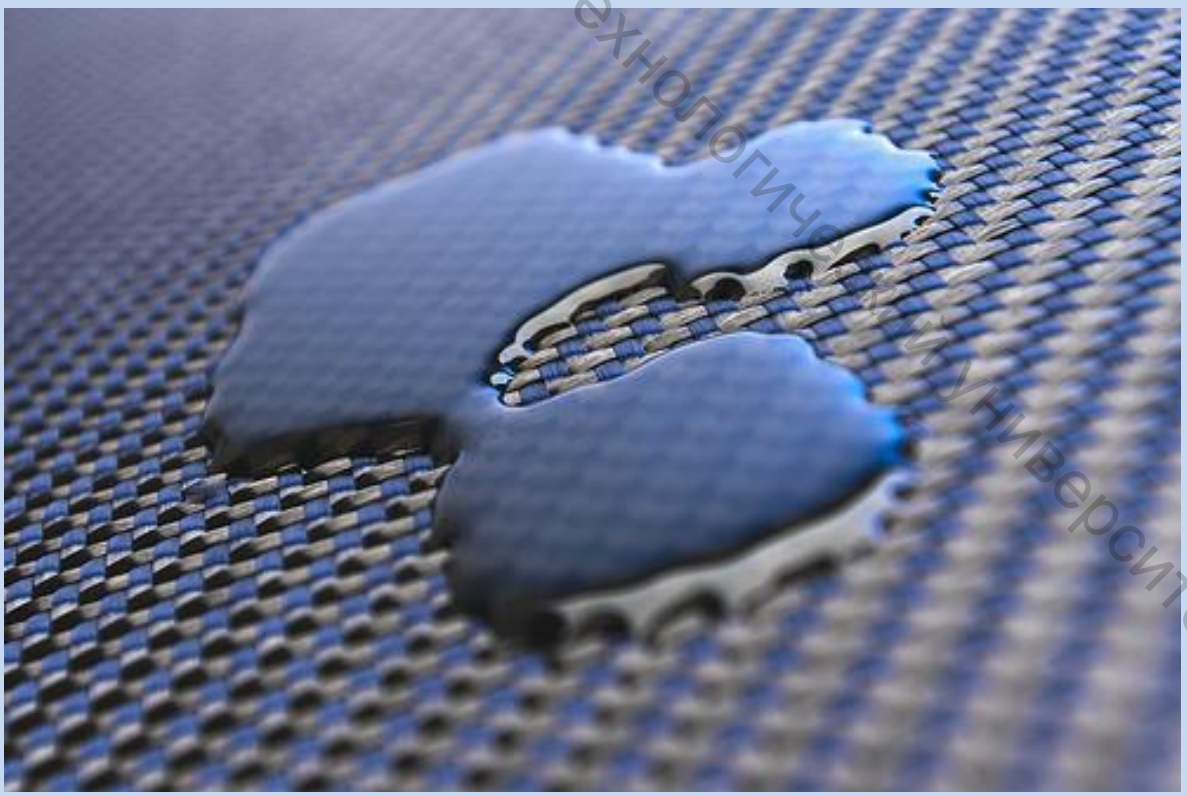
Н.Н. Ясинская
В.И. Ольшанский
А.Г. Коган

Витебский государственный технологический университет

КОМПОЗИЦИОННЫЕ ТЕКСТИЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Монография



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

Витебский государственный технологический университет

КОМПОЗИЦИОННЫЕ ТЕКСТИЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Монография

ВИТЕБСК

2015

УДК 677.027.62
ББК 37.23
Я81

Рецензенты:
Н.Н.Попок - профессор, заведующий кафедрой «Технология и оборудование машиностроительного производства» УО «Полоцкий государственный университет»;
В.В.Пятов – профессор кафедры «Технология и оборудование высокоэффективных процессов обработки материалов» УО «Витебский государственный технологический университет».

Я81ЯсинскаяН.Н.**Композиционные текстильные материалы**: монография / Н. Н. Ясинская, В. И. Ольшанский, А. Г. Коган. – Витебск:УО «ВГТУ», 2015. – 298 с.

ISBN 978 – 985 – 481 –378-3

В монографии изложены результаты исследований, направленных на разработку структуры новых композиционных текстильных материалов, рецептур связующих для формирования текстильных композитов, на изучение технологических процессов формирования композиционных текстильных материалов; рассмотрены вопросы, связанные с расчетом и оптимизацией основных параметров формирования (склеивания, пропитки, термообработки и сушки). Приводятся результаты экспериментальных и теоретических исследований возможных способов интенсификации технологических процессов формирования композиционных текстильных материалов, которые базируются на применении нетрадиционных видов энергоносителей, в частности, электромагнитных волн высокочастотного (ВЧ) и сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона.

ISBN 978 – 985 –481 –378-3

УДК 677.02
ББК 37.23
©Ясинская Н.Н., 2015

Витебский государственный технологический университет

СОДЕРЖАНИЕ

Введение …… 6
1 Общие сведения о композиционных материалах ……. 8
1.1 Классификация композиционных материалов…….. 10
1.2 Критерии совместимости компонентов композиционных материалов…….. 16
2 Композиционные текстильные материалы…… 18
2.1 Формирование структуры композиционного текстильного материала…….…..... 20
2.2 Связующие компоненты для формирования композиционных текстильных материалов текстильных…….. 22
2.2.1 Выбор состава полимерной композиции……..... 23
2.2.2 Требования, предъявляемые к связующим, используемым для формирования текстильных композиционных материалов……... 37
2.2.3 Свойства связующих……... 38
2.2.4 Рекомендуемые рецептуры связующих для формирования текстильных композитов……. 47
3 Армирующие текстильные материалы……... 57
3.1 Короткие волокна……. 58
3.1.1 Определение длины волокон и классификация коротковолокнистых отходов по длине……... 60
3.1.2 Выбор длины и толщины волокон……..... 64
3.1.3 Измельчение волокнистых частиц…… 66
3.2 Однонаправленные армирующие текстильные материалы…. 68
3.3 Структура и текстурные свойства текстильных армирующих материалов…….. 75
3.3.1 Тканые материалы…….. 75
3.3.2 Трикотажные структуры…… 77
3.3.3 Плетеные структуры……... 78
3.3.4 Нетканые текстильные материалы…… 78
3.4 Свойства армирующего текстильного компонента, влияющие на пропитывание связующим и адгезионный процесс…….. 78
3.4.1 Химические свойства……. 79
3.4.2 Природа волокна…… 80
3.4.3 Электрические свойства…… 82
3.4.4 Прочность волокон…… 83
3.4.5 Геометрические свойства текстильных материалов…..... 84
4 Способы формирования композиционных текстильных материалов……. 96
4.1 Формирование композиционного текстильного материала с

Витебский государственный технологический университет

ворсовым покрытием аэродинамическим способом……... 97
4.1.1 Технологический процесс нанесения ворсового покрытия на штучный материал…… 101
4.1.2 Технологический процесс нанесения ворсового покрытия непрерывным способом…… 105
4.1.3 Конструкция аэродинамического устройства для нанесения ворсового покрытия……. 112
4.1.4 Определение координаты положения волокнистых частиц на полотне основы при аэродинамическом формировании текстильного композита…… 122
4.1.5 Влияние расположения аэродинамического устройства на равномерность нанесения волокнистых частиц …… 126
4.1.6 Влияния аэродинамических параметров волокнистой частицы на процесс аэродинамического формирования текстильного композита…… 131
4.2 Формирование композиционного текстильного материала с волокнистым покрытием механическим способом…… 133
4.2.1 Дозирование волокнистого материала при подаче в устройство для нанесения……. 137
4.2.2 Устройство для непрерывного нанесения волокнистого материала на основу…….. 144
4.3 Формирование композиционного дуплексного материала с тканым покрытием…… 151
4.3.1 Выбор угла подачи материалов в узел соединения слоев дуплексного текстильного материала…….. 160
4.3.2 Оптимальное давление при соединении текстильного полотна и полотна основы…… 164
4.3.3 Узел обрезки кромки……... 167
4.4 Основы склеивания при формировании слоистых композиционных текстильных материалов…….. 171
4.4.1 Адгезионные процессы в текстильных материалах……. 173
4.4.2 Механизм разрушения адгезионного соединения в слоистых композиционных текстильных материалах…… 173
4.4.3 Способы нанесения связующего при формировании слоистых композиционных текстильных материалов…… 181
4.4.4 Количество связующего при формировании слоистых композиционных текстильных материалов…….. 190
4.5 Композиционный текстильный материал с волокнистым наполнителем, полученный способом прессования……. 193
4.5.1 Формирование синтетических мягких волокнистых плит (СВП-М)…….. 202
4.6 Композиционный текстильный материал, полученный

Витебский государственный технологический университет

способом импрегнирования тканого полотна…….. 208
4.6.1 Физико-химические явления и процессы, протекающие при импрегнировании волокнистых систем……. 216
5 Термообработка и сушка композиционных текстильных материалов……. 230
5.1 Термообработка слоистых композиционных материалов с тканым покрытием для придания специальных эффектов……. 230
5.1.1 Расчет изменения температуры дуплексных текстильных материалов…… 234
5.2 Термообработка композиционных текстильных материалов с волокнистым наполнителем, полученных способом горячего прессования…….. 238
5.2.1 Расчет изменения температуры при формировании композиционных текстильных материалов с волокнистым наполнителем……... 240
5.2.2 Экспериментальные исследования процесса термообработки композиционных текстильных материалов с волокнистым наполнителем……..... 244
5.3 Сушка композиционных текстильных материалов……. 248
5.3.1 Анализ процесса сушки композиционных текстильных материалов…….. 251
6 Интенсификация процессов формирования композиционных текстильных материалов…… 256
6.1 Диэлектрический способ нагрева при формировании композиционных текстильных материалов…….. 258
6.2 Зависимость эффективности пропитки волокнистой основы композиционного текстильного материала от параметров СВЧ-обработки……..…… 263
6.3 Определение эффективного радиуса капилляров в условиях СВЧ нагрева……. 267
6.4 Выбор рациональных режимов формирования композиционных текстильных материалов в условиях воздействия электромагнитных волн СВЧ и ИК диапазона…… 274
6.5 Влияние воздействия электромагнитных волн СВЧ–диапазона на свойства композиционных текстильных материалов…….. 284
Список литературы……. 289

Витебский государственный технологический университет

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время научно-технический прогресс практически немыслим без развития производства композиционных материалов, использование которых постоянно расширяется в различных отраслях народного хозяйства. В ассортименте композиционных материалов большой интерес вызывают композиционные текстильные материалы, в которых в качестве армирующей основы используются текстильные элементы – волокна, нити и пряжа, ткани, трикотаж и нетканые материалы.

Сочетая в одном материале компоненты разной природы, формы и размеров и регулируя их содержание, можно получать неограниченное количество композиционных текстильных материалов и в очень широких пределах изменять их свойства, а также придавать новые – огне-, термостойкость, водо-, масло-, грязеотталкивание, антибактериальные, магнитные, диэлектрические, радиопоглощающие и другие специальные свойства. Комплекс свойств композиционных материалов определяется свойствами компонентов их микро- и макроструктурой, границей раздела фаз, реакцией этих структур на внешние воздействия.

Разработка новых способов формирования композиционных текстильных материалов позволит расширить их ассортимент и увеличить область применения. Особое значение имеет разработка способов формирования композиционных материалов с использованием вторичных материальных ресурсов, в частности коротковолокнистых отходов текстильного производства. На текстильных предприятиях образуется большое количество отходов, значительная часть которых удаляется в места хранения и захоронения. Частично проблема переработки отходов решается предприятиями самостоятельно. Значительно хуже дело обстоит с коротковолокнистыми отходами. Длина волокон в коротковолокнистых отходах колеблется в пределах от 0,5 до 25 мм. В силу своих свойств коротковолокнистые отходы не пригодны для переработки в текстильной отрасли. Таким образом, использование коротковолокнистых отходов при производстве новых видов композиционных текстильных материалов является весьма актуальным направлением.

