова [и др.]; заявка № 2009137558/12, заявл. 12.10.2009; опубл. 27.11.2010, Бюлл. № 33. 9 с.: ил.
- 40. Пат. 2225906 РФ, МПК7 D06N3/04 В 32В5/08 В 32 В 27/30, В 32 В 27/40. Многослойный материал / Т. А. Хохлова, С. А. Волкова, С. Н. Козлов, М. Л. Коняхина, С. В. Козлова, А. Л. Малтызова; заявл. 12.29.2001; опубл. 20.03.2004.
- 41. Singha, K. A Review on Coating & Lamination in Textiles: Processes and Applications / K. Singha // American Journal of Polymer Science. 2012. № 2(3). P. 39–49.
- 42. Вишневская, О. В. Современные методы нанесения покрытия на текстиль / О. В. Вишневская // Вестник Казанского технологического университета. 2016. Т.19, № 18. С. 69–71.
- 43. Patent US 20020076503 A1. Clothing article such as a working or protective glove made from a textile support / Patrick Borreani, Pierre Vaille; Patrick Borreani, Pierre Vaille. stated 09.07.1998; pub. 20.06.2002.
- 44. Patent US 8137606 B2. Lightweight thin flexible polymer coated glove and a method therefor / Eric Thompson, Dave Narasimhan, Jeffrey C. Moreland, Hafsah Mohd Ghazaly; Ansell Healthcare Products Llc. stated 25.08.2010; pub. 20.03.2012.
- 45. Пат. 2482967 РФ, МПК7 В 32 В 27/12, В 32 В 27/40, С 09 D 175/04. Многослойный комбинированный материал / Д. В. Лабок,

- С. Н. Козлов; заявка № 2011141931/05; заявл. 18.10.11; опубл. 27.05.13, Бюлл. № 15 (I ч.). 11 с.: ил.
- 46. Пат. 2495751 РФ, МПК В 32 В 5/24, В 32 В 27/12, А 41 D 31/00. Легкая долговечная одежда и слоистые материалы для ее изготовления / Джонсон Мэтью А., Гунцель Эдвард К.; заявка № 2011150500/05; заявл. 16.04.2010; опубл. 20.10.2013, Бюлл. № 29. 13 с.: ил.
- 47. Fern, N., Alam, P., Touaiti, F., and Toivakka, M., Fatigue life predictions of porous composite paper coating, International Journal of Fatigue, 38, 2012. P. 181–187.
- 48. Абдуллин, И. Ш. Технология каландрования полимеров для изготовления тканей с мембранным покрытием / И. Ш. Абдуллин [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. 2014 N = 13. С. 102-109.
- 49. Пат. 2360050, Российская Федерация, МПК D04H1/54, B32B7/08. Способ изготовления нетканого иглопробивного материала, армированного сеткой / А. Н. Белявцев, Д. И. Файнер. № 2007127088/12; заявл. 27.01.2009; опубл. 27.06.2009.
- 50. Patent US 2161560 C2. Method of producing cloth-like microporous laminated material from nonwoven fibrous cloth and thermoplastic film permeable for air and wet steam and impermeable for liquid ВУ Пай-Чуан, Шарма Гириш К., Канчило Леопольдо В; риb. 15.02.1996.
- 51. Patent US 2310565 C2Air-penetrable and elastic composite materials and the methods of their production ВУ Пай-Чуан (US), Брэдфорд Ричард Арнольд(US), Робинсон Дейл Юджен (US); pub. 20.11.2007.
- 52. Пат. 2388511 РФ, МПК7 А 62 D 5/00. Химзащитный термоклеевой композиционный материал для изготовления химзащитной одежды / Р. Х. Фатхутдинов, В. В. Гайдай, В. Р. Байрамова [и др.]; заявка № 2008140235/15, заявл. 09.10.2008; опубл. 10.05.2010, Бюлл. № 13. 8 с.: ил.
- 53. Lin, J. H. Processing conditions of abrasion and heat resistance for hybridneedle-punhed no woven bag filters, Lin J. H., Lou C. W., Lei C. H., Lin C. Y., Composites. A. −2006. − № 16. − P. 31–37.
- 54. Spinning microdenier polyester staple fibre // Text. Technol. Dig. 1996. Vol. 53, № 10. P. 27.
- 55. Многофункциональные композиционные материалы на основе применения химических волокон и клеевой сетки / В. В. Хаматова // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Вып. № 1. Т. 15. С. 307—309.
- 56. Пат. 2102801 Российская Федерация, МПК6 021И/12, 012Б17/00. Материал для защиты от воздействия излучений / А. В. Мареичев;

- заявитель и патентообладатель А. В. Мареичев; № 94037127/25; заявл. 28.09.1994; опубл. 20.01.1998.
- 57. 2171858 Российская Федерация, $M\Pi K 7$ C23C16/16, Пат. C23C18/16, C23C18/00, C23C18/18, C23C18/30, C23C18/34, Б06М11/83. Химическая газофазная металлизация тканей и нетканых материалов / А. А. Уэльский, В. Г. Сыркин, А. В. Гребенников, Е. А. Чернышев; заявитель и патентообладатель Гос. науч.-исслед. ин-т химии и технол. элементоорганических соединений; № 99127611/04; заявл. 23.12.1999; опубл. 10.08.2001.
- 58. Пат. 2064983 Российская Федерация, МПК6 Б03Б15/00, Б03Б15/12. Металлизированная ткань для верха теплозащитного и теплоотражательного костюма / Е. А. Исаева; Э. Ф. Гусейнов; М. К. Донченко; В. Д. Колосов; И. В. Куприкова; П. В. Куцын; Е. А. Куприянова; И. Л. Козлов; заявитель и патентообладатель Научисслед. ин-т шелковой пром-ти; № 92000906/12; заявл. 15.10.1992; опубл. 10.08.1996.
- 59. Пат. 2338021 Российская Федерация, МПК Б06М11/83, Б03Б15/12, Б0203/38, С23С14/35, Б82Б3/00, А62Б17/00. Металлизированный материал «Нанотекс» / Н. М. Левакова, Е. М. Горынина, Б. Л. Горберг, В. А. Стегнин, А. А. Иванов, О. В. Мамонтов, Э. И. Куликовский, В. В. Орлов; заявитель и патентообладатель Левакова Н. М.; № 2006146782/04; заявл. 28.12.2006; опубл. 10.11.2008.
- 60. Пат. 2398045 Российская Федерация, МПК С23С14/02, С23С14/35. Способ модификации поверхности текстильного материала / Б. Л. Горберг, А. А. Иванов, О. В. Мамонтов, В. А. Стегнин; заявитель и патентообладатель Б. Л. Горберг, А. А. Иванов, О. В. Мамонтов, В. А. Стегнин; № 2008151794/02; заявл. 25.12.2008; опубл. 27.08.2010.
- 61. Исаев, С. П. Влияние СВЧ-обработки на структуру пленок клеев на водной основе / С. П. Исаев, К. А. Шевчук // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2016. Вып. 216. С. 200—209.
- 62. Бершев, Е. Н. Физические основы технологии электрофлокирования: учеб. пособие / Е. Н. Бершев. Ленинград: Изд-во Ленингр. ун-та, 1984. 232 с.
- 63. Бершев, Е. Н. Электрофлокирование: монография / Е. Н. Бершев. Москва: Легкая индустрия, 1977. 300 с.
- 64. Аксенова, А. Современный текстиль какой он? / А. Аксенова, А. Исаенкова // Текстильная промышленность. 2006. № 12. С. 18–21
- 65. Пат. 2107764, Российская Федерация, МПК D04H11/00 Линия для изготовления электрофлокированных материалов / М. В. Пилягин,