Структура, физико-механические, физико-химические свойства и внешний вид готовых текстильных композиций в большой степени зависят от сырьевого состава волокнистого продукта или другого текстильного материала, выбора способа формирования, выбора геометрических параметров устройств для соединения (нанесения). Поэтому исследование и оптимизация технологических процессов формирования текстильных композиционных материалов, зависимости физико-механических свойств от вышеперечисленных параметров

Витебский государственный технологический университет

является важными этапами в создании технологии производства композиционных текстильных материалов.

За последние годы сотрудниками кафедр «Прядение натуральных и химических волокон», «Химия» и «Технология и оборудование машиностроительного производства» УО «Витебский государственный технологический университет» рассмотрен ряд проблем, связанных с разработкой новых видов композиционных текстильных материалов бытового и технического назначения, а также вопросы получения материалов с использованием отходов текстильного производства. В монографии представлены результаты научно - исследовательских работ, выполненных по направлению «Разработка технологии получения композиционных текстильных материалов с использованием натуральных и химических волокон, нитей и пряжи, а также отходов текстильного производства». Разработаны, исследованы технологические процессы и получены новые текстильные композиционные материалы:

- композиционный текстильный материал с волокнистым покрытием аэродинамического способа формирования;
- композиционный текстильный материал с волокнистым покрытием механического способа формирования;
- композиционный дуплексный текстильный материал с тканым покрытием;
- композиционный текстильный материал, полученный способом импрегнирования тканого полотна;
- композиционный текстильный материал с волокнистым наполнителем, полученный способом прессования.

Витебский государственный технологический университет

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

К композиционным могут быть отнесены многие природные материалы. Оптимальное с позиций прочности сочетание твердых и мягких, жестких и эластичных компонентов характерно для строения древесины, стеблей злаков, костей человека и животных. Композиционную структуру имеют гранит, многие разновидности кремнезема и некоторые метеориты.

Человек начал упрочнять материалы и конструкции элементами из другого, более прочного материала (арматурой) в глубокой древности. В Шумере и Вавилоне около 6 тыс. лет назад в глиняные кирпичи и гончарные изделия для упрочнения, уменьшения усадки и растрескивания добавляли измельченные камни, солому и ветки. В Египте и Месопотамии в третьем тысячелетии до н. э. строили суда из тростника, пропитанного смолой. В Индии и Китае природный лак – продукт жизнедеятельности некоторых насекомых – использовали для заливки рукоятей мечей и изготовления точильных камней путем смешивания лака с песком. Азиатские кочевники изготавливали луки из нескольких компонентов (сухожилий животных, древесины, шелка), соединенных с помощью клея. Поиски оптимального сочетания материалов продолжались в течение многих веков. В безлесных южных районах России и Украины при изготовлении жилищ и оград издавна использовали сырцовый кирпич из глины с добавлением соломы, костры и мякины. В середине XV в. при постройке храма Василия Блаженного в Москве русский зодчий Барма Постник применил армированные железными полосами каменные плиты.

Прообразом современных композиционных материалов считается железобетон. Первый патент на изготовление цветочных кадок из материала, сочетавшего проволоку и цемент, был получен в 1867 г. парижским садовником Ж. Монье. Армированные стеклянными волокнами полиэфирные материалы впервые применены в конструкции самолета в 1942 г., а несколько позже было начато промышленное производство стеклопластиков. Высокопрочные композиты на полимерной или металлической основе, армированные высокомодульными волокнами и нитевидными монокристаллами («усами») с совершенной структурой, стали широко использовать в технике с 1970-х гг. [3].

Общее, что объединяет композиционные материалы независимо от их происхождения - все они являются результатом объемного сочетания разнородных компонентов, один из которых образует матрицу (связующее), а другой (наполнитель) обладает высокой прочностью и/или определенными функциональными свойствами; при этом композиционные материалы имеют свойства, которыми не обладают их

Витебский государственный технологический университет

отдельные компоненты. Таким образом, современное определение композиционных материалов предполагает выполнение следующих условий.

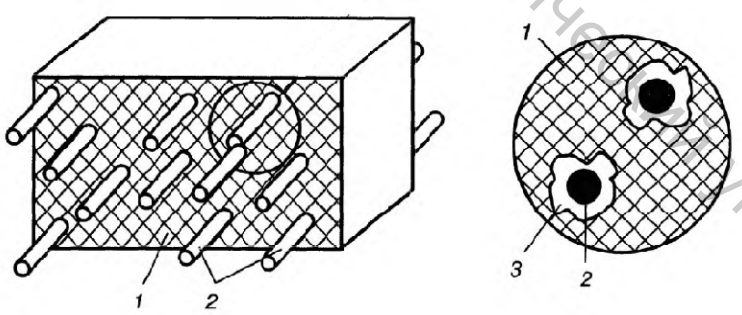
1. Композиция должна представлять собой сочетание хотя бы двух разнородных материалов (компонентов) с четкой границей раздела фаз между ними.

2. Компоненты композиции образуют ее своим объемным сочетанием.

3. Композиция должна обладать свойствами, которых нет ни у одного из ее компонентов в отдельности.

Композиционный материал (КМ) – это материал, состоящий их двух или более компонентов, которые отличаются по своей природе или химическому составу, где компоненты объединены в единую монолитную структуру с границей раздела между структурными составляющими (компонентами), оптимальное сочетание которых позволяет получить комплекс физико-химических и механических свойств, отличающихся от комплекса свойств компонентов [1]. Композиционные материалы представляют собой многофазные системы, которые состоят из двух или более компонентов, сохраняющих индивидуальность (структуру и свойства) своего вещества в составе композита.

На рисунке 1.1 схематически показана структура композиционного материала. Компонент, непрерывный в объеме композита, называют матрицей или связующим (1). Другие, например упрочняющие или армирующие, компоненты (2) распределены в матрице в определенном порядке. Переходные поверхностные слои (3) расположены на границах раздела матрицы и других компонентов [4].



1 – матрица; 2 – армирующие компоненты;
3 – переходный слой на границе раздела компонентов

Рисунок 1.1 – Структура композиционного материала

К преимуществам композиционных материалов относятся:

- высокая удельная прочность;
- высокая жёсткость;
- высокая износостойкость;
- высокая усталостная прочность;

Витебский государственный технологический университет

– возможность изготовления размеростабильных конструкций.

К недостаткам композиционных материалов относятся:

– высокая стоимость;

– анизотропия свойств;

– повышенная наукоёмкость производства, необходимость специального дорогостоящего оборудования и сырья, а, следовательно, развитого промышленного производства и научной базы [5].

Сферы применения различных видов композиционных материалов представлены на рисунке 1.2.

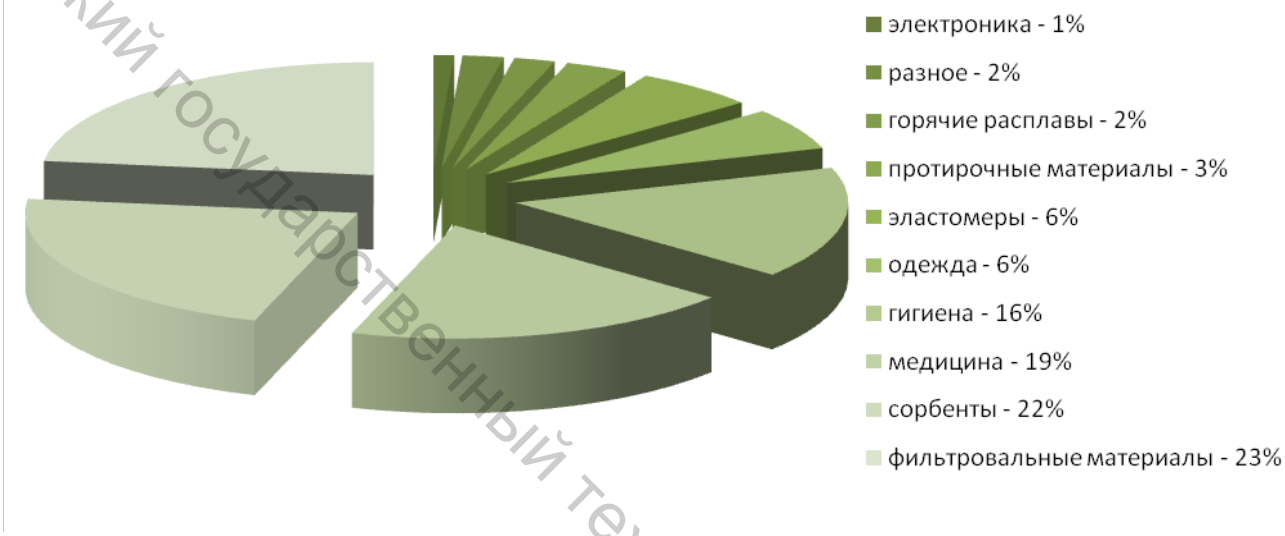


Рисунок 1.2 – Сферы применения различных видов композиционных материалов

Как видно на данной диаграмме, композиционные материалы встречаются практически во всех областях жизнедеятельности человека, и сфера их применения зависит от назначения, строения и способов получения.

1.1 Классификация композиционных материалов

Классификация композиционных материалов может быть осуществлена по нескольким существенным критериям:

– происхождению;

– назначению;

– типу материала матрицы;

– природе компонентов;

– размеру фазовых включений;

– признакам структуры;

– методам получения.

По происхождению различают природные, искусственные и синтетические композиционные материалы. Природные композиты

Витебский государственный технологический университет

находятся в готовом виде на Земле или в космосе. Искусственные и синтетические композиты являются продуктом трудовой деятельности человека.

По назначению композиты подразделяются на две большие группы – материалы общетехнического и специального назначения. Первые предназначены для восприятия и передачи механической нагрузки. Из них изготавливают элементы конструкций. Вторые (тоже могут быть конструкционными) выполняют в составе изделий специальные функции: снижение трения и изнашивания подвижных сопряжений, защита от коррозии металлических деталей; звуко- и теплоизоляция и т. п.

По материалу матрицы различают:

– полимерные композиты (термопластичные, на основе реактопластов, на основе смесей полимеров);

– металлические композиты (в том числе получаемые методом порошковой металлургии и сплавы, состоящие из макронеоднородных фаз);

– керамические и другие неорганические композиты (на основе неорганических полимеров, на минеральной, углеродной, оксидной и других неорганических матрицах);

– комбинированные (полиматричные) композиты [1].

Матрица придает изделию из композита заданную форму и монолитность, обеспечивает передачу и распределение нагрузки в объеме материала, защищает армирующие элементы от внешних воздействий.

По природе компонентов, вводимых в матрицу, композиты подразделяются на группы, соответствующие признакам модифицирующих компонентов. Номенклатура последних очень широка и включает практически все технические материалы. Поэтому классификация композитов по этому признаку имеет иерархическую структуру. Первой ступенью в ней является разделение композитов на наполненные и армированные.

Наполненные композиты содержат в матрице наполнители – дисперсные (то есть раздробленные, мелкие) частицы неорганических и органических веществ, которые могут находиться в любой фазе. Наполнители выполняют в композитах следующие функции:

– изменяют механические показатели композитов и придают им специальные свойства (электрическую проводимость, химическую стойкость, звукопоглощение и т. д.);

– улучшают технологичность композитов, то есть их приспособленность к переработке в изделия (например, антифрикционные компоненты улучшают прессуемость порошковых смесей; пластификаторы увеличивают смачивание связующим

Витебский государственный технологический университет

порошковых частиц; активные добавки усиливают адгезию компонентов и т. п.);

– снижают стоимость изделий, так как наполнители, как правило, дешевле связующих.

Армированные композиты имеют в составе армирующие элементы (арматуру) более прочные, чем матрица. При эксплуатации изделия они воспринимают значительную часть приложенной к нему механической нагрузки. С помощью наполнителей прочность матрицы можно увеличить в 1,5 – 2,0 раза, а путем армирования – на порядок и более. Кроме того, армирующие элементы могут придавать композитам тепло- и электропроводность, а также такое специфическое свойство, как радиопоглощение (способность поглощать электромагнитные волны радиодиапазона), анизотропию механических и других свойств, создавать необычную структуру поверхностного слоя и т. д. Вклад армирующих компонентов (волокна, нити, ткани, листовые материалы, объемные волокнистые или пористые элементы и др.) в свойства композитов нередко является определяющим. Поэтому в названиях композитов часто находит отражение химическая природа арматуры – графитопласты, металлокерамика, стекловолокниты и т. п.

В состав композитов могут одновременно входить и наполнители, и армирующие элементы [3].

По размеру фазовых включений разработчики материалов изначально отличали композиты от однородных по структуре материалов.

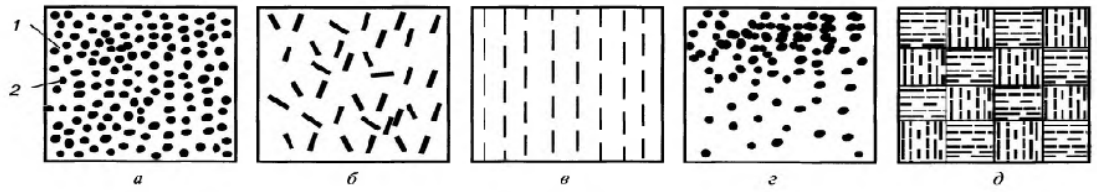
Типичным признаком композита являются различимые в его структуре невооруженным глазом разнородные включения. По мере того как технология получения материалов совершенствовалась, компоненты становились все более мелкими, так что различать их во многих случаях приходилось с помощью микроскопа. На рубеже XX – XXI вв. возникла тенденция формирования композиционных материалов из частиц нанометрового размера.

По признакам структуры различают дисперсно-наполненные, волокнистые, слоистые, каркасные и комбинированные композиты.

Дисперсно-наполненные композиты состоят из непрерывной матрицы (то есть ее атомно-молекулярным строением можно пренебречь), в которой распределена дисперсная фаза в виде твердых частиц (порошка, коротких волокон, микросфер) либо включений жидкости или газа (рисунок 1.3). Частицы дисперсной фазы могут быть расположены в матрице хаотически (рисунок 1.3 а, б), но чаще их стараются разместить в определенном порядке (рисунок 1.3 в, г, д).

Волокнистые композиты – материалы с непрерывной матрицей, соединяющей длинные волокна (рисунок 1.4).

Витебский государственный технологический университет



Наполнители в виде: а, г – частиц порошка, включений жидкости или газа;
б, в, д – коротких волокон;
1 – матрица; 2 – дисперсная частица

Рисунок 1.3 – Дисперсно-наполненные композиты

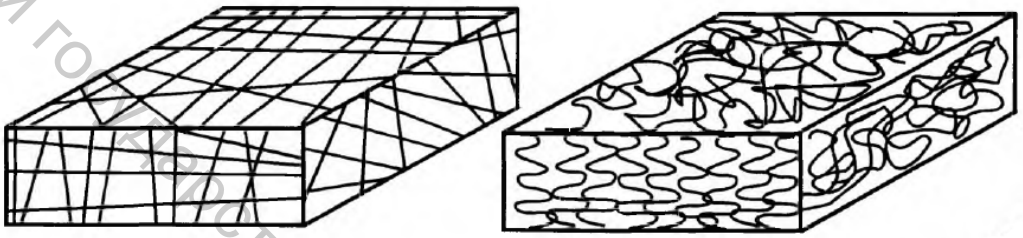
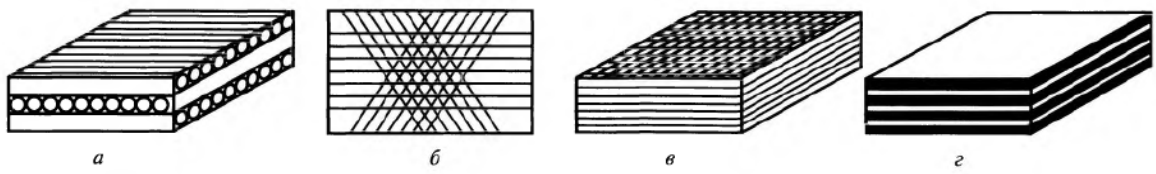


Рисунок 1.4 – Волокнистые композиты

Слоистые композиты – материалы, состоящие из листовых или расположенных послойно волокнистых компонентов, скрепленных между собой с помощью связующего. На рисунке 1.5 представлены основные типы таких материалов. Простейшим из них является композит со структурой в виде чередующихся горизонтальных слоев ориентированных волокон, которые направлены по нормали друг к другу (рисунок 1.5 а). Укладку волокон (рисунок 1.5 б) называют звездной. Композит может быть образован слоями ткани (рисунок 1.5 в) или нетканого волокнистого материала, состоять из листовых (бумага, фольга, пленка) компонентов (рисунок 1.5 г). Регулированием расположения нитей в тканях можно улучшить прочностные и некоторые другие свойства композитов, но это обычно приводит к увеличению их стоимости. Снижение стоимости достигается при использовании нетканых волокнистых материалов.

Каркасные композиты – материалы, состоящие из двух или более непрерывных фаз. На рисунке 1.6 приведены схематические изображения структур каркасных композитов. Непрерывная трехмерная армирующая фаза чаще всего состоит из семейств ориентированных волокон, которые расположены, например, во взаимно перпендикулярных направлениях (рисунок 1.6 а).

Витебский государственный технологический университет

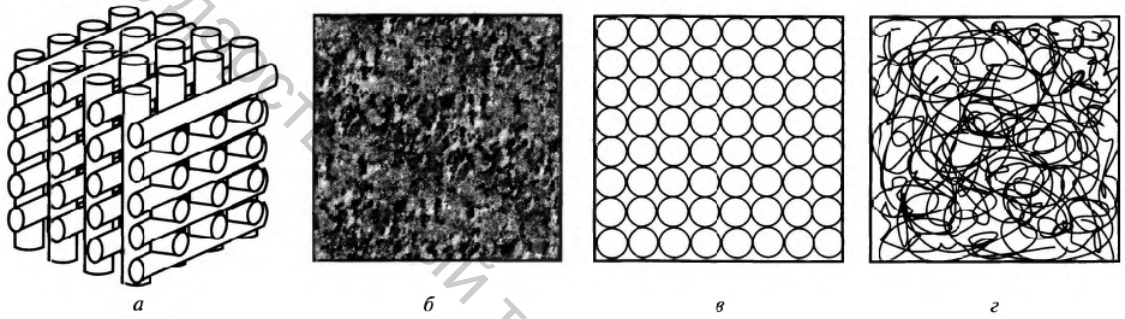


а – волокна расположены взаимно перпендикулярно; б – звездная укладка волокон; в – слои выполнены из ткани; г – материал состоит из листовых компонентов

Рисунок 1.5 – Слоистые композиты

Еще один типичный каркасный композит – пористая матрица, пропитанная жидким отверждающимся компонентом (рисунок 1.6 б).

Считают, что фаза непрерывна, если образующие ее структурные элементы находятся в контакте друг с другом. Примером такой фазы служит каркас, состоящий из плотноупакованных сфер (рисунок 1.6 в).



а – каркас образован волокнами, ориентированными во взаимно перпендикулярных направлениях; б – пористый каркас пропитан отверждающимся компонентом; в – каркас образован плотноупакованными сферами; г – каркас в виде объемной структуры из длинномерных волокон

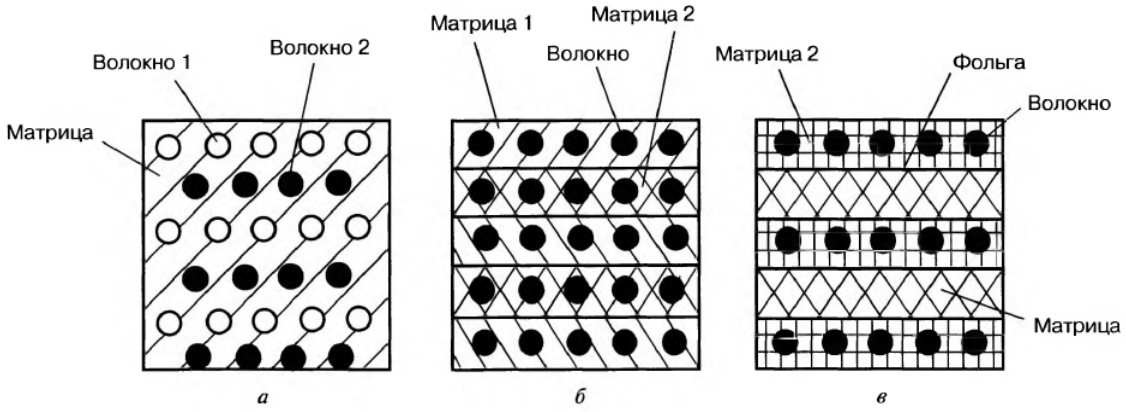
Рисунок 1.6 – Каркасные композиты

На рисунке 1.6 г изображен композит, каркас которого имеет вид объемной структуры, состоящей из длинномерных волокон.

Комбинированные композиты имеют признаки, дающие основания отнести их к нескольким структурным типам композиционных материалов.

Полиармированный (рисунок 1.7 а) композит содержит два или более различных по природе и (или) структуре армирующих элемента, например, его матрица может быть наполнена и армирована.

Витебский государственный технологический университет



а – полиармированный; б – полиматричный; в – гибридный

Рисунок 1.7 – Комбинированные композиты

Полиматричный композит имеет матрицу, состоящую из нескольких материалов, например, как слоистый композит, схема которого приведена на рисунке 1.7 б.

Гибридный композит (рисунок 1.7 в) является полиматричным и полиармированным. Гибридные композиты, как правило, формируют одновременно с изделием. Благодаря этому соответствующий компонент (материал матрицы, частицы наполнителя, армирующий элемент, имеющие заданные химическую природу и структуру) удается разместить в нужном месте конструкции, где его свойства реализуются наиболее полно.

По методам получения композиты подразделяют на классы в зависимости от нескольких признаков.

Наиболее общей является классификация по фазовому состоянию компонентов во время их соединения в композиционный материал. Компоненты могут находиться в твердой или жидкой фазах, могут быть осаждены с помощью газофазных процессов, связаны в композит с применением вязкотекучего состояния одной или нескольких фаз, наконец, композит может быть сформирован путем комбинирования названных состояний компонентов.

Композиты часто классифицируют по признаку ключевой технологической операции их формирования. Так, пропиточные материалы получают путем пропитки пористого каркаса расплавом или раствором связующего. Порошковые композиты формируют методами порошковой металлургии, которые включают операции прессования заготовки (прессовки) из порошковых компонентов и ее спекания. Большую группу порошковых композиционных материалов получают методом взрывной обработки, основанной на использовании энергии взрыва, а также методом диффузионной сварки. Газофазные композиты изготавливают путем вакуумного осаждения металлических или керамических матричных покрытий из газовой фазы на волокнисто-пористые каркасы. Большинство полимерных композитов формируют

Витебский государственный технологический университет

по экструзионной технологии с применением вязкотекучего состояния полимерного связующего [6].

Целью создания композиционных материалов различными способами является объединение схожих или различных компонентов для получения материала с новыми заданными свойствами и характеристиками, отличными от свойств и характеристик исходных компонентов.

Витебский государственный технологический университет

1.2 Критерии совместимости компонентов композиционных материалов

Формирование композита сопровождается механическим или физико-химическим взаимодействием компонентов, находящихся в различных агрегатных состояниях. Это приводит к образованию фаз и границ раздела между ними. Границы раздела в значительной мере определяют свойства композита: прочность, деформационные характеристики, стойкость к механическому изнашиванию, тепло- и электропроводность и другие.

Межфазное взаимодействие компонентов в композиционных материалах зависит от их термодинамической, кинетической и механической совместимости.

Термодинамическая совместимость – свойство матрицы, армирующих элементов и других компонентов композита находиться в состоянии термодинамического равновесия при температурах, соответствующих режимам формирования и условиям эксплуатации материала. Полностью термодинамическое равновесие в композиционных материалах достигается очень редко.

Кинетическая совместимость – свойство компонентов находиться в состоянии метастабильного равновесия, регулируемого протеканием процессов адсорбции, диффузии или химической реакции между компонентами. Термодинамически несовместимые компоненты при определенных условиях (температура, давление, продолжительность взаимодействия) могут быть совместимы кинетически, что обеспечивает стабильность композиционного материала.

Механическая совместимость достигается, если деформационные характеристики и коэффициенты теплового расширения компонентов соответствуют друг другу таким образом, что при эксплуатации не нарушается целостность композита, а его свойства остаются достаточно стабильными.