- С. Г. Теплов, М. Ф. Мериков, А. А. Антонов; № 2007127088/12, 16.07.2007; заявл. 02.06.1996, опубл. 27.03.1998.
- 66. Технология электрофлокирования // Контурфлок [Электронный ресурс]. 2007. Режим доступа: http://www.konturflok.ru. Дата доступа: 04.10.2018.
- 67. Пат. 2090677, Российская Федерация, МПК D04H1/54, B32B7/08 Способ получения ворсового материала / Мэл Собел [US]; Дмитриев Виктор Васильевич [RU]; Сашина Елена Сергеевна [RU]; № 5056161/12; заявл. 23.07.1992, опубл. 20.09.1997.
- 68. Пат. 2255154, Российская Федерация, МПК D04H1/54, B32B7/08 Способ получения ворсовых многоцветных рисунков / О. М. Иванов, Л. В. Коняева (RU), М. В. Козлова; № 2004107924/12; заявл. 17.03.2004, опубл. 27.06.2005.
- 69. Костенко, А. Ю. Флокированные изделия: технология и ассортимент / А. Ю. Костенко // Технический текстиль. 2010. № 23. С. 45—53.
- 70. Чукасова-Ильюшкина, Е. В. Исследование влияния скорости воздушно-волокнистой струи на свойства текстильных многослойных материалов / Е. В. Чукасова-Ильюшкина, Н. Н. Ясинская, А. Г. Коган // Текстильная промышленность. 2007. № 8. С. 43—45.
- 71. Ясинская, Н. Н. Исследование влияние параметров аэродинамической частицы на процесс напыления потоком сжатого воздуха / Н. Н. Ясинская, В. И. Ольшанский, Е. В. Чукасова-Ильюшкина // Текстильная промышленность. 2009. № 3. С. 28—29.
- 72. Способ получения нетканого текстильного материала и устройство для получения нетканого покрытия текстильного материала: пат. № 10383 Респ. Беларусь МПК D 04H 1/00 / Е.В. Чукасова-Ильюшкина, Н.Н. Ясинская, В.И. Ольшанский, А.Г. Коган; заявитель ВГТУ. № а 20050939; заявл. 30.09.2005; опубл. 28.02.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал, уласнасці / 2008. № 1. C. 107.
- 73. Устройство для формирования комбинированных материалов: пат. № 3216 Респ. Беларусь МПК D 06N 7/02 / А. А. Угольников, В. И. Ольшанский, Е. В. Чукасова-Ильюшкина, Н. Н. Ясинская, А. Г. Коган; заявитель ВГТУ. № и 20060354; заявл 02.06.2006 опубл. 30.12.2006 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці / 2006. № 6. С. 188.
- 74. Ломов, С. В. WiseTex виртуальный мир и реальное прогнозирование структуры и свойств текстильных полимерных композитов [Электронный ресурс] / С. В. Ломов, И. Ферпуст // Технический текстиль. 2006. № 13. Режим доступа:

- http://www.rustm.net/catalog/article/140.html. Дата доступа : 21.11.2017.
- 75. Трещалин, Ю. М. Анализ структуры и свойств нетканых материалов. М: Издательство «БОС» 2016. 192 с.
- 76. Воюцкий, С. С. Физико-химические основы пропитывания и импрегнирования волокнистых систем водными дисперсиями полимеров / С. С. Воюцкий. Москва : Химия, 1969. 336 с.
- 77. Woodhead Publishing Series in Textiles: Number 94 Modelling and predicting textile behaviour Edited by X. Chen 536 c. Woodhead Publishing India Private Limited, G-2, Vardaan House, 7/28 Ansari Road, Daryagani, New Delhi 110002, India.
- 78. Браславский, В. А. Капиллярные процессы в текстильных материалах / В. А. Браславский. Москва : Легпромбытиздат, 1987.—112 с.
- 79. Севостьянов, П. А., Забродин, Д. А., Дасюк, П. Е. Компьютерное моделирование в задачах исследования текстильных материалов и производств. М.: «Тисо Принт», 2014. 264 с.
- 80. Ясинская, Н. Н. Моделирование структуры текстильных материалов для формирования слоистых композитов / Н.Н. Ясинская, А. Н. Бизюк, К. Э. Разумеев // Известия вузов. Технология текстильной промышленности / Ивановская государственная текстильная академия (Иваново). 2018. № 6 (370). С. 98—103.
- 81. Блинова, И. В., Попов, И. Ю. Кривые, заданные параметрически и в полярных координатах: учебное пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2017. 56 с.
- 82. Ясинская, Н. Н. Моделирование структуры текстильных материалов для формирования слоистых композитов / Н. Н. Ясинская, А. Н. Бизюк, К. Э. Разумеев // Известия вузов. Технология текстильной промышленности / Ивановская государственная текстильная академия (Иваново). 2018. № 6 (378). С. 273—277.
- 83. Кукин, Г. Н. Текстильное материаловедение. Текстильные полотна и изделия: учебник для вузов / Г. Н. Кукин, А. Н. Соловьев, А. И. Кобляков. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Легпромбытиздат, 1992. 272 с.
- 84. Шустов, Ю. С. Основы текстильного материаловедения / Ю. С. Шустов. Москва : МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2017. 302 с.
- 85. Preliminary Study of Linear Density, Tenacity, and Crystallinity of Cotton Fibers / Yongliang Liu, Devron Thibodeaux, James Rodgers // Fibers. 2014. № 2. P. 211–220.
- 86. Mechanical properties of flax fibers and their composites by Edgars // SprnišDivision of Polymer Engineering Department of Applied

- Physics and Mechanical Engineering / Luleå University of Technology. Luleå, SWEDEN, 2009. P. 204.
- 87. Бизюк, А. Н. Имитационное моделирование пористой структуры армирующих химических нитей / А. Н. Бизюк, Н. Н. Ясинская // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2017. Вып. 32. С. 33–40.
- 88. Lomov, S. V. Textile geometry preprocessor for meso-mechanical models of woven composites [Tekct] / S. V. Lomov, A. V. Gusakov, G. Huysmans, A. Prodromou, I. Verpoest // Composites Science and Technology. 2000. Vol. 60. P. 2083-2095.
- 89. Lomov, S. V. Hierarchy of textile structures and architecture of fabric geometric models [Teκcτ] / S. V. Lomov, G. Huysmans, I. Verpoest // Textile Research Journal. 2001. Vol.71, No6. P. 534–543.
- 90. Ломов, С. В. Прогнозирование строения и механических свойств тканей технического назначения методами математического моделирования: дис. ... д-ра техн. наук / С. В. Ломов. СПб, 1995. 486 с.
- 91. WiseTex suit demo version [Электронный ресурс] / KU Leuven, Belgium. Режим доступа: \www/ URL: http://www.mtm. kuleuven.be /Onderzoek/Composites/software/wisetex. 08.01.2019 г.
- 92. Шеромова, И. А. Текстильные материалы: получение, строение, свойства: учебное пособие. Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2006. 220 с.
- 93. Колесников, П. А. Теплозащитные свойства одежды: монография / П. А. Колесников. Москва : Изд-во «Легкая индустрия», 1965. 338 с.
- 94. Математическая модель многократной пропитки пористых тел растворами полимеров / И. В. Глебов, В. Д. Котенко, В. А. Романенков // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 11. С. 238—252.
- 95. Ясинская, Н. Н. Разработка алгоритма проектирования и процесса формирования слоистых текстильных материалов декоративно-отделочного назначения / Н. Н. Ясинская, В. В. Мурычева // Известия вузов. Технология легкой промышленности / Санкт-Петербургский университет технологии и дизайна (Санкт-Петербург). 2019. Т. 37. № 1. С. 16 –22.
- 96. Бизюк, А. Н. Имитационное моделирование пористой структуры армирующих химических нитей / А. Н. Бизюк, Н. Н. Ясинская // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2017. Вып. 32. С. 33–40.
- 97. Скобеев, И. К. Фильтрующие материалы. М.: Недра, 1978. 200 с.
- 98. Проектирование однослойных ремизных тканей геометрическим методом: методические указания по выполнению курсовой

- работы / сост. Г. И. Толубеева, Т. И. Шейнова, Т. Ю. Карева. Иваново : ИГТА, 2007. С. 14.
- 99. Лыков, А. В. Тепло и массообмен в процессах сушки / А. В. Лыков. М. Л.: Госэнергоиздат, 1956. 518 с.
- 100. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. М.: Госэнергоиздат, 1950. 420 с.
- 101. Лыков, А. В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах / А. В. Лыков. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954. 296 с.
- 102. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. М.: Изд. «Высшая школа», 1967. 600 с.
- 103. Ребиндер, П. А. О формах связи влаги в материалах в процессе сушки. / П. А. Ребиндер // Научно-техническое совещание по сушке. М., 1958. С. 20–33.
- 104. Рудобашта, С. П. Массоперенос в системах с твёрдой фазой / С. П. Рудобашта. М.: Химия, 1980. 248 с.
- 105. Ясинская, Н. Н. Исследование процесса термообработки текстильных многослойных материалов / Н. Н. Ясинская, В. И. Ольшанский, Е. В. Чукасова-Ильюшкина // Текстильная промышленность. 2010. № 3. С. 16–18.
- 106. Осипов, Ю. Р. Теплоперенос при термообработке многослойных систем с эластомерными покрытиями: монография / Ю. Р. Осипов, С. Ю. Осипов, О. А. Панфилова. Вологда: ВоГТУ, 2012. 155 с.
- 107. Гусаров, А. М., Кузнецов, А. А. Оценка и прогнозирование теплозащитных свойств пакетов материалов для специальной защитной одежды пожарных: монография / А. М. Гусаров, А. А. Кузнецов. Витебск: УО «ВГТУ», 2017. 174 с.
- 108. Ясинская, Н. Н. Нестационарная теплопроводность текстильных материалов : монография / Н. Н. Ясинская, В. И. Ольшанский, А. Г. Коган. Витебск : УО «ВГТУ», 2003. 171 с.
- 109. Karpenya, A. M. Study of heating process for producing pliant synthetic fibre boards utilizing short-fibred wastes of natural and chemical fibre treatment / A. M. Karpenya, N.N. Yasinskaya, Y. P. Verbitskaya, V. I. Olshanskii // Fibre Chemistry. 2013. T. 44. № 5. C. 307–310.
- 110. Пахомов, А. Н. Моделирование и расчет кинетики сушки жидких дисперсных продуктов на подложках : монография для научных и инженерно-технических работников химической, пищевой и других отраслей промышленности / А. Н. Пахомов, Н. Ц. Гатапова, Ю. В. Пахомова. Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. 160 с.
- 111. Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок Минск: Беларусь. Навука, 2010. 443 с.