Компоненты композита образуют единый материал, будучи соединены *механическими, физическими и химическими связями*.

Механические связи возникают под действием сил трения и при механическом зацеплении компонентов, имеющих специально

созданные или естественные неровности на контактирующих поверхностях. Связи этого типа определяют главным образом механические свойства волокнистых и слоистых композитов.

Физические связи являются результатом межмолекулярного взаимодействия поверхностных слоев компонентов. К физическим связям относятся гравитационные, электростатические и магнитные взаимодействия компонентов, составляющих композит.

Химические связи обусловливают соединение атомов и ионов, принадлежащих находящимся в контакте разным компонентам, в молекулы и кристаллы. Энергия химической связи составляет десятки и сотни Дж/моль.

В процессе формирования композиционного материала возможно образование следующих типов связи:

физические силы межмолекулярного взаимодействия – силы Ван-дер-Ваальса – характеризующиеся самой низкой энергией (до 8,5 кДж/моль);

водородные связи, энергия которых составляет 21–42 кДж/моль;

ионная химическая связь, возникающая при наличии противоположных зарядов, её энергия 42–82 кДж/моль;

ковалентная химическая связь – самая прочная, энергия связи соответствует 113–680 кДж/моль.

Работа Wa, необходимая для разрушения химической связи, значительно больше, чем для физических межмолекулярных связей, поэтому при формировании композиционных материалов стремятся реализовать химическое взаимодействие основных компонентов, адгезионное взаимодействие, обусловленное химическими связями, наиболее устойчиво.

В реальных условиях вследствие несовершенства структуры материалов, сложности микрорельефа поверхности армирующих элементов реализуется физико-химическое взаимодействие компонентов. Оно происходит в процессе смачивания армирующих элементов расплавом или раствором связующего.

Витебский государственный технологический университет

2 КОМПОЗИЦИОННЫЕ ТЕКСТИЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В зависимости от выполняемой роли компоненты композиционного текстильного материала имеют следующие названия: армирующие элементы и матрица.

По природе компонентов композиционные текстильные материалы можно отнести к армированным композитам, которые имеют в составе армирующие элементы более прочные, чем матрица. ***Композиционные текстильные материалы*** **(КТМ)** - это материалы, в которых в качестве армирующей основы используются текстильные элементы (волокна, нити, ткани, трикотаж, нетканые полотна) [7]. При эксплуатации материалов и изделий они воспринимают значительную часть приложенной к ним механической нагрузки. Текстильные элементы могут придавать композитам декоративные свойства, создавать необычную структуру на поверхности, а также различные специальные свойства (огне-, термостойкость, водо-, масло-, грязеотталкивание, антибактериальные, магнитные, диэлектрические, радиопоглощающие и другие). Композиционные текстильные материалы содержат полимерное связующее (матрицу), которое объединяет все компоненты материала в единую структуру и обусловливает их совместную работу в составе композиционного текстильного материала. Матрицами могут быть любые органические полимеры.

Текстильные композиты являются комбинацией полимерного связующего и основы, представляющей собой систему волокон или нитей. Причем степень взаимодействия элементов армирующего каркаса между собой определяется:

- способами изготовления (ткань, трикотаж, нетканый материал, плетеные изделия);

- направлением расположения, геометрическими размерами и особенностью комплексов структурных элементов (волокон и мононитей);

- плотностью (пористостью) текстильного материала.

В зависимости от соотношения числа фаз «матрица – армирующий элемент» (м:а) различают *волокнистые текстильные композиты* (м:а=1) с полимерной матрицей, упрочненной натуральными или химическими волокнами, нитями, тканями, сетками, трикотажными и нетканными полотнами, и *слоистые текстильные композиты* (м:а<1), компоненты которых выполнены в виде послойно расположенных структурных текстильных элементов. В таблице 2.1 представлены виды композиционных текстильных материалов.

Витебский государственный технологический университет

Таблица 2.1 – Виды композиционных текстильных материалов

Материал	Способ формирования	Количество компонентов, образующих материал	Состав материала		Применение
			Армирующий текстильный элемент	Связующее	
Композиционный текстильный материал с волокнистым наполнителем по поверхности	Аэродинамический Электрофлокирование Механический	3	Волокнистая масса, химические нити, нетканый материал	Полимерный клей	Декоративная отделка «флок» материалов и готовых изделий, текстильные обои
Композиционный текстильный материал с текстильным наполнителем по объему	Пропитка Экструзия Прессование	2	Волокнистый материал, ткань, трикотажное полотно	Термореактивные и термопластичные органические полимеры	Звуко-, теплоизоляционные материалы, декоративные штукатурки, обувные и галантерейные материалы, мебельные отделочные материалы
Дуплексный композиционный текстильный материал	Склеивание Дублирование	3	Ткань, нетканый материал	Полимерный клей, пленка.	Текстильные настенные покрытия, напольные покрытия, отделка салона автомобилей, швейные изделия

Витебский государственный технологический университет

2.1 Формирование структуры композиционного текстильного материала

Разработка композиционного текстильного материала включает следующие основные стадии (рисунок 2.1):

1. Формирование комплекта проектных исходных данных, которые содержат:

● условия эксплуатации будущего материала или изделия и соответствующие им механические, физические, химические и другие свойства;

● экономические показатели, которые характеризуют потребность и предлагаемые объемы производства материала и изделий из него; технический ресурс; допустимые трудозатраты на его изготовление; расходы на исследование и испытание материалов; капиталовложения в производство, потребность в специальном оборудовании; наличие сырьевой базы основных компонентов текстильного композита и т. д.

● социальные показатели, включающие условия и степень безопасности труда при изготовлении материала и изделий из него, влияние производства на окружающую среду и т. д.

2. Выбор структуры, состава и технологии композиционного текстильного материала, которые базируются на научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах.

3. Оценка основных свойств композиционного текстильного материала расчетными и экспериментальными методами.

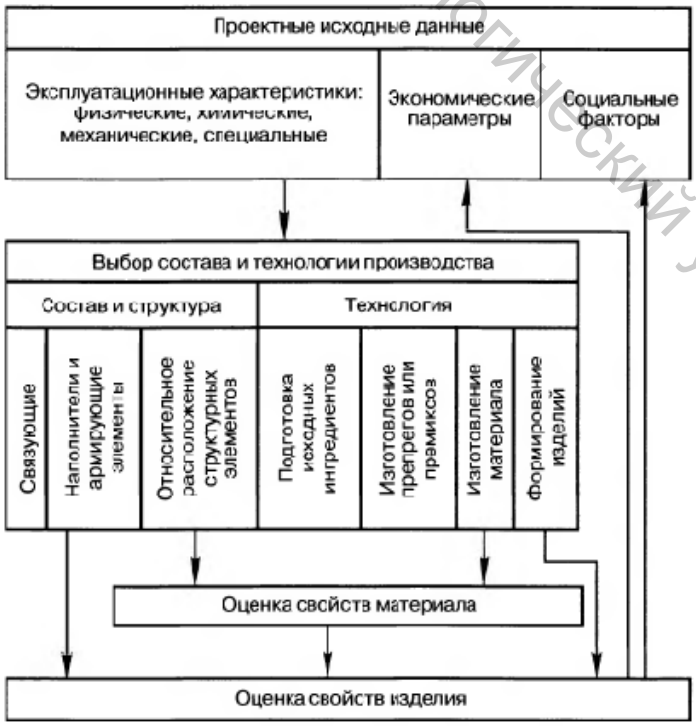


Рисунок 2.1 – Процесс разработки композиционного материала

Витебский государственный технологический университет

Свойства текстильных композиционных материалов существенно зависят от свойств, состава и взаимного расположения компонентов, особенностей их взаимодействия на межфазной границе, а в некоторых случаях диффузии компонентов матрицы в волокна. Таким образом, между волокнами и матрицей должно выдерживаться определенное соотношение свойств, и их выбор не может быть произвольным.

Выбор основных компонентов текстильного композита определяется необходимыми функциональными требованиями, эксплуатационной надежностью композитов, совместимостью компонентов, технологичностью переработки, доступностью и стоимостью. Эти требования предусматривают, прежде всего, определенное соотношение между механическими и термическими свойствами армирующих волокон и матрицы (связующего): модуль упругости при растяжении и сдвиге текстильного компонента должен быть больше, чем связующего; прочность текстильного материала должна быть больше, чем связующего; удлинение при разрыве текстильного материала должно быть несколько меньше, чем связующего; коэффициенты Пуассона для текстильного компонента и матрицы желательно иметь достаточно близкими, чтобы при деформации композита на границе текстильный материал-матрица не возникало напряжений, отрывающих их друг от друга и тем самым снижающих адгезию; термические характеристики текстильного материала (температуры плавления или разложения) должны быть выше температур переработки термопластов и отверждения реактопластов.

Механические свойства текстильных композиционных материалов определяются как свойствами исходных компонентов (текстильного и связующего), так и структурой текстильного армирующего компонента (нитей, жгутов, лент, тканей, нетканых материалов, трикотажа).

Взаимодействие текстильного компонента с матрицей должно обеспечивать высокую реализацию механических свойств текстильного материала в композиционном материале и его монолитность. Для этого необходимы: хорошая смачиваемость текстильного компонента связующим; высокая адгезия между текстильным компонентом и связующим, характеризуемая сдвиговой прочностью на границе раздела текстильный материал-связующее; высокая адгезия должна долговременно сохраняться в условиях эксплуатации композита при активных внешних воздействиях, в том числе влаги; сохранение или минимальное изменение свойств текстильного материала под влиянием компонентов связующего; релаксация внутренних напряжений в элементарном объеме текстильный материал-связующее при термообработке или под влиянием компонентов связующего и других факторов.

Витебский государственный технологический университет

Другие физические, физико-химические и специальные функциональные свойства текстильных композиционных материалов также определяются свойствами компонентов и их взаимодействием на границе раздела.

2.2 Связующие компоненты для формирования композиционных текстильных материалов

Для обеспечения прочного взаимодействия между компонентами КТМ матрица должна обеспечить хорошую смачиваемость всей поверхности распределенного в ней текстильного компонента, не вызывая химических реакций, должна обеспечить формуемость композиции в монолитный материал без нарушения формы и размера частиц наполнителя и их взаимного расположения в течение всего периода эксплуатации материалов.

Матрица (связующее) в зависимости от способа формирования текстильного композита может быть в виде расплавов, растворов, дисперсий (порошков, эмульсий, суспензий) или пленок.

Выбор связующего для формирования зависит от вида и назначения композиционного текстильного материала. В общем случае для *волокнистых текстильных композитов* (м:а=1) в качестве связующего используются органические полимеры, для *слоистых текстильных композитов* (м:а<1) – полимерные синтетические клея (адгезивы).

К органическим полимерам относятся соединения, молекулы которых содержат атомы углерода, азота, кислорода, серы и галогенов, входящих в состав главной цепи и боковых групп. Органические полимеры подразделяют на карбоцепные и гетероцепные. Главная цепь карбоцепных полимеров состоит только из атомов углерода. В состав цепи макромолекул гетероцепных полимеров входят гетероатомы (O, N, S). Структурные формулы основных органических полимеров, используемых в качестве связующего при формировании композиционных текстильных материалов представлены в таблице 2.2.

Для формирования текстильных композиционных материалов используют термореактивные и термопластичные органические полимеры. *Термореактивные полимеры* при нагревании выше критических температур становятся неплавкими и практически нерастворимыми. *Термопластичные полимеры* обладают свойством многократно переходить при нагревании в состояние расплава.

Витебский государственный технологический университет

Преимущества и недостатки термореактивных и термопластичных связующих для композиционных текстильных материалов

	Преимущества	Недостатки
Термореактивные (эпоксидные смолы, полиэфирные смолы, фенолформальдегидные смолы, полиимидные олигомеры)	Высокая прочность, высокая термостойкость, высокая радиационная и химическая стойкость, низкая вязкость растворов (расплавов), хорошие адгезионные свойства, долговечность.	Хрупкость, низкая трещиностойкость, низкая ударная вязкость, плохая перерабатываемость, применение растворителей при формировании композита.
Термопластичные (полиолефины, полиакрилаты, полиэфиримиды и др.)	Хорошая перерабатываемость, высокая ударная вязкость, трещиностойкость, отсутствие растворителей.	Средняя и низкая прочность, термостойкость, низкая усталостная прочность, высокая вязкость расплава.