- 112. Шевченко, В. Г. Основы физики полимерных композиционных материалов: учебное пособие / В. Г. Шевченко. Москва: издательство МГУ, 2010. 99 с.
- 113. Сафонов, В. В. Интенсификация химико-текстильных процессов отделочного производства: учебное пособие / В. В. Сафонов. Москва: МГТУ им. А. Н. Косыгина, 2006. 405 с.
- 114. Побединский, В. С. Активирование процессов отделки текстильных материалов энергией электромагнитных волн ВЧ, СВЧ и УФ диапазонов / В. С. Побединский. Иваново : ИХР РАН, 2000. 128 с.
- 115. Циркина, О. Г. Теоретическое и экспериментальное обоснование повышения эффективности технологий отделки текстиля с использованием поля токов высокой частоты: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.19.02 / О. Г. Циркина. Иваново, 2015. 416 с.
- 116. Глуханов, Н. П. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов в машиностроении / Н. П. Глуханов, И. Г. Федорова. Л.: Машиностроение, 1983. 160 с.
- 117. Сажин, Б. И. Электрические свойства полимеров / Б. И. Сажин. Л.: Химия, 1986.
- 118. Жерносек, С. В. Формирование свойств композиционных текстильных материалов в условиях инфракрасного и сверхвысокочастотного излучения: дисс. ... канд. техн. наук: 05.19.01 / С. В. Жерносек. Витебск, 2016. 228 с.
- 119. Побединский, В. С. Диэлектрические свойства текстильных материалов 25.4.88, N 2416-лп88 : депонированная научная работа / В. С. Побединский, А. Л. Никифоров, С. М. Побединский // Иван. н.-и. эксперим.-конструкт. машиностроит. ин-т (Иваново). Введ. 25.04.88. 1988. 25 с.
- 120. Трещалин, Ю. М. Анализ структуры и свойств нетканых материалов / Ю. М. Трещалин. Москва: Издательство «БОС» 2016. 192 с.
- 121. Ольшанский, А. И. Исследование влагообмена при сушке натуральных тканей в электромагнитном поле сверхвысокой частоты / А. И. Ольшанский, В. И. Ольшанский, С. В. Жерносек // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 86. № 5. С. 1041—1048.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Экспериментальное исследование диаметра и расчет объемной плотности текстильных нитей

Определение диаметра пряжи и нитей цифровым методом

Диаметр пряжи определялся с помощью микроскопа и цифровой фотокамеры. Цифровые снимки пряжи или нити обрабатывались в графическом редакторе с целью определения процента площади снимка, занимаемой пряжей (нитью). Для этого снимок преобразовывался в двухцветный режим, где фон снимка был закрашен черным цветом, а пряжа – белым. Пример преобразования представлен на рисунке А.1.

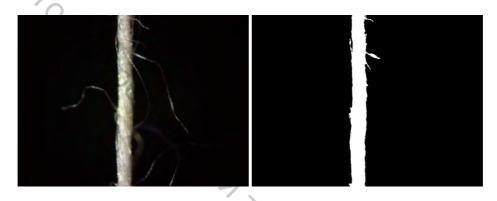


Рисунок А.1 – Преобразование цифрового снимка с целью определения диаметра пряжи

Используя данные о процентном соотношении цветов на изображении и зная размеры и масштаб изображения, который определялся путем получения снимка измерительной линейки при идентичном увеличении, вычисляется средний диаметр пряжи. Для каждого вида пряжи осуществлялось 10 измерений и результаты усреднялись.

Общая последовательность всех измерительных операций для цифрового метода:

- формирование пробы;
- получение цифрового изображения;
- обработка изображения пробы;
- определение диаметра.

TBODC4707 Результаты экспериментальных значений диаметра текстильных нитей и регрессионный анализ проведены в системе компьютерной алгебры Maple.

Программа расчета объемной плотности текстильных нитей

restart; with(plots); with(Statistics);

Диаметр пряжи и нитей

Cotton T := [.17, .19, 13.4, 14.8, 15.9, 16.2, 17.3, 18.3, 20.5, 23.7, 31.3, 38.6, 44.7, 49.4, 65.7, 83.6, 85.7, 98.5];

CottonD := [0.169e-1, 0.1738e-1, .2009, .1717, .2375, .2393, .2401, .2585, .2606, .2631, .2771, .2803, .3389, .3273, .3312, .3551, .3922, .4447];

LinenT := [0, 55.8, 85.6, 123.9, 125.3, 129.5, 142.7, 158.2, 187.4, 210.6, 221.4, 317.8, 330.2];

LinenD := [0, .3158, .4023, .4738, .4721, .4797, .4992, .5556, .6570, .7622, .7590, .8405, .8613];

ViscoseT := [193.9, 242.1, 387.6, 438.7, 561.3];

ViscoseD := [.649, .748, .894, .912, .967];

PolyamedT := [194.7, 290.6, 344.2, 381.8, 685.3];

PolyamedD := [.760, .917, .985, 1.109, 1.184];

CottonResult := Fit(0.357e-1*sqrt(T/s), CottonT, CottonD, T, initialvalues = [s = 0.1e-1], output = solutionmodule);

LinenResult := Fit(0.357e-1*sqrt(T/s), LinenT, LinenD, T, initialvalues = [s = 0.1e-1], output = solutionmodule);

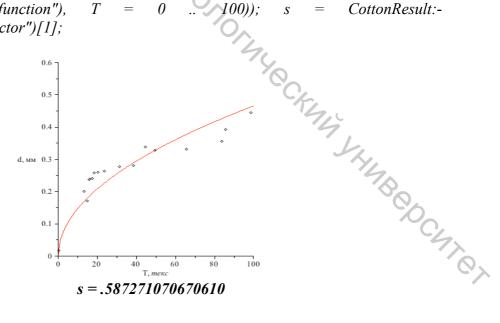
ViscoseResult := Fit(0.357e-1*sqrt(T/s), ViscoseT, ViscoseD, T, initialvalues = [s = 0.1e-1], output = solutionmodule);

PolyamedResult := Fit(0.357e-1*sqrt(T/s), PolyamedT, PolyamedD, T, initialvalues = [s = 0.1e-1], output = solutionmodule);

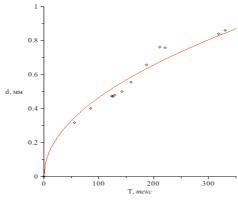
CottonResult:-Results();

>

display(pointplot(CottonT, CottonD, view = [0 ... 100, 06]), plot(CottonResult:-Results("leastsquaresfunction"), <math>T = 0 ... 100); s = CottonResult:-Results("parametervector")[1];



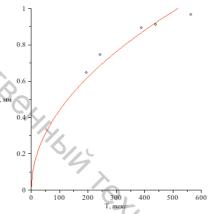
display(pointplot(LinenT, LinenD, view = [0 .. 350, 0 .. 1.0]), plot(LinenResult:-Results("leastsquaresfunction"), <math>T = 0 .. 350)); s = LinenResults("parametervector")[1];



s = .670369389651263

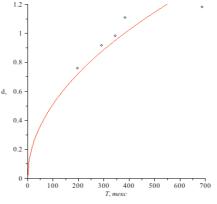
By reg display(pointplot(ViscoseT, ViscoseD, view = [0 .. 600, 0 .. 1]), plot(ViscoseResult:-Results ("leastsquares function"), T = 0.. 600));

s = ViscoseResult:-Results("parametervector")[1];



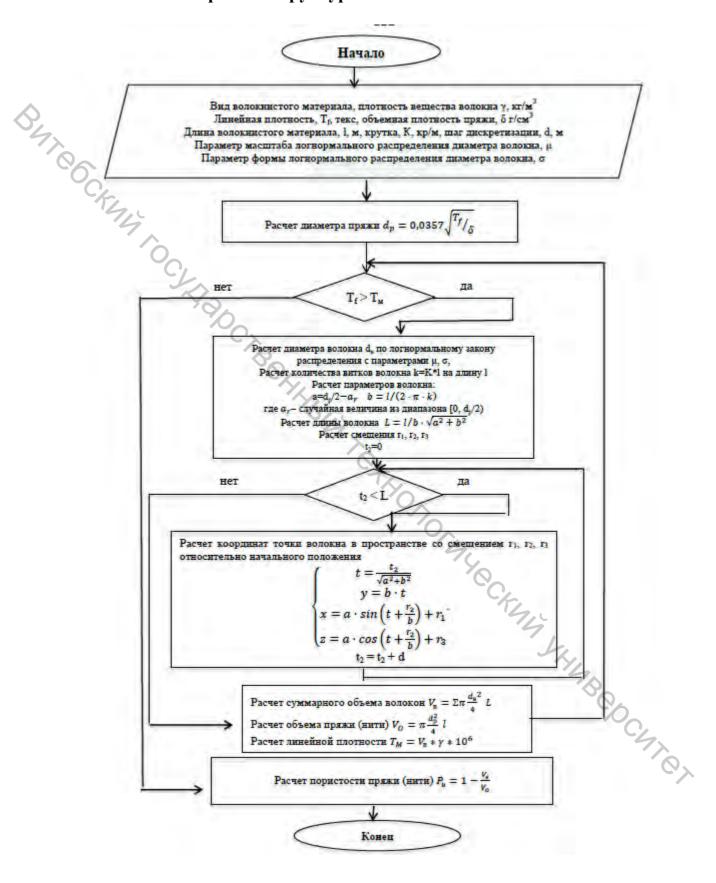
s = .657491946875075

0] PolyamedD, 700, display(pointplot(PolyamedT, THOCKMAN LAMBOOCHARD view 1.2), plot(**PolyamedResult:**-Results("leastsquaresfunction"), T = 0.. 700)); s = PolyamedResult:-Results("parametervector")[1];