В последнее время активно развивается направление гибридных связующих, сочетающих термопластичные и термореактивные компоненты в смеси, что позволяет реализовать преимущества двух основных классов связующих.

Насколько реализуются механические характеристики волокнистой армирующей основы зависит от таких свойств полимерной матрицы, как прочность, жесткость, пластичность, вязкость разрушения, ударная вязкость. Термостойкость, термостабильность, ударная прочность, водо- и атмосферостойкость, химическая стойкость, механические свойства текстильного композита в направлении поперек волокон определяются именно полимерной матрицей и свойствами границы раздела фаз. Кроме того, при разработке связующих необходимо учитывать и их технологические свойства (время и кинетика отверждения, вязкость и давление переработки, смачиваемость армирующего материала, усадка, наличие и токсичность применяемых растворителей и прочие).

Технические параметры, определяющие качество композиционных текстильных материалов, и технологии их изготовления, а также определяющие характеристики связующих, выбираются соответственно целевым свойствам текстильных композитов, которые определяются свойствами волокнистого наполнителя и полимерного связующего.

Витебский государственный технологический университет

Таблица 2.2 – Структурные формулы некоторых органических полимеров

Вид	Полимер	Строение звена
Карбоцепные	полиэтилен	$-CH_2-CH_2-$
	полипропилен	$-CH_2-CH(CH_3)-$
	поливиниловый спирт	$-CH_2-CH(OH)-$
	полиакрилат	$-CH_2-CH(COOR)-$
	поливинилхлорид	$-CH_2-CHCl-$
	поливинилацетат	$-CH_2-CH(O-C(=O)-CH_3)-$
	полистирол	$-CH(C_6H_5)-CH_2-$
Гетероцепные	полиамид	$-NH-CO-(CH_2)_n-$
	полиуретан	$-NH-CH_2-NH-C(=O)-O-CH_2-O-C(=O)-$
	полиэтилентерефталат	$-C(=O)-C_6H_5-C(=O)-CH_2-CH_2-$

Свойства основных органических полимеров, используемых в качестве связующих при формировании композиционных текстильных материалов, представлены в таблице 2.3.

Связующие являются сложными полимерными композициями, в состав которых кроме основного компонента – органический полимер или смесь полимеров – могут входить пластификатор, растворитель, катализатор, ингибитор, различные модифицирующие добавки.

2.2.1 Выбор состава полимерной композиции

Добавки, вводимые в полимерную композицию, имеют различное назначение и могут существенно влиять на свойства связующего: изменять эластичность и мягкость, понижать температуру размягчения, регулировать

Витебский государственный технологический университет

Таблица 2.3 – Физико-механические характеристики основных органических полимеров и синтетических клеев

Полимер	Плотность, кг/м^3	Температура плавления, ^0C	Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Диэлектрическая проницаемость	Теплопроводность, Вт/(м*К)	Теплостойкость, ^{0}С	Морозостойкость, ^{0}С	Водопоглощение за 24ч.,%
Органические полимеры									
Полиэтилен ПЭВД ПЭНД	 900-935 948-959	 105-108 125-135	 10-16 20-30	 400-600 300-800	 2.3-2.4 2.3-2.4	 0.33-0.36 0.42-0.44	 120 80-90	 -46 -57	 <0.01 <0.01
Полипропилен	900-910	160-170	25-40	200-800	2.2-2.4	0.15	130-150	-18	<0.05
Поливинилхлорид	1380-1450	180-220	70-120	10-40	3.2-4.1	0.15-0.16	66-93	-46	0
Полистирол	1050-1080	-	37-45	1.5-3.0	2.5-2.8	0.09-0.14	80-95	-56	0.05
Полиэтилентерефталат	1320-1380	260	120-130	2-4	3.2-3.3	0.15	150	-60	0.8
Полиамид П6	1130	215	55-77	100-150	3.6-4.3	0.27-0.29	90-200	-70	9.5

Синтетические клеи

Клей	Режим склеивания			Характеристики клеевого соединения		
	Температура, ^{0}С	Время, ч	Давление, МПа	Предел прочности при сдвиге, МПа	Термостойкость, ^{0}С	Среда, в которой соединение длительно устойчиво
Фенолформальдегидный	20	4-6	0.2-0.4	10-15	75-100	Вода, бензин, масло, спирты, ароматические углеводороды
Полиуретановый	20	24	0.05-0.5	10-20	75-125	Вода, масло, спирты, ароматические углеводороды
Полиакриловый	20	24	0.1-0.3	10-15	50-60	Вода, топлива, масла, алифатические углеводороды
Поливинилацетатный	20	-	контактное	8-12	40	Топлива, масла, алиф. углеводороды

Витебский государственный технологический университет

вязкость, придавать специальные свойства (огне-, термостойкость, водоотталкивание, антистатические, бактерицидные свойства и другие). Состав добавок, их количество подбирают экспериментальным путем в зависимости от требований к качеству готового материала.

Для повышения эластичности связующего в состав полимерной композиции вводят *пластификаторы* – вещества, которые термодинамически совместимы со связующим полимером, отличаются малой летучестью, достаточной химической стойкостью и улучшают деформационные характеристики полимеров в широком диапазоне температур. Механизм их пластифицирующего действия основан на увеличении подвижности макромолекул и экранировании межмолекулярного взаимодействия. К наиболее распространенным пластификаторам относятся эфиры ароматических и алифатических кислот, эфиры гликолей, продукты переработки нефти, жирные кислоты, растительные масла. Несмотря на то, что пластификаторы являются эффективными модификаторами полимеров, существуют следующие недостатки их использования при формировании текстильного композиционного материала: даже незначительная токсичность ограничивает область применения композиционных текстильных материалов; снижение прочности и стойкостью к термоокислительным процессам; уменьшается устойчивость к воздействию различного рода микроорганизмов; дополнительные затраты на организацию производства. Основные свойства промышленных пластификаторов приведены в таблице 2.4.

Введение пластификатора в связующее с высокой вязкостью, у которого тепловое движение молекулярных цепей затруднено, может способствовать диффузии и, следовательно, повышать адгезию и прочность соединения связующего с текстильным материалом. Введение же пластификатора в сравнительно низковязкое связующее будет ухудшать адгезию и снижать механические свойства.

При формировании слоистых текстильных композитов рекомендуется введение пластификатора в состав адгезива с целью уменьшения жесткости готового материала [8]. Так, например, при производстве текстильных композиционных материалов, используемых в качестве настенных покрытий (текстильные обои), для придания готовому материалу эластичности в качестве пластификаторов применяются: глицерин, ализариновое масло, дибутилфталат, трикрезилфосфат и касторовое масло.

Существенным недостатком ализаринового масла как пластификатора является то, что он гидрофилизирует бумажную основу, на которую наносится. Дибутилфталат обладает сильным смягчающим свойством, но относится к четвертому классу опасности. Основной недостаток трикрезилфосфата – его слабая светостойкость.

Витебский государственный технологический университет

Таблица 2.4 – Показатели свойств пластификаторов

Пластификатор	Плотность, г/см^3	Вязкость при температуре 20^{0}С, мПа*с	Температура, ^{0}С		
			кипения	вспышки	плавления
Эфиры ароматических кислот и алифатических спиртов					
Диметилфталат	1,190	16,3	-	146	0-2
Диэтилфталат	1,118	10,06	-	125	-3
Дибутилфталат	1,042-1,04	19-23	300	175	-40
Диоктилфталат	0,988	77-82	-	206	-46
Динонилфталат	0,980	113-123	-	-	(-28)-(-35)
Эфиры алифатических кислот и алифатических спиртов					
Диизооктиладипинат	0,922	13-15	-	188	-40
Дибутилсебацинат	0,934	7-11	-	183	-10
Дибутиладипинат	0,960	-	183	145-149	-23
Трикрезилфосфат	1,165	110-120	425-440	276	-36
Трифенилфосфат	1,201	8,6	-	223	49-51
Касторовое масло	0,95-0,97	-	-	-	-
Алифатические спирты и кислоты					
Олеиновая кислота	0,89	25,6	250	-	22-34
Стеариновая кислота	0,96	-	376	-	53-70
Глицерин	1,26	1480	290	174	17,8

Пленка с трикрезилфосфатом на свету желтеет.

Исходя из требований обойного производства (стандарт качества ИСО 9001), в качестве пластифицирующих добавок при формировании дуплексных текстильных материалов (текстильные обои) выбраны: глицерин и касторовое масло. На рисунке 2.2 представлены результаты исследований по выбору пластификатора.

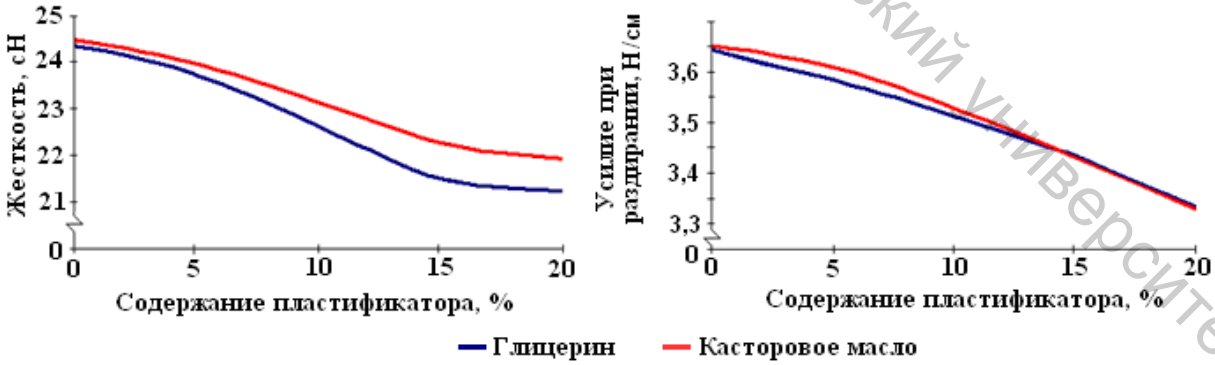


Рисунок 2.2 – Изменение жесткости и прочности образцов дуплексных материалов в зависимости от содержания пластификатора в клеевом составе (60 % ПВА и 40 % ПВС)

Витебский государственный технологический университет

По полученным результатам установлено, что при использовании касторового масла наблюдались проявления маслянистых пятен с обратной стороны бумажного полотна, что является недопустимым. Таким образом, для производства текстильных настенных покрытий выбрана пластифицирующая добавка – глицерин.

Однако при снижении жесткости слоистого текстильного композита одновременно происходит уменьшение степени склеивания компонентов, поэтому необходимо установить оптимальное содержание пластифицирующей добавки.

Результаты экспериментальных исследований по определению содержания глицерина в клеевом составе представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Изменение степени склеивания и жесткости образцов дуплексных материалов в зависимости от содержания пластификатора в клеевом составе

Наименование показателя	Процент содержания глицерина в клее, %			
	5	10	15	20
Усилие при раздирании, Н/см	3,6	3,5	3,45	3,35
Жесткость образца, сН	23,8	22,7	21,6	21,4

Определено, что при увеличении содержания глицерина в клеевом составе усилие при раздирании уменьшается. При добавлении пластификатора 10 % - 15 % наблюдается значительное уменьшение жесткости. Дальнейший рост процентного содержания глицерина в адгезиве не вызывает заметных уменьшений жесткости [8].

Для снижения исходной вязкости связующих используют *растворители*. В качестве растворителей при формировании текстильных композиционных материалов применяют воду, ароматические и хлорированный углеводороды, спирты, простые и сложные эфиры. Основными показателями качества растворителей являются: растворяющая способность, или активность растворителя, скорость испарения, или летучесть, взрыво- и пожароопасность, степень токсичности.

Об активности растворителя судят по следующим показателям:

- по числу разбавления – количеству растворителя, после добавления которого в раствор полимер коагулирует или выпадает в осадок; активный растворитель отличается большим числом разбавления;
- по вязкости растворов с одинаковой концентрацией полимера, растворенного в различных растворителях; обычно, чем ниже вязкость, тем активнее растворитель;
- по осаждению полимера из разбавленного раствора при понижении температуры; чем ниже температура осаждения, тем активнее растворитель.