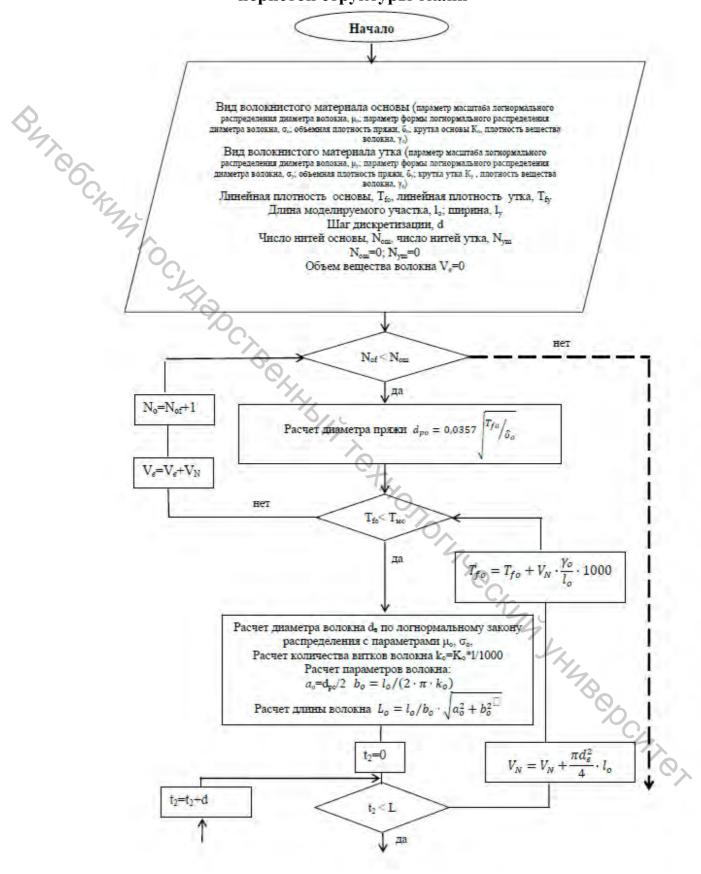


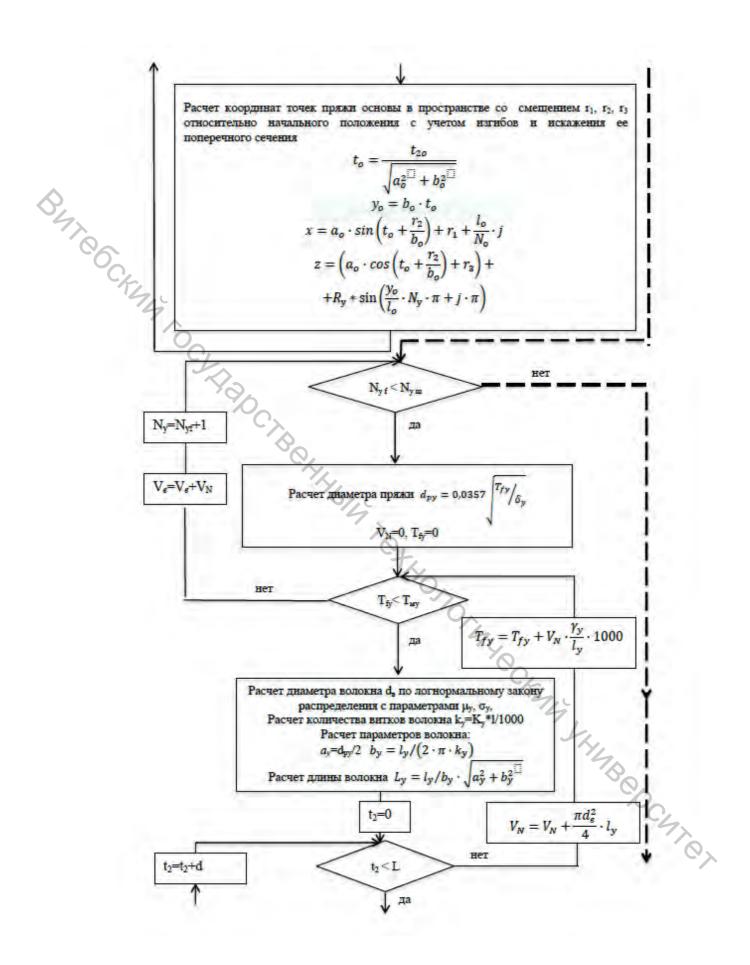
s = .485481879490365

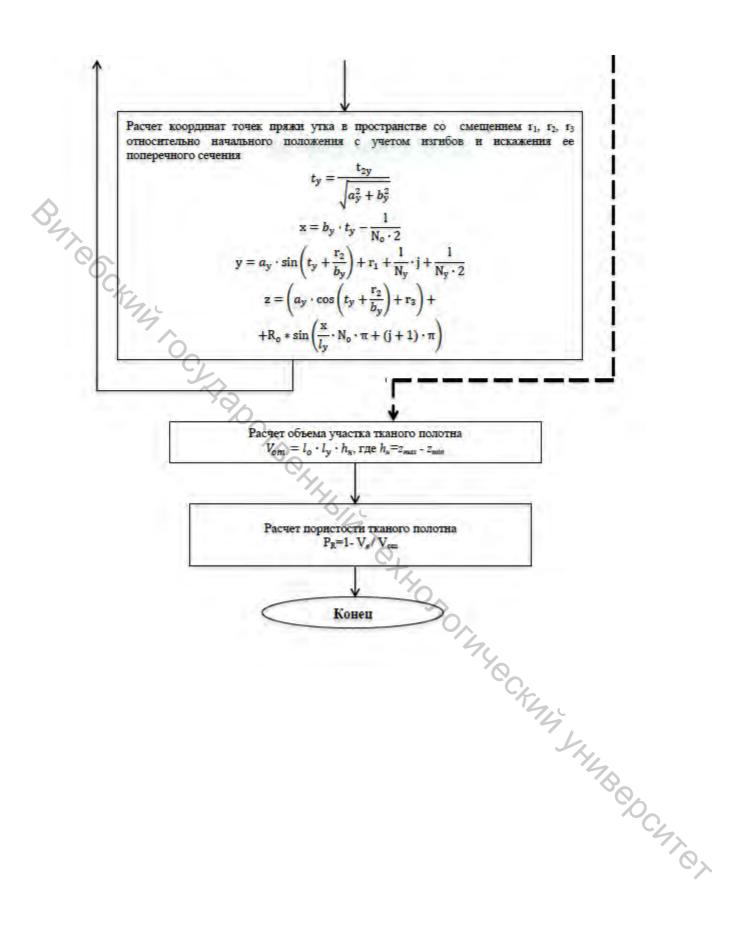
Блок-схема алгоритма имитационного моделирования капиллярнопористой структуры текстильной нити



Блок-схема алгоритма имитационного моделирования капиллярнопористой структуры ткани







Методика определения кажущейся пористости текстильных нитей

Определение кажущейся пористости текстильных материалов из натуральных и химических волокон проводили методом заполнения капиллярных пространств образца дистиллированной водой.

Подготовка образца

Подготавливаются образцы пряжи (нити) длиной 1 подвергаются щелочной отварке в течение 20 минут. После отварки образцы промывают и высушивают в сушильном шкафу при до полного высыхания. Далее образцы температуре 110–115 °C выдерживаются в климатических условиях не менее 24 ч.

Пропитка образца

Объект исследования взвешивают лабораторных на аналитических весах, точность 0,0001 г, и записывают результат измерения. Затем помещают в емкость с дистиллированной водой и пропитывают в течение 60 мин.

Высушивание в естественных условиях и построение кривой сушки

После пропитки исследуемые образцы подвешивались на штатив, установленный на лабораторные аналитические весы, точность 0,0001 г, высушивались в естественных условиях. Показания весов снимались каждые 30 секунд и записывались в таблицу для построения кривых сушки.

Измерения проводились при температуре воздуха $22~^{0}$ С и относительной влажности 60 %.