Витебский государственный технологический университет

Основные свойства промышленных растворителей приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Показатели физических свойств растворителей

Растворитель	Плотность при температуре 20 ^{0}С, кг/м^3	Температура, ^{0}С		Взрывоопасные концентрации, %	ПДК, мг/дм^3
		кипения	воспламенения		
Вода					
Ацетон	791	56.2	-17.8	2.55-12.8	0.2
Диметилформамид	944	153.2	67	2.3-15	0.01
Диоксан	1034	101.3	5	1.97-22.5	0.01
Дихлорэтан	1258	83.5	21.1	6.2-15.9	0.01
Толуол	866	110.6	4.4	1.27-6.75	0.05
Этанол	789	78.3	12.2	3.28-18.95	1
Хлорид углерода (IV)	1595	76.8	-	-	0.08
Этилацетат	901	77.1	-2.2	2.18-11.4	0.2

Для защиты текстильных композиционных материалов от старения в состав полимерной композиции вводят стабилизаторы. *Стабилизаторы* – это вещества, которые вводят в полимерные композиции с целью сохранения ценных технических свойств композиционных текстильных материалов. Принцип действия стабилизаторов основан на подавлении цепных процессов деструкции полимерных макромолекул под воздействием факторов старения. Стабилизаторы вводят в небольших количествах (0.01-2 % по массе) при получении основного связующего полимера. В качестве стабилизаторов используют ароматические амины, производные фенолов, высокодисперсные (коллоидные) металлы.

Сшивающие агенты вводят в состав полимерной композиции для сшивки макромолекул и превращения полимеров в неплавкие и нерастворимые вещества с целью придания композиционным текстильным материалам определенного комплекса потребительских и эксплуатационных свойств. В качестве сшивающих агентов используют вещества, участвующие в реакциях конденсации (гликоли, диамины, изоцианаты и др.), а также вещества, инициирующие процессы полимеризации (перекиси, нафтенаты и др.).

Порообразователи – вспенивающие вещества, применяемые для создания в полимерной композиции системы замкнутых или сообщающихся пор. При формировании текстильных композиционных материалов порообразователи применяют для создания различных декоративных эффектов на поверхности материала или изделия, а также с целью улучшения теплофизических свойств. В качестве порообразователей используют: твердые и жидкие вещества, которые

Витебский государственный технологический университет

разлагаются с выделением газа (N_2, CO_2, NH_3) при нагревании композиции; газы (воздух, CO_2, NH_3), которыми под давлением насыщают полимерную композицию; легкокипящие органические жидкости (пентан, изомеры гексана, гептана и др.), которые вспенивают композицию при ее нагревании до температуры кипения жидкости.

К *специальным компонентам* полимерной композиции относят вещества, придающие материалам такие свойства, как:

- уменьшение горючести, повышение устойчивости к действию высоких температур (антипирены);
- снижение статической электризации (антистатики);
- снижение биологической повреждаемости (антимикробные добавки);
- придание водо-, масло-, грязеотталкивания (гидро-, олеофобизаторы).

Вещества, наносимые на поверхность волокон или тканей с целью придания им специальных свойств, называют аппретами, а соответствующий способ модифицирования текстильных материалов – *аппретирование*.

Придание текстильным композиционным материалам специальных свойств – это комплекс химических и физико-химических воздействий на текстильный материал для улучшения его потребительских свойств, особенно эстетических (рисунок 2.3) [9].

Виды и способы придания специальных свойств выбираются в зависимости от сырьевого состава и назначения композиционного текстильного материала.

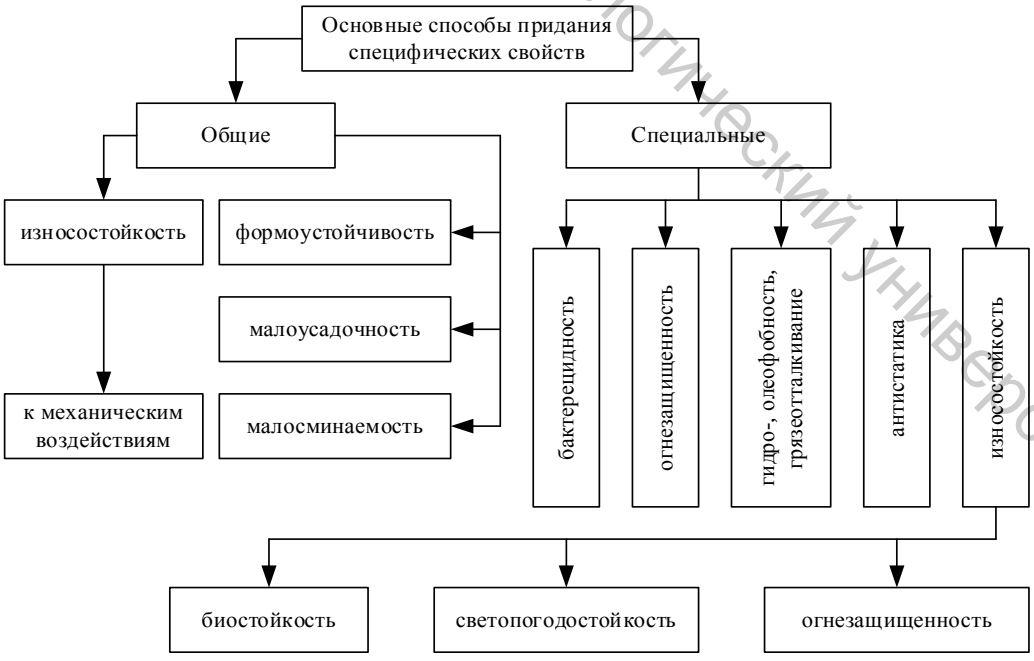


Рисунок 2.3 – Классификация способов придания специальных свойств композиционным материалам

Витебский государственный технологический университет

Характеристика некоторых видов специальной обработки представлена в таблице 2.7.

Например, для текстильных композиционных материалов, предназначенных для производства галантерейных изделий и верха обуви необходимо наличие таких свойств, как водо–, масло– и грязеотталкивание. Наличие данных свойств обеспечивается разнообразными способами, которые сводятся к образованию на внешней поверхности отдельных волокон пленки со значительно более низким поверхностным натяжением [10]. Образование данной пленки снижает значение удельного поверхностного электрического сопротивления. При этом важно, что система макропор (межволоконное пространство) остается незатронутой.

При разработке текстильных композиционных материалов способом импрегнирования тканой основы водной дисперсией стирол-акрилата в качестве специальной добавки для обеспечения водо–, масло–, грязеотталкивания использовался препарат фирмы «Clariant» (Швейцария) – «Nuva FHN», свойства которого представлены в таблице 2.8.

В качестве показателей, для оценки водо-, масло-, грязеотталкивания текстильных композиционных материалов, можно использовать угол смачивания (град) и пылеемкость (г/м^2*с).

Для определения угла смачивания рекомендуется специально разработанный экспресс–метод контроля гидрофобных водоотталкивающих пропиток текстильных материалов [11]. Сущность метода заключается в смачивании поверхности тестовой жидкостью и оценке краевого угла смачивания через определенное время.

Опытным путём подобрана тестовая жидкость, гарантированно смачивающая пробы с водоотталкиванием, в течение пяти минут. В качестве тестовой жидкости использовалась смесь этилового спирта и дистиллированной воды в определённой пропорции.

Значение краевого угла смачивания находим по формуле

$$\alpha_{см} = \frac{2r \cdot d}{\left(d^2 - h_к{}^2\right)}, \qquad (2.1)$$

где r – радиус капли, мм; d – диаметр капли, мм; $h_к$ – высота капли, мм.

Витебский государственный технологический университет

Таблица 2.7 – Характеристика некоторых видов специальной обработки текстильных композиционных материалов

Наименование специальной обработки	**Характеристика обработки**
Жесткая	Придание жесткости путем аппретирования водной дисперсией поливинилацетата, стирол-акрилата, поливиниловым спиртом с последующей сушки и термофиксацией
Малосминаемая (МС) и малоусадочная	Пропитка раствором предконденсатов (термореактивные смолы – карбамол, метазин и др.) с последующими сушкой, термообработкой, промывкой и сушкой. Недостаток – потеря прочности на 20 – 40 %. Пропитка раствором предконденсатов и эмульсией кремнеорганических соединений в присутствии катализаторов с последующей сушкой (без термообработки, промывки, повторной сушки)
«Стирай – носи»	Разновидность противосминаемой отделки. Заключается в пропитке раствором предконденсатов на основе карбамола, метазина
Водоотталкивающая	Покрытие гидрофобными эмульсиями (силиконы, хромолан, фтороганические соединения и др.), в результате чего улучшаются водоотталкивающие свойства при сохранении паро- и воздухопроницаемости
Водонепроницаемая	Сплошное покрытие изнаночной стороны ткани пленками из резиновой смеси или на базе синтетических смол
Антистатическая (АО)	Обработка поверхностно-активными веществами, снижающими поверхностное электрическое сопротивление (алкомон ОС–2, эпамин–06, тетрамон С)
Грязеотталкивающая	Обработка препаратами, обладающими одновременно водоупорностью и маслостойкостью
Противогнилостная	Обработка антисептическими веществами (соли хрома, меди, ртути, свинца, соединения меди, органические соединения – производные фенола, салициловой кислоты, серы)
Огнеупорная	Пропитка растворами аммонийных фосфорно-кислых солей магния и кремния, способных при нагревании выделять газы, препятствующие распространению пламени
Масло-, водоотталкивающая отделка	Цель маслоотталкивающей отделки – снизить способность волокнистых материалов поглощать грязь в виде жидких масел, а также в виде водных растворов суспензий и эмульсий различных веществ. Для маслоотталкивающей отделки применяются в основном фторсодержащие органические соединения, сообщающие текстильным материалам одновременно гидрофобные и олеофобные свойства

Витебский государственный технологический университет

Таблица 2.8 – Свойства препарата «Nuva FHN»

Наименование показателя	**Значение показателя**
1	**2**
Состав	дисперсия фтористого соединения
Внешний вид	жидкая, молочного вида дисперсия
Ионогенность	анионактивная
Уровень pH	около 6–8
Растворимость	смешивается с холодной водой в любом соотношении
Гриф	мягкий, гладкий гриф
Морозоустойчивость	неморозостойкий
Устойчивость к стирке и химической чистке	устойчив к стирке и химчистке

Для оценки грязеотталкивания текстильных композиционных материалов выбран показатель пылеёмкости [12]. Пылеёмкость характеризует способность композиционных текстильных материалов поглощать пыль и зависит от структуры полотна, толщины, шероховатости. Удерживаются частицы пыли в текстильном материале за счет механического сцепления с поверхностью волокна, а притягиваются благодаря наличию на них слоя статического электричества. Материалы с рыхлой структурой и с большей толщиной захватывают большее количество пыли и удерживают ее более длительное время, а, следовательно, такие материалы больше загрязняются.

Пылеёмкость текстильных композиционных материалов определялась с помощью бытовых пылесосов [13]. Для испытания из полотен вырезается элементарная проба определенного размера (в зависимости от типа пылесоса), измеряется ее площадь и закрепляется вместо фильтра в каркас пылесоса. После этого определяем массу пробы материала вместе с каркасом, а затем устанавливаем их в пылесос. Далее берем навеску пыли массой 10 г, состоящую из 50 % апатитовой и 50 % известковой пыли, равномерно распределяем ее на дне стеклянной чашки, площадь которой примерно равна 1500 $см^2$, и включаем пылесос. В течение 30 секунд пыль из чашки засасываем пылесосом. После этого вновь определяем массу пробы вместе с каркасом.

Пылеёмкость, г/($м^2$·с)

$$B = \frac{M}{S \cdot \tau}, \qquad (2.2)$$

где M – масса пыли, оставшейся в образце, г;

S – площадь образца, $м^2$;

τ – время всасывания, с.

Витебский государственный технологический университет

Проведены экспериментальные исследования по определению зависимости угла смачивания и пылеёмкости от концентрации «Nuva FHN» в полимерной композиции [14]. График зависимости угла смачивания и пылеемкостиот концентрации «Nuva FHN» в составе полимерной композиции представлен на рисунках 2.4, 2.5.

$$\alpha_{см} = 9{,}96 \cdot \ln(X) + 60{,}14.$$

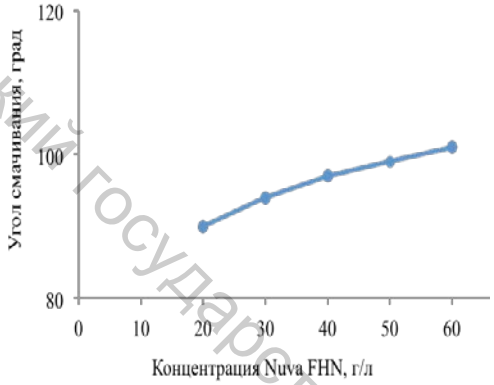


Рисунок 2.4 – Зависимость угла смачивания от концентрации водо-,масло-, грязеотталкивающей добавки

$$B = 0{,}0000002 \cdot X^4 - 0{,}00003 \cdot X^3 + 0{,}0011 \cdot X$$
$$0{,}0183 \cdot X + 0{,}54;$$

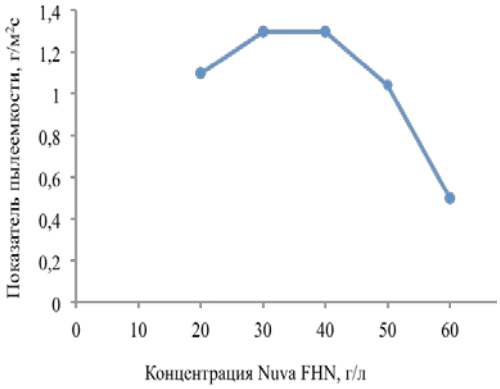


Рисунок 2.5 – Зависимость показателя пылеёмкости от концентрации водо-, масло-, грязеотталкивающей добавки

Как видно из графической зависимости, поверхность композиционного материала уже при концентрации аппретирующего состава 20 г/л становится несмачиваемой, т. к. $\alpha_{см} > 90°$.

Графическая зависимость показателя пылеемкости от концентрации добавки (рисунок 2.5) имеет экстремальный характер. При концентрации добавки до 40 г/л происходит увеличение показателя пылеёмкости. Это связано с тем, что на поверхности текстильного композиционного материала не закончилось структурообразование плёнки и частицы пыли накапливаются в её порах. При дальнейшем увеличении концентрации «Nuva FHN» в растворе эти свойства снижаются. При концентрации аппрета 40 г/л на поверхности композита образуется гладкая, упругая, нелипкая плёнка, сглаживающая поверхность и препятствующая отложению загрязнений и проникновению их внутрь.

Таким образом, согласно вышепредставленным результатам установлено, что при увеличении концентрации «Nuva FHN» улучшаются водо-, масло-, грязеотталкивание КТМ, что характеризуется увеличением угла смачивания и уменьшением показателя пылеёмкости. Однако следует отметить, что увеличение концентрации «Nuva FHN» выше 50 г/л приводит к утолщению

Витебский государственный технологический университет

полимерной плёнки в межволокнистом пространстве, что может снизить показатель воздухопроницаемости.

При формировании синтетических волокнистых плит, используемых в качестве теплоизоляционного материала, в качестве добавки для повышения гидрофобных свойств (уменьшение разбухания) используется парафиновая эмульсия, ее концентрация в связующем варьируется от 5 до 15 % (рисунок 2.6).

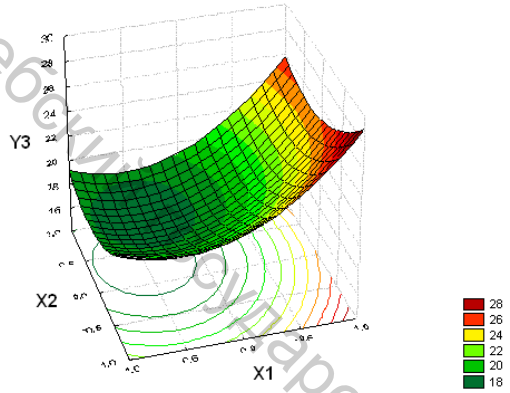


Рисунок 2.6 – Зависимость разбухания У3 СВП-М от % содержания смолы Х1 и парафиновой эмульсии Х2

Как видно из представленной графической зависимости, при увеличении процентного содержания парафиновой эмульсии (Х2) имеется тенденция к уменьшению разбухания (Y3). Однако использование в составе композиции данного раствора свыше 10 % нецелесообразно, так как физико-механические показатели (плотность, прочность при изгибе, разбухание) меняются незначительно.

Для текстильных композиционных материалов, предназначенных для декоративной отделки помещений и корпусной мебели, необходимо наличие такого показателя, как огне-, термостойкость [15].

Для проведения экспериментальных исследований по приданию текстильным композитам огне-, термостойкости выбрано органическое фосфорное соединение фирмы «Clariant» (Швейцария) «Pekoflam DPN–1», свойства которого представлены в таблице 2.9.

С применением данного препарата в условиях Научно–исследовательского центра Витебского областного управления МЧС Республики Беларусь проведены исследования по определению кислородного индекса, коэффициента дымообразования и воспламеняемости композиционного материала после импрегнирования (рисунки 2.7, 2.8, 2.9).

Кислородный индекс – минимальное содержание кислорода в кислородно–азотной смеси, при котором возможно свечеобразное горение материала в условиях специальных испытаний.

Коэффициент дымообразования – показатель, характеризующий оптическую плотность дыма, образующегося при пламенном горении или термоокислительной деструкции (тлении) определенного количества твердого вещества (материала) в условиях специальных испытаний.

Витебский государственный технологический университет

Таблица 2.9 – Свойства препарата «Pekoflam DPN–1»

Наименование показателя	Значение показателя
Состав	органическое фосфорное соединение
Внешний вид	прозрачная, бесцветная
Ионогенность	слегка катионный в кислой среде
Уровень pH	4.5–6.5
Растворимость	растворяется водой в любом соотношении
Влияние на цвет материала	в зависимости от класса красителя возможны незначительные изменения в оттенке и цвете
Совместимость с другими химикатами	неионогенными продуктами – очень хорошая катионными продуктами – очень хорошая анионными продуктами – рекомендуются предварительные испытания
Устойчивость к стирке и химической чистке	устойчив к стирке и химчистке

Витебский государственный технологический университет

$$K = -0{,}000001 \cdot X^2 + 0{,}016 \cdot X + 27{,}9.$$

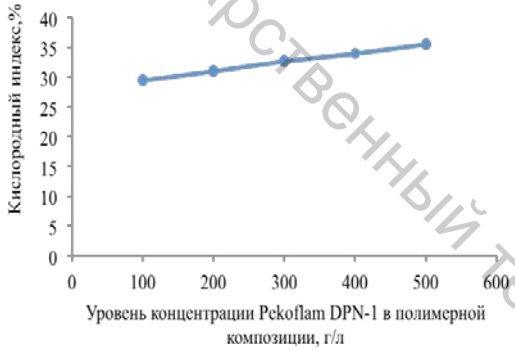


Рисунок 2.7 – Зависимость кислородного индекса от концентрации антипирена

$$D = -0{,}00005 \cdot X^2 - 0{,}032 \cdot X + 290{,}26.$$

Рисунок 2.8 – Зависимость коэффициента дымообразования от концентрации антипирена

$$S = 0{,}00005 \cdot X^2 - 0{,}025 \cdot X + 44.$$

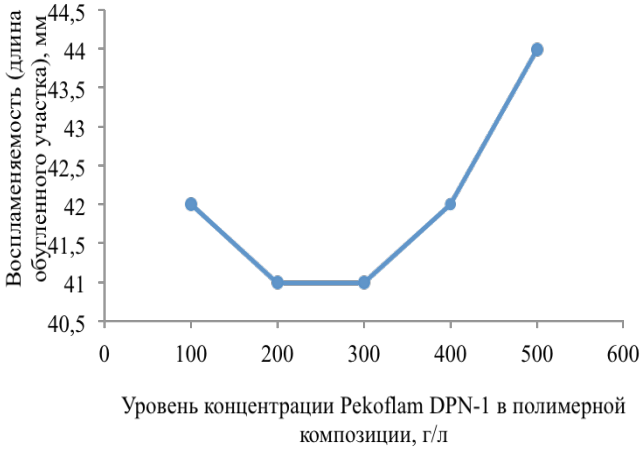


Рисунок 2.9 – Зависимость воспламеняемости от концентрации

Таким образом, при получении текстильных композиционных материалов для декоративной отделки помещений и корпусной мебели рекомендуется в состав полимерной композиции вводить специальные добавки (антипирены), повышающие огне–, термостойкость готового материала.

2.2.2 Требования, предъявляемые к связующим, используемым для формирования текстильных композиционных материалов

Физико-механические и технологические свойства связующих должны позволять получать композиционные текстильные материалы прочные, легкие, малоэнергоемкие, технологичные. Связующее должно обладать *малой вязкостью и высокой адгезионной способностью к текстильному материалу, хорошими когезионными свойствами.* Малая вязкость необходима для того, чтобы связующее могло проникнуть и склеить между собой волокна и после отверждения получилась монолитная система. Выбранный тип связующего должен обеспечить легкость и простоту технологического формирования текстильного композиционного материала. После полимеризации (отвердевания) оно должно иметь монолитную структуру и обеспечить передачу внешних усилий к волокнам. Связующее должно обладать высокой адгезионной прочностью к волокнам. Для повышения адгезионной прочности волокна иногда покрывают очень тонким слоем специальных аппретов. Специальные аппреты не только обеспечивают высокую адгезионную прочность между связующим и волокнами, но и снижают внутренние напряжения на границе волокно – матрица, возникшие из-за разности коэффициентов линейного расширения. При малой когезионной прочности связующего в условиях эксплуатации материала будет происходить когезионное разрушение частиц связующего. От связующего в значительной степени зависят такие свойства композиционных материалов, как теплостойкость, влагостойкость, длительная прочность, стойкость к действию внешних факторов и агрессивных сред.

Пропитанный связующим текстильный каркас при формировании обычно подвергается действию значительного давления. Важно, чтобы пузырьки воздуха или технологического газа – носителя связующего – не задерживались в композите. Поскольку для достижения высоких механических характеристик объемное соотношение армирующего материала и полимерной матрицы в текстильных композитах должно составлять около 70/30, важно иметь способ удаления избытка связующего, введенного при пропитке. После получения требуемой степени пропитки полимерное связующее отверждается. Отверждение происходит при нормальной или повышенной температуре в одну или несколько стадий в зависимости от вида текстильного материала, типа связующего, способа формирования композита, необходимой скорости отверждения, степени отверждения и требований к свойствам конечного продукта. Отверждение при высокой температуре увеличивает термостойкость матрицы и композита, однако при этом возрастает их хрупкость.

При формировании слоистых текстильных композитов в качестве

Витебский государственный технологический университет

связующего используется синтетические клеи, способные соединять текстильные компоненты благодаря образованию между соединяемыми поверхностями клеевой прослойки прочных адгезионных связей.

Основные требования, предъявляемые к клеевой композиции при формировании многослойных текстильных материалов, следующие:

- должна обладать высокой адгезией к текстильным компонентам и другим поверхностям, используемых в качестве слоев;
- скорость высыхания на воздухе должна соответствовать продолжительности операций приготовления и нанесения, быть достаточно высокой при сушке в термокамерах;
- не должна проникать на поверхность текстильных компонентов, не загрязнять ни одну из сторон;
- должна обеспечивать жесткость и необходимую упругость, сохраняя при этом мягкость и эластичность;
- добавки, содержащиеся в клеевой композиции, не должны изменять свойств композиционного материала;
- клеевая пленка должна быть стойкой к действию воды, органических растворителей.