полученным данным с использованием программного По математического пакета Maple построены кривые сушки. Анализируя кривые сушки, были найдены точки перехода первого периода (удаление массы влаги намокания – механически связанной влаги), сушки во второй период (удаление влаги из макро- и микропор). Зная точку перехода первого периода во второй и влажность материала в этот момент времени ($W_{\kappa pum}$), рассчитывалась кажущаяся пористость 30C4707 волокнистого материала по формуле:

$$P_{\kappa} = \frac{V_{go\partial bi}}{V_0} \cdot 100\%,$$

где $V_{sodы}$ – объем воды, находящейся в капиллярах и порах волокнистого материала, соответствующий критической влажности $W_{\kappa pum}$, см³; V_0 – объем сухого образца, см³.

При расчетах использовались данные о плотностях материала и пропитывающей жидкости, приведенные в таблице А.1.

Таблица А.1 – Плотность используемых волокон и нитей

Вид волокна	Плотность вещества,	Средняя плотность,
	кг/м ³	кг/м³
Хлопковое	1520	900–1300
Льняное	1500	1400
Вискозная комплексная нить	1520	1000–1200
Полиамидная комплексная	1140	600–900
нить		
Вода	997	_

Программа для построения кривых сушки и расчета кажущейся пористости пряжи и нитей

restart; with(Statistics); with(plots);

FirstPhase := proc (T, P) options operator, arrow; Fit(a0+a1*x, T, P, [x], initial values = [a0 = 0, a1 = 0], output = solution module) end proc;

SecondPhase: = proc (T, P) options operator, arrow; Fit(a1*exp(a2*x)+a3, T, P, [x], initial values = <math>[a1 = 0, a2 = 0, a3 = 0], output = solution module, method = modified newton) end proc;

DryCurve := proc (T, P, c) local T2, P2, T3, P3, FirstPhaseResult, SecondPhaseResult, v; T2 := select(verify, T, c, ('truefalse')('less equal')); P2 := [seq(P[op(select(proc (i) options operator, arrow; T[i] = T2[k] end proc, ['\\$'(1 \text{ ... nops}(T))])], k = 1 ... nops(T2)]; if nops(T2) = 1 then T2 := [T2[1], T2[1]]; P2 := [P2[1], P2[1]] end if; T3 := select(verify, T, T)c, ('truefalse')('greater than')); P3 := [seq(P[op(select(proc (i) options operator, arrow; T[i] = T3[k] end proc, [`\$`(1 ... nops(T))])], k = 1 ... nops(T3))]; if nops(T3) = 1 then T3 :=[T3[1], T3[1]]; P3 := [P3[1], P3[1]] end if; FirstPhaseResult := FirstPhase(T2, P2); v := evalf(eval(FirstPhaseResult:-Results("leastsquaresfunction"), x = c)); T3 := [seq(c, i = 1 ... 20), op(T3)]; P3 := [seq(v, i = 1 .. 20), op(P3)]; T4 := [op(T4), seq(T3[nops(T3)], i = 1 ... 20)]; P4 := [op(P4), seq(P3[nops(P3)], i = 1 ... 20)]; try T4 := T3; P4 := P3; SecondPhaseResult := SecondPhase(T4, P4): result [FirstPhaseResult:-Results("leastsquaresfunction"), SecondPhaseResult:-

Results("leastsquaresfunction"), FirstPhaseResult:-

Results("residualmeansquare")+SecondPhaseResult:-Results("residualmeansquare"),

T4[nops(T4)]] catch: result := [FirstPhaseResult:-Results("leastsquaresfunction"), 0, 99999999, T4[nops(T4)]] end try; result end proc;

Warning, 'T4' is implicitly declared local to procedure 'DryCurve'

Warning. 'P4' is implicitly declared local to procedure 'DryCurve'

Warning, 'result' is implicitly declared local to procedure 'DryCurve'

DryCurveResidual := proc (T, P, x) options operator, arrow; DryCurve(T, P, x)[3] end proc;

FitDryCurveDichotomy := proc (T, P) local d, a, b, c, x1, x2, y1, y2, x, y, i; d := .1; a := min(T)+d; b := max(T)-d; x := a; y := DryCurveResidual(T, P, x); for i while 3*d < abs(b-a) do c := (1/2)*a+(1/2)*b; x1 := c-d; x2 := c+d; y1 := DryCurveResidual(T, P, x1); y2 := DryCurveResidual(T, P, x2); if y1 < y2 then b := x2; x := x1; y := y1 else a := x1; x := x2; y := y2 end if end do; [x, DryCurve(T, P, x)] end proc;

FitDryCurveComplete := proc (T, P) local d, a, b, x, y, i, minx, miny; d := 5; a := min(T)+d; b := max(T)-d; minx := a; miny := DryCurveResidual(T, P, minx); x := a; for i while x <= b do x := x+d; y := DryCurveResidual(T, P, x); if y < miny then miny := y; minx := x end if end do; [minx, DryCurve(T, P, minx)] end proc;

MovAverage := proc (A, N) local i, j, A2, A3; A2 := A; for i to N do A3 := [A2[1],seq((A2[j-1]+A2[j]+A2[j+1])/3.0, j = 2 ... nops(A2)-1), A[nops(A2)]; A2 := A3 end do;A2 end proc; interface(warnlevel = 0): infolevel[Statistics] := 0; dataArray :=[]; for i to nops(dataArray) do Name := ExcelTools[Import](dataArray[i][1], dataArray[i][2], dataArray[i][3])[1][1]; Time convert(LinearAlgebra[Column](ExcelTools[Import](dataArray[i][1], dataArray[i][2], dataArray[i][4]), list): **Porosity** convert(LinearAlgebra[Column](ExcelTools[Import](dataArray[i][1], dataArray[i][2], dataArray[i][5]), 1), list); Porosity := evalf(MovAverage(Porosity, dataArray[i][6]), 4); result := FitDryCurveComplete(Time, Porosity); display(plot(Time, Porosity, x = 0 ...

Name := "Хлопок 50 текс"

subs(x = result[1], result[2][1]), ")"))) end do;

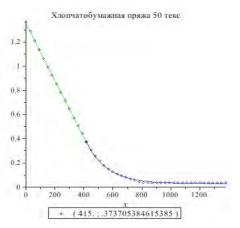
max(Time), 0 .. max(Porosity), title = Name, style = point), plot(result[2][1], x = 0 .. result[1], color = green), plot(result[2][2], x = result[1] .. result[2][4], color = blue), pointplot([result[1], subs(x = result[1], result[2][1])], legend = cat("(", result[1], "; ",

Time := [0., 30.0, 60.0, 90.0, 120.0, 150.0, 180.0, 210.0, 240.0, 270.0, 300.0, 330.0, 360.0, 390.0, 420.0, 450.0, 480.0, 510.0, 540.0, 570.0, 600.0, 630.0, 660.0, 690.0, 720.0, 750.0, 780.0, 810.0, 840.0, 870.0, 900.0, 930.0, 960.0, 990.0, 1020.0, 1050.0, 1080.0, 1110.0, 1140.0, 1170.0, 1200.0, 1230.0, 1260.0, 1290.0, 1320.0, 1350.0, 1380.0]

[1.3662561185210294. 1.2902880708701592. 1.2143200232192894, 1.0623839279175495. 1.1383519755684195. 0.9922595762398236, 0.9221352245620976, 0.8534717968776576, 0.7848083691932173, 0.7146840175154913, 0.6445596658377652, 0.5715134661734672, 0.510154658455457, 0.3728278030865768, 0.44295215476430283. 0.3056252993954227, 0.2559538836237001, 0.21504801181169328, 0.17998583597283024, 0.15076735610711103, 0.12739257221453573, 0.10693963630853232, 0.09525224436224461, 0.08064300442938502, 0.06895561248309731, 0.045580828590521996, 0.057268220536809696, 0.0338934366442343, 0.0338934366442343, 0.0338934366442343. 0.0338934366442343, 0.0338934366442343, 0.0338934366442343, 0.0338934366442343, 0.0338934366442343, 0.0338934366442343, 0.0338934366442343, 0.0338934366442343. 0.0338934366442343. 0.0338934366442343. 0.0338934366442343. 0.0338934366442343. 0.0338934366442343, 0.0338934366442343, 0.0338934366442343, 0.0338934366442343, 0.0338934366442343]

Porosity := [1.366, 1.290, 1.214, 1.138, 1.062, 0.9923, 0.9221, 0.8535, 0.7848, 0.7147, 0.6446, 0.5715, 0.5102, 0.4430, 0.3728, 0.3056, 0.2560, 0.2150, 0.1800, 0.1508, 0.1274, 0.1069, 0.09525, 0.08064, 0.06896, 0.05727, 0.04558, 0.03389]

result := [415., [1.35391714285714 - 0.00236195604395604 x, 6.03\550564447905 exp(-0.00688380042332015 x) + 0.0280237524047565, 0.0000717828716243944, 1380.0]]

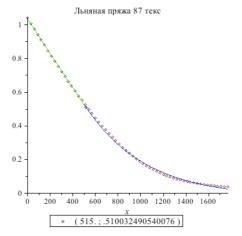


Name := "Лен 87 текс"

DATE OCKE *Time*:=[0, 30.0, 60.0, 90.0, 120.0, 150.0, 180.0, 210.0, 240.0, 270.0, 300.0, 330.0, 360.0, 390.0, 420.0, 450.0, 480.0, 510.0, 540.0, 570.0, 600.0, 630.0, 660.0, 690.0, 720.0, 750.0, 780.0, 810.0, 840.0, 870.0, 900.0, 930.0, 960.0, 990.0, 1020.0, 1050.0, 1080.0, 1110.0, 1140.0, 1170.0, 1200.0, 1230.0, 1260.0, 1290.0, 1320.0, 1350.0, 1380.0, 1410.0, 1440.0, 1470.0, 1500.0, 1530.0, 1560.0, 1590.0, 1620.0, 1650.0, 1680.0, 1710.0, 1740.0, 1770.0] := [1.0416139811781528, 1.0093892531869497, 0.9751504796962965, 0.9419187289553684, 0.9096940009641653, 0.8784762957226873, 0.8482656132309344, 0.8150338624900063, 0.7818021117490781, 0.749577383757875, 0.7183596785163971, 0.6881489960246442, 0.6569312907831661, 0.6236995400422379, 0.5904677893013098, 0.5582430613101068. 0.5280323788183539. 0.49681467357687603. 0.46358292283594776, 0.433372240344195. 0.4021545351027169. 0.3719438526109641, 0.33971912461976106, 0.3105154648777333, 0.2833258506351556, 0.2319676903991758, 0.2561362363925781, 0.20679212165604838, 0.14334968842336734, 0.16349014341786927. 0.1836305984123712, 0.11414602868133956. 0.10206175568463836, 0.12623030167804067, 0.08292832343986156. 0.09199152818738754, 0.07990725519068632, 0.07084405044316049, 0.06480191394480987 0.06178084569563464, 0.05875977744645926, 0.05573870919728403, 0.052717640948108796, 0.04969657269893342, 0.04667550444975819, 0.04365443620058281, 0.03761229970223235. 0.04063336795140758, 0.03761229970223235, 0.03761229970223235. 0.03761229970223235, 0.03761229970223235. 0.03761229970223235. 0.03761229970223235, 0.03761229970223235, 0.03761229970223235. 0.03761229970223235. 0.03761229970223235, 0.03761229970223235, 0.037612299702232351

Porosity := [1.042, 1.009, 0.9760, 0.9433, 0.9110, 0.8790, 0.8470, 0.8153, 0.7840, 0.7533, 0.7230, 0.6933, 0.6640, 0.6353, 0.6070, 0.5793, 0.5520, 0.5253, 0.4997, 0.4740, 0.4487, 0.4243, 0.4003, 0.3773, 0.3550, 0.3332, 0.3122, 0.2920, 0.2727, 0.2541, 0.2365, 0.2199, 0.2043, 0.1897, 0.1761, 0.1633, 0.1514, 0.1402, 0.1299, 0.1203, 0.1116, 0.1035, 0.09613, 0.08940, 0.08330, 0.07777, 0.07270, 0.06820, 0.06410, 0.06043, 0.05713, 0.05417,0.05150, 0.04903, 0.04680, 0.04477, 0.04287, 0.04107, 0.03930, 0.03761

result := $[515., [1.03367251461988 - 0.00101677674578603 x, 1.42 \times 227436731]$ 0.00188462728906165 x) - 0.0265369016052311, 0.0000945057787604223, 1770.0



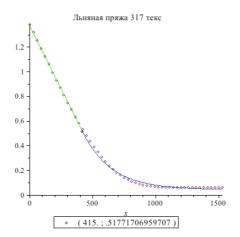
Name := "Лен 317 текс"

DATE OCKANA *Time* := [0., 30.0, 60.0, 90.0, 120.0, 150.0, 180.0, 210.0, 240.0, 270.0, 300.0, 330.0, 360.0, 390.0, 420.0, 450.0, 480.0, 510.0, 540.0, 570.0, 600.0, 630.0, 660.0, 690.0, 720.0, 750.0, 780.0, 810.0, 840.0, 870.0, 900.0, 930.0, 960.0, 990.0, 1020.0, 1050.0, 1080.0, 1110.0, 1140.0, 1170.0, 1200.0, 1230.0, 1260.0, 1290.0, 1320.0, 1350.0, 1380.0, 1410.0, 1440.0, 1470.0, 1500.0, 1530.0

:= [1.3851440105470612, 1.3213859433181971, 1.2555026071817048, 1.1896192710452125, 1.125861203816349, 1.0642284054951143, 0.9983450693586217, 0.9345870021297584. 0.8750794727161522, 0.8134466743949175. 0.7518138760736826, 0.6944316155677056, 0.6349240861540996, 0.5839176323710087, 0.5329111785879179, 0.4840299937124559, 0.4372740777446226, 0.39264343068441804, 0.35013805253184244, 0.3097579432868954, 0.273628371857206, 0.23962406933514552, 0.18436707773679717, 0.21199557353597126, 0.16311438866050929, 0.13973643067659258. 0.12698481723081995. 0.10998266596978962. 0.09935632143164569, 0.09298051470875943, 0.08447943907824419, 0.0781036323553578, 0.07385309454010025 0.06747728781721402, 0.06535201890958517. 0.06322675000195632. 0.06322675000195632, 0.06322675000195632. 0.06322675000195632, 0.06322675000195632. 0.06322675000195632, 0.06322675000195632. 0.06322675000195632, 0.06322675000195632, 0.06322675000195632, 0.06322675000195632, 0.06322675000195632, 0.06322675000195632, 0.06322675000195632, 0.06322675000195632, 0.06322675000195632, 0.063226750001956321

Porosity := [1.385, 1.321, 1.256, 1.190, 1.126, 1.064, 0.9983, 0.9346, 0.8751, 0.8134, 0.7518, 0.6944, 0.6349, 0.5839, 0.5329, 0.4840, 0.4373, 0.3926, 0.3501, 0.3098, 0.2736, 0.2396, 0.2120, 0.1844, 0.1631, 0.1397, 0.1270, 0.1100, 0.09936, 0.09298, 0.08448, 0.07810, 0.07385, 0.06748, 0.06535, 0.06323, 0.06323, 0.06323, 0.06323, 0.06323, 0.06323, 0.06323, 0.06323, 0.06323, 0.06323, 0.06323, 0.06323, 0.06323, 0.06323, 0.06323, 0.06323

result := $[415., [1.37740857142857 - 0.00207154578754579 x, 2.93] (0.00993749001) \exp(-0.00207154578754579)$ 0.00437053284190917 x) + 0.0450483499475522, 0.000223682644296336, 1530.0]



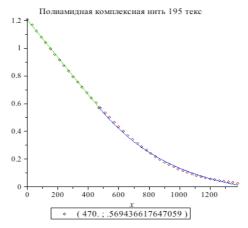
Name := "Полиамид 195 текс"

D47ROCKY Time := [0., 30.0, 60.0, 90.0, 120.0, 150.0, 180.0, 210.0, 240.0, 270.0, 300.0, 330.0, 360.0, 390.0, 420.0, 450.0, 480.0, 510.0, 540.0, 570.0, 600.0, 630.0, 660.0, 690.0, 720.0, 750.0, 780.0, 810.0, 840.0, 870.0, 900.0, 930.0, 960.0, 990.0, 1020.0, 1050.0, 1080.0, 1110.0, 1140.0, 1170.0, 1200.0, 1230.0, 1260.0, 1290.0, 1320.0, 1350.0, 1380.0]

[1.2101059473331646, 1.1684659690521633, 1.126825990771162, 1.0807122958153426, 1.034598600859523, 0.9946792828380671, 0.9547599648166114, 0.9138082506394285, 0.8728565364622453, 0.8291517658697892, 0.7854469952773333. 0.7451835452039685. 0.7049200951306036, 0.6629359847976933, 0.6223284026724192, 0.581032556443327, 0.5404249743180531, 0.45989807417132345, 0.49981739219277915. 0.4220435484613222, 0.384189022751321, 0.3463344970413198, 0.31192129185040973, 0.2499775225067714. 0.22726480708077074, 0.20111077113567902, 0.17564499929440544. 0.15293228386840477, 0.12746651202713127, 0.07997628886367524, 0.10406553249731236, 0.06139315806058379, 0.03936870673840124, 0.02560342466203716, 0.02560342466203716, 0.02560342466203716, 0.02560342466203716. 0.02560342466203716. 0.02560342466203716, 0.02560342466203716, 0.02560342466203716, 0.02560342466203716, 0.02560342466203716, 0.02560342466203716, 0.02560342466203716, 0.02560342466203716, 0.02560342466203716]

Porosity := [1.210, 1.168, 1.125, 1.081, 1.038, 0.9963, 0.9550, 0.9143, 0.8740, 0.8340, 0.7947, 0.7557, 0.7173, 0.6793, 0.6420, 0.6053, 0.5693, 0.5340, 0.4997, 0.4660, 0.4330,0.4013, 0.3710, 0.3423, 0.3146, 0.2883, 0.2633, 0.2397, 0.2175, 0.1968, 0.1776, 0.1598, 0.1435, 0.1285, 0.1149, 0.1026, 0.09150, 0.08150, 0.07257, 0.06453, 0.05737, 0.05093, 0.04513, 0.03983, 0.03487, 0.03018, 0.02560]

0.00202303264510701 x) - 0.0936537551298872, 0.0000850786258805046, 1380.0]] DC4707



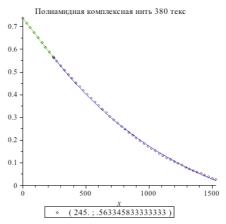
Name := "Полиамид 380 текс"

DATO CAL *Time* := [0., 30.0, 60.0, 90.0, 120.0, 150.0, 180.0, 210.0, 240.0, 270.0, 300.0, 330.0, 360.0, 390.0, 420.0, 450.0, 480.0, 510.0, 540.0, 570.0, 600.0, 630.0, 660.0, 690.0, 720.0, 750.0, 780.0, 810.0, 840.0, 870.0, 900.0, 930.0, 960.0, 990.0, 1020.0, 1050.0, 1080.0, 1110.0, 1140.0, 1170.0, 1200.0]

[0.7373676445958688, 0.7164658841351049. <u>:</u>= 0.695210495221115, 0.6738159738009379, 0.652325798782757, 0.6307370715726932, 0.6090874738911726, 0.587472659336199, 0.5660317604139593, 0.5448517349408208, 0.5239064955718736, 0.5030800985519611, 0.48229428184635326, 0.46160122014487076, 0.44114294454757885, 0.4210238044341188, 0.40120611808406437, 0.38155075299122826, 0.36190698227390794. 0.34220813827288854, 0.3224571195820489, 0.3026974051095725, 0.28295798079424855, 0.2632475424177135. 0.24354000263505746. 0.2237918825380966, 0.2039655004064056. 0.18408694358489433. 0.16427795301647657. 0.14479650355637477, 0.1260165138149674, 0.10840755600063648, 0.07823609231514338. 0.09238992622582283, 0.06598373598902384, 0.05554589943109703. 0.04681533466784346. 0.03975146138495874, 0.030481758160229456. 0.02800635898764698, 0.03433398942529051, 0.02660633814413723]

Porosity := [0.7374, 0.7163, 0.6953, 0.6737, 0.6523, 0.6307, 0.6093, 0.5880, 0.5673,0.5470, 0.5273, 0.5080, 0.4893, 0.4710, 0.4530, 0.4353, 0.4180, 0.4010, 0.3843, 0.3677, 0.3517, 0.3357, 0.3202, 0.3050, 0.2901, 0.2756, 0.2615, 0.2478, 0.2345, 0.2216, 0.2091, 0.1970, 0.1853, 0.1739, 0.1629, 0.1523, 0.1421, 0.1323, 0.1229, 0.1139, 0.1053, 0.09707,0.08903, 0.08130, 0.07377, 0.06647, 0.05937, 0.05240, 0.04557, 0.03887, 0.03221,

result := [245., [0.7376088888888889 - 0.000711277777777780 x, 0.988903849840708] $\exp(-0.000896452450144703 \text{ x}) - 0.229503859553598, 0.00000670302477079361,$ OCHION 1530.0]]



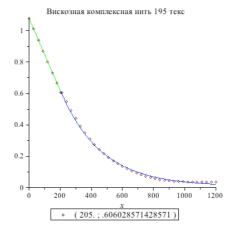
Name := "Вискоза 195 текс"

DATO CKI *Time* := [0, 30.0, 60.0, 90.0, 120.0, 150.0, 180.0, 210.0, 240.0, 270.0, 300.0, 330.0, 360.0, 390.0, 420.0, 450.0, 480.0, 510.0, 540.0, 570.0, 600.0, 630.0, 660.0, 690.0, 720.0, 750.0, 780.0, 810.0, 840.0, 870.0, 900.0, 930.0, 960.0, 990.0, 1020.0, 1050.0, 1080.0, 1110.0, 1140.0, 1170.0, 1200.0]

Porosity := [1.	.0792503358748513,	1.0148143267837622,	0.9503783176926729,
0.8743227004048	3297, 0.7982	2670831169867,	0.7137608416860498,
0.6387615524160	0.588	30578075575313,	0.545804686842063,
0.4834813337867	4707, 0.434	18902449639585,	0.3862991561411697,
0.3271447871395	51406, 0.274.	32838624517847,	0.2563708099411045,
0.2357724135923	0.2151740)172435228,	0.18770948877846827,
0.1644702723849	06073, 0.1454	45636806299986,	0.1285551197768126,
0.1127101995085	51194, 0.1000	3426329387136,	0.08841465509711766,
0.0789077029361	3714, 0.0694	10075077515676,	0.06095012663206313,
0.0535558305068	356104, 0.0461	61534381649216,	0.04087989429221566,
0.0366545822206	66884, 0.0366	55458222066884,	0.03665458222066884,
0.0366545822206	66884, 0.0366	55458222066884,	0.03665458222066884,
0.0366545822206	66884, 0.0366	55458222066884,	0.03665458222066884,
0.0366545822206	66884, 0.03665458222	066884]	

Porosity:= [1.079, 1.010, 0.9397, 0.8693, 0.8000, 0.7317, 0.6663, 0.6047, 0.5467, 0.4917, 0.4403, 0.3923, 0.3483, 0.3087, 0.2739, 0.2436, 0.2170, 0.1933, 0.1719, 0.1525, 0.1350, 0.1194, 0.1055, 0.09320, 0.08227, 0.07263, 0.06417, 0.05690, 0.05087, 0.04600, 0.04240, 0.03987, 0.03830, 0.03740, 0.03697, 0.03677, 0.03670, 0.03667, 0.03667, 0.03667, 0.03665]

result := [205., [1.07811428571429 - 0.00230285714285714 x, 1.31\970122902615 exp(-0.00384141838588422 x) + 0.00803403882934797, 0.0000566277326942855, 1200.0]Belocus Andrews



Name := "Вискоза 390 текс"

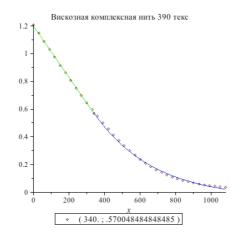
DATO CAZ *Time* := [0., 30.0, 60.0, 90.0, 120.0, 150.0, 180.0, 210.0, 240.0, 270.0, 300.0, 330.0, 360.0, 390.0, 420.0, 450.0, 480.0, 510.0, 540.0, 570.0, 600.0, 630.0, 660.0, 690.0, 720.0, 750.0, 780.0, 810.0, 840.0, 870.0, 900.0, 930.0, 960.0, 990.0, 1020.0, 1050.0, 1080.0]

11.2072021790169967, 1.1404730091177255, 1.0785102084969738, 1.021313777154741, 0.9665005304517679, 0.911687283748795, 0.8544908524065625, 0.7972944210643299, 0.735331620443578, 0.6733688198228259, 0.6090228345628143, 0.5470600339420623, 0.48748041796056996, 0.4302839866183374, 0.3730875552761047, 0.31827430857313194, 0.2658442465094187, 0.22056373836348456, 0.17766641485681003, 0.14668501454643398, 0.11808679887531767, 0.0966381371219805. 0.077572660007903, 0.04659125969752702, 0.060890367533085174, 0.03467533650122855, 0.03467533650122855, 0.03467533650122855, 0.03467533650122855, 0.03467533650122855. 0.03467533650122855, 0.03467533650122855. 0.03467533650122855, 0.03467533650122855, 0.03467533650122855.

0.03467533650122855, 0.03467533650122855]

Porosity := [1.207, 1.147, 1.088, 1.030, 0.9733, 0.9170, 0.8613, 0.8067, 0.7523, 0.6990,0.6473, 0.5970, 0.5483, 0.5013, 0.4563, 0.4137, 0.3737, 0.3357, 0.3004, 0.2676, 0.2374, 0.2098, 0.1849, 0.1625, 0.1426, 0.1250, 0.1096, 0.09620, 0.08467, 0.07477, 0.06633, 0.05917, 0.05303, 0.04770, 0.04303, 0.03877, 0.03468]

0.00298045161550518 x) - 0.0467632790739537, 0.0000782303122554529, 1080.0] THE SOUTH OF THE SECOND SECOND



Программа расчета прогревания слоистого композиционного материала

```
restart; with(plots):
#Начальная температура, К
T0 := [293, 293, 293];
                                      T0 := [293, 293, 293]
#Температура воздуха в термокамере, К
T_B := [393, 413, 433];
                                      T_6 := [393, 413, 433]
COLORS := [blue, green, red];
                                   COLORS := [blue, green, red]
POINTSTYLES := [asterisk, box, circle, cross, diagonalcross, diamond, point, solidbox,
solidcircle, soliddiamond];
            POINTSTYLES := [asterisk, box, circle, cross, diagonalcross, diamond, point, solidbox,
              [solidcircle, soliddiamond]
LINESTYLES := [solid, dot, dash, dashdot, longdash, spacedash];
                    LINESTYLES := [solid, dot, dash, dashdot, longdash, spacedash]
#Ввод экспериментальных данных
X := [[5, 10, 20, 30, 40], [5, 10, 20, 30, 40], [5, 10, 20, 30, 40]];
                       X := [[5, 10, 20, 30, 40], [5, 10, 20, 30, 40], [5, 10, 20, 30, 40]]
T := [[355, 380, 385, 390, 392], [370, 400, 405, 410, 412], [378, 416, 427, 430, 432]];
                T := [[355, 380, 385, 390, 392], [370, 400, 405, 410, 412], [378, 416, 427, 430, 432]]
#Ввод исходных данных для слоя 1:
#Толщина материала основы, м
delta1 := 0.000344;
                                         \delta l := 0.000344
#Теплоемкость материала основы, Дж/(`кг*град);
C1 := 1420;
                                          C1 := 1420
                                                             THECKING LAMBORCHARD,
#Теплопроводность материала основы, Вт/(`м*град);
lambda1 := 0.13;
                                          \lambda I := 0.13
#Объемная плотность материала основы, кг/м^3;
gamma1 := 378;
                                           \gamma 1 := 378
#Доля материала основы
omega1 := 0.14;
                                          \omega l := 0.14
#Ввод исходных данных слоя 2
#Толщина текстильного полотна, м
delta2 := 0.00204;
                                         \delta 2 := 0.00204
#Теплоемкость текстильного полотна, Дж/(`кг*град);
C2 := 1510;
                                          C2 := 1510
#Объемная плотность текстильного полотна, кг/`м^3;
gamma2 := 132;
                                           \gamma 2 := 132
```

#Доля текстильного материала

```
omega2 := 0.86;
                                        \omega 2 := 0.86
#Пористость текстильного полотна, %
P := 0.902;
                                        P := 0.902
#Теплопроводность волокна, Вт/(`м*град);
lambda;V' := 0.04;
                                        \lambda V := 0.04
#Расчет теплопроводности тканого полотна
lambda2 := 0.0259 + 0.0259*(1 - P)/((1 + (-1 + P))/4 + 0.0259/(`λV` - 0.0259));
                                    \lambda 2 := 0.02713071437
```

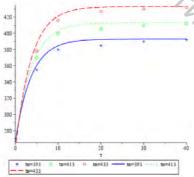
Преобразование двухслойного текстильного материала в однослойный;

lambda := (delta1 + delta2)/(delta1/lambda1 + delta2/lambda2); $\lambda := 0.03062783726$ C := C1*omega1 + C2*omega2;C := 1497.40rho := (gamma1*omega1 + gamma2*omega2)/2; $\rho := 83.22000000$ a := lambda/(C*rho): $a := 2.45782405610^{-7}$ R := delta1 + delta2;R := 0.002384

#Ввод закона распределения температуры по толщине слоистого материала $t := (tau, t0, `tb') -> `tb' + (-1)*1.27*(`tb' - t0)*exp((-1)*1.57*a*tau/(1/4*R^2));$

$$t := (\tau, t0, te) \mapsto te + (-1) \cdot 1.27 (te - t0) e$$

display(seq(display(plot(t(tau, T0[i], `TB`[i]), tau = 0 .. 40, color = COLORS[i], linestyle = LINESTYLES[i], legend = cat("tB=", 'TB'[i])), pointplot([seq([X[i, k], T[i, k]], k = 1 ... nops(X[i])], color = COLORS[i], symbol = POINTSTYLES[i], legend = cat("tb=", table of the color of thTB[i])), i = 1 .. nops(T0));



lambda2Ttheor := [seq([seq(t(X[i, j], T0[i], `TB`[i]), j = 1 .. nops(X[i]))], i = 1 ..nops(T0)];

CANA LAMBOOCHIO, lambda2Ttheor := [[360.3355731, 384.5987025, 392.4442378, 392.9632352, 392.9975679],[373.8026877, 402.9184430, 412.3330854, 412.9558823, 412.9970815], [387.2698023, 421.2381835, 432.2219329, 432.9485293, 432.9965951]]

Программа расчета прогревания текстильного каркасного композиционного материала

```
restart:
with(plots);
#Начальная температура, К
T0 := [398, 398, 398];
                                        T0 := [398, 398, 398]
#Температура воздуха в термокамере, К
T_B' := [433, 443, 453];
                                        T_6 := [433, 443, 453]
COLORS := [blue, green, red];
                                    COLORS := [blue, green, red]
POINTSTYLES := [asterisk, box, circle, cross, diagonalcross, diamond, point, solidbox,
solidcircle, soliddiamond];
            POINTSTYLES \coloneqq [\textit{asterisk}, \textit{box}, \textit{circle}, \textit{cross}, \textit{diagonal cross}, \textit{diamond}, \textit{point}, \textit{solidbox},
                solidcircle, soliddiamond
LINESTYLES := [solid, dot, dash, dashdot, longdash, spacedash];
                      LINESTYLES := [solid, dot, dash, dashdot, longdash, spacedash]
#Ввод экспериментальных данных
X := [[5, 10, 15, 20, 25], [5, 10, 15, 20, 25], [5, 10, 15, 20, 25]];
                        X := [[5, 10, 15, 20, 25], [5, 10, 15, 20, 25], [5, 10, 15, 20, 25]]
T := [[431, 432, 433, 433, 433], [442, 443, 443, 443, 443], [452, 453, 453, 453, 453]];
                T := [[431, 432, 433, 433, 433], [442, 443, 443, 443, 443], [452, 453, 453, 453, 453]]
#Ввод исходных данных для комбинированного текстильного материала
#Толщина материала, м
R := 0.0025:
#Теплоемкость материала тканой основы, Дж/(кг*град);
C1 := 1638;
                                           C1 := 1638
#Теплопроводность комбинированного текстильного материала, Вт/(`м*град);
lambda1 := 0.572;
                                           \lambda I := 0.572
#Объемная плотность композиционного текстильного материала, кг/м<sup>3</sup>;
                                                                             LHABOOCHIO,
gamma1 := 238;
                                            \gamma l := 238
#Доля тканого материала
omega1 := 0.60;
                                            \omega l := 0.60
#Концентрация полимерного связующего, г/л
c := 500:
#Теплоемкость полимерного связующего, Дж/(`кг*град);
C2 := 1450:
                                           C2 := 1450
#Доля полимерного связующего
omega2 := 0.40;
                                            \omega^2 := 0.40
```

<u>Расчет коэффициента теплопроводности при концентрации полимерного связующего с:</u>

lambda := 0.0189*exp(0.0068*c);

 $\lambda := 0.5663214909$

C := C1*omega1 + C2*omega2;

C := 1562.80

a := lambda/(C*gamma1);

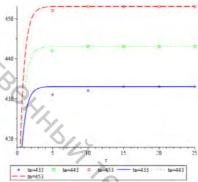
a := 0.000001522588983

#Ввод закона распределения температуры по толщине комбинированного материала

 $t := (tau, t0, `tb`) -> `tb` + (-1)*1.27*(`tb` - t0)*exp((-1)*1.57*a*tau/(1/4*R^2));$

$$t := (\tau, t0, t6) \to t6 + (-1) \cdot 1.27 (t6 - t0) e^{\frac{(-1) \cdot 1.57 a \tau}{\frac{1}{4} R^2}}$$

 $\begin{aligned} & \text{display}(\text{seq}(\text{display}(\text{plot}(\text{t}(\text{tau}, T0[i], `TB`[i]), \text{tau} = 0 ... 25, \text{color} = COLORS[i], \text{linestyle} \\ & = \text{LINESTYLES}[i], \text{legend} = \text{cat}("\text{tB}=", `TB`[i])), \text{pointplot}([\text{seq}([X[i, k], T[i, k]], k = 1 ... \text{nops}(X[i]))], \text{color} = COLORS[i], \text{symbol} = POINTSTYLES[i], \text{legend} = \text{cat}("\text{tB}=", `TB`[i]))), i = 1 ... \text{nops}(T0))); \end{aligned}$



Ttheor := [seq([seq(t(X[i, j], T0[i], 'TB'[i]), j = 1 ... nops(X[i]))], i = 1 ... nops(T0))];

**Tiheor := [[432.9788290, 432.999989, 433.0000000, 433., 433.], [442.9727801, 442.9999870, 443.0000000, 443., 443.], [452.9667313, 452.9999842, 453.0000000, 453., 453.]]

**Tiheor := [[432.9788290, 432.9999899, 433.0000000, 433., 433.], [442.9727801, 442.9999870, 443.0000000, 443., 443.], [452.9667313, 452.9999842, 453.0000000, 453., 453.]]

Научное издание

Ясинская Наталья Николаевна Ольшанский Валерий Иосифович Коган Александр Григорьевич

BATOCKALL, ТЕРМООБРАБОТКА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

ON TO TO Монография

Редактор Т.А. Осипова Корректор Т.А. Осипова Компьютерная верстка Н.Н. Ясинская

Подписано к печати 23.12.2019. Формат $60x90^{-1}/_{16}$. Усл. печ. листов 10,3. Уч.-изд. листов 11,9. Тираж 50 экз. Заказ № 376.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет» 210038, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования «Витебский государственный технологический университет». Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г. Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.