2.2.3 Свойства связующих

В зависимости от способа формирования текстильных композиционных материалов используют расплавы, растворы или дисперсии полимеров. Расплав – состояние полимера при температуре выше температуры его плавления (для кристаллических полимеров), стеклования (для аморфных полимеров). Раствор или дисперсия полимера образуется при добавлении маловязкой жидкости, представляют собой многокомпонентные системы, в которых компоненты находятся в диспергированном состоянии. Истинные растворы, в которых компоненты оказываются диспергированными до отдельных молекул, атомов, ионов. Полимерные дисперсии образованы низкомолекулярными веществами, формирующими непрерывную фазу, и частицами полимерной природы с характерным размером от 1 нм до 1 мкм. Растворы и дисперсии полимеров используют при формировании текстильных композитов способом пропитки или проклеивания, когда необходимо наносить очень тонкие слои полимера.

Важное значение при формировании текстильных композиционных материалов имеет равномерное распределение матрицы (связующего) между частицами армирующего текстильного компонента, обеспечивающее монолитность композита и адгезионную прочность. Равномерное распределение связующего зависит от смачиваемости текстильных компонентов связующим, вязкости связующего и его поверхностной энергии, а также адгезионной активности.

Смачивание – растекание жидкостей по поверхности твердых или жидких сред под влиянием сил поверхностного натяжения. Мерой

Витебский государственный технологический университет

смачивания является краевой угол между смачиваемой поверхностью твердого тела и касательной к поверхности жидкости на границе смачивания (рисунок 2.10): $\cos\theta = (\sigma_{тг} - \sigma_{тж}) / \sigma_{жг}$, где$\sigma_{тг}$, $\sigma_{тж}$, $\sigma_{жг}$, поверхностное натяжение на границе раздела жидкость – газ, твердое тело – жидкость, жидкость и твердое тело – газ.

Рисунок 2.10 – Растекание капли жидкости по поверхности твердого тела

По полиофильной (хорошо смачиваемой) поверхности твердого тела жидкость растекается, то есть имеет место частичное ($0 < \theta < 90^0$) или полное ($\theta \to 0$) смачивание. По лиофобной (плохо смачиваемой) поверхности растекания не происходит ($\theta > 90^0$).

Основными факторами, определяющими смачивание полимерной композицией текстильного материала, являются поверхностное натяжение связующего, равновесный краевой угол смачивания, а также особенности строения и структуры текстильного материала.

Поверхностное натяжение (или характеризующий его краевой угол смачивания) играет важную роль в капиллярных явлениях – процессах капиллярного движения жидкости и капиллярной конденсации паров. Поверхностное натяжение жидкости, как и другие ее свойства, связанные с тепловым движением молекул, зависит от температуры: с ее повышением увеличивается интенсивность теплового движения молекул, вследствие чего межмолекулярные силы ослабляются, и поверхностное натяжение падает приближенно по прямолинейному закону.

Определять краевой угол непосредственно на текстильных материалах затруднительно из-за шероховатости их поверхности и быстрого впитывания жидкости в волокнистую систему. Существующие методики не позволяют точно определить краевой угол на поверхности ткани, поэтому целесообразно использовать значение краевого угла, которое экспериментально определяется для эталонного капилляра известного радиуса R.

Максимальный капиллярный подъем и поверхностное натяжение находятся в прямой зависимости. Это следует из уравнения Жюрена [16], которое имеет вид

Витебский государственный технологический университет

$$h_{max} = \frac{2\sigma \cdot \cos\theta}{R \cdot g \cdot \rho}, \qquad (2.3)$$

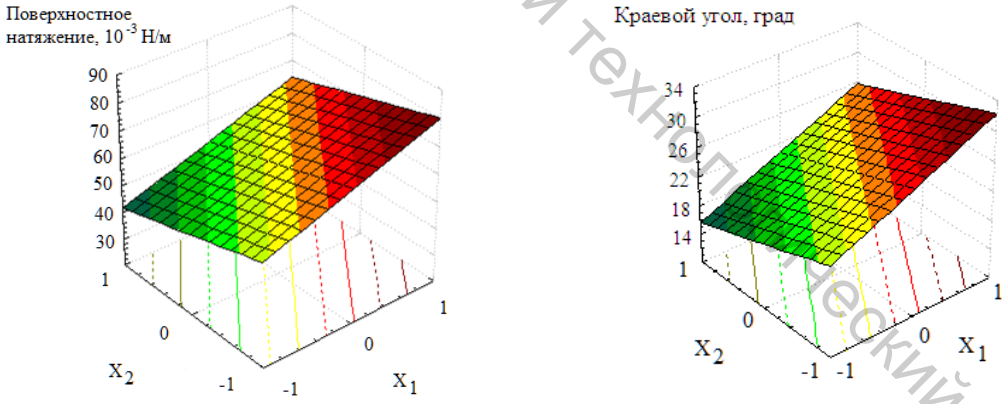
где h_{max} – максимальная высота капиллярного подъема, м.

Из уравнения (2.3) определяется величина краевого угла по формуле

$$\cos\theta = \frac{h_{max} \cdot R \cdot g \cdot \rho}{2\sigma}. \qquad (2.4)$$

Результаты экспериментальных исследований зависимости поверхностного натяжения и краевого угла смачивания водной дисперсии стирол-акрилата от концентрации и температуры приведены на рисунке 2.11. Для определения поверхностного натяжения использовали сталагмометрический метод, который основан на определении веса капли, отрывающейся под действием силы тяжести от плоской поверхности торцевого среза капилляра [17].

$Y_1 = 58{,}067 + 0{,}054 \cdot X_1 - 0{,}500 \cdot X_2;$ $Y_2 = 21{,}00 + 0{,}03 \cdot X_1 - 0{,}20 \cdot X_2;$



Наименование фактора	Обозначение	Уровни варьирования			Интервал варьирования
		-1	0	+1	
Концентрация стирол-акрилата, г/л	X_1	100	300	500	200
Температура дисперсии, °С	X_2	20	40	60	20

Рисунок 2.11 – Зависимость поверхностного натяжения (Y_1) и краевого угла (Y_2) водной дисперсии стирол-акрилата от концентрации (X_1) и температуры импрегнирования (X_2)

Витебский государственный технологический университет

Как видно, для водной дисперсии стирол-акрилата поверхностное натяжение и краевой угол смачивания линейно уменьшаются при увеличении температуры, а увеличение концентрации полимерной дисперсии приводит к повышению поверхностного натяжения и краевого угла смачивания.

В наших исследованиях процесса формирования текстильного композиционного материала способом пропитки тканой основы при уменьшении поверхностного натяжения и краевого угла смачивающая способность водной дисперсии стирол-акрилата возрастает. Однако не всегда присутствует такая корреляция между краевым углом и поверхностным натяжением [18]. При исследовании смачивающей способности хлоропреновых латексов установлено, что при сравнительно высоком поверхностном натяжении, краевой угол смачивания хлопчатобумажного волокна этими латексами имеет значение много меньше 90 ^{0}, что говорит о хорошей смачивающей способности.

Для увеличения смачивающей способности и снижения поверхностного натяжения полимерных дисперсий рекомендуется вводить в состав композиции эмульгаторы. При наличии в полимерных дисперсиях поверхностно-активных веществ повышение температуры может приводить не к понижению поверхностного натяжения, а наоборот, к его повышению. Это объясняется десорбцией поверхностно – активных веществ при нагреве с поверхности дисперсия – воздух.

Влияние на смачиваемость природы и свойств текстильного компонента будет рассмотрена ниже.

Вязкость полимерной композиции – фактор, в значительной мере влияющий на свойства готового композиционного текстильного материала. Полимерные связующие относятся к неньютоновским жидкостям и в зависимости от своих свойств могут представлять собой псевдопластичные или пластичные жидкости. Величина их динамической вязкости η определяется из отношения напряжения сдвига τ к скорости сдвига γ_c:

$$\eta = \tau / \gamma_c (\text{Па*с}).$$

Для ньютоновских жидкостей вязкость не зависит от скорости деформации, для полимеров, вязкость которых составляет 10^6-10^{13} Па*с, ее значение увеличивается при увеличении скорости сдвига. Это свойство имеет важное техническое значение, поскольку позволяет регулировать многие технологические процессы формирования текстильных композитов.

Вязкость является важнейшей характеристикой при использовании в качестве связующего термопластичных полимеров (расплавов). Вязкость расплавов полимеров зависит от химической природы

Витебский государственный технологический университет

полимера, температуры, молекулярно-массового распределения, наличия добавок и т. п. Поэтому при выборе оптимальных параметров формирования текстильного композита из расплава полимера определяющее значение имеет правильный выбор температурной области и пределов, до которых можно интенсифицировать процесс. Нижняя граница допустимой области температуры при формировании композиционного текстильного материала с использованием термопластов определяется температурой текучести для аморфных полимеров и температурой плавления для кристаллических, когда течение становится доминирующей составляющей полной деформации. Верхняя граница области допустимой температуры определяется термостабильностью полимерной композиции, т. е. температурой ее химического разложения. Это зависит от химического строения полимера и состава композиции.

Расплавы очень технологичны и удобны в применении при формировании слоистых текстильных композитов клеевым способом. Однако необходимо осуществлять тщательный контроль вязкости полимерного связующего. Применение низковязкого состава приводит к выдавливанию его из зоны склеивания и образованию несплошной полимерной пленки, что снижает прочность соединения слоев. Применение высоковязкого адгезива затрудняет проникание в структуру текстильного материала. Снижается площадь межфазного контакта, в результате чего прочность соединения уменьшается. Кроме того, в случае применения высоковязкого связующего невозможно получить тонкий слой полимера (пленку).

От вязкости связующего зависит также площадь фактического контакта адгезива с субстратом и, следовательно, степень взаимодействия функциональных групп поверхности контакта, ответственных за адгезионную прочность.

Растворы и дисперсии полимеров получают путем добавления к полимеру (вязкость 10^6–10^{13} Па·с) низкомолекулярной маловязкой жидкости (вязкость 0.001 Па·с). При этом вязкость раствора полимера значительно (13 – 15 десятичных порядков) изменяется при изменении концентрации раствора. Абсолютные значения ньютоновской вязкости растворов и дисперсий полимеров с повышением температуры уменьшаются, то есть наблюдается та же картина, что и у низкомолекулярных жидкостей, что обычно связывают с изменением структуры жидкости, происходящим под влиянием теплового движения. Рабочий температурный диапазон для полимерных дисперсий определяется важным свойством – агрегативной устойчивостью, то есть способностью в рабочем интервале температур не изменять своего состава и свойств.

При исследовании зависимости вязкости водной дисперсии стирол-акрилата от температуры и концентрации (рисунок 2.12) установлено,

Витебский государственный технологический университет

что с увеличением температуры и понижением концентрации вязкость полимерной композиции уменьшается. Однако для более концентрированной дисперсии влияние температуры в исследуемом диапазоне незначительно, что можно объяснить усилением взаимодействия между макромолекулами полимера (таблица 2.10).

При формировании текстильного композиционного материала способом импрегнирования тканой основы дисперсией стирол-акрилата скорость пропитки значительно уменьшается при увеличении концентрации полимерной композиции. Поэтому при необходимости использования концентрированных полимерных композиций на базе стирол-акрилата необходимо повышать температуру плюсовочной ванны, но не более 60 ^{0}C, так как далее происходит астабилизация дисперсии, коагуляция частиц дисперсии между собой.

$$Y_3 = 1{,}549 - 0{,}004 \cdot X_1 - 0{,}024 \cdot X_2 .$$

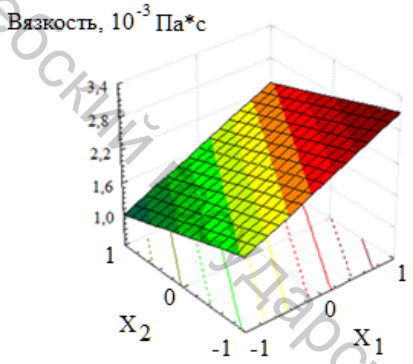


Рисунок 2.12 – Зависимость вязкости дисперсии полимера от концентрации (X_1) и температуры (X_2)

Таблица 2.10 – Результаты определения вязкости водной дисперсии стирол-акрилата

Показания вискозиметра*					
Концентрация аппрета, г/л					
100		200		500	
Температура, °C	Время истечения, с	Температура, °C	Время истечения, с	Температура, C^0	Время истечения, с
20	31,2	18	36,3	20	59
23	22,3	34	33,5	25	59
25	20,5	39	32,3	27	60
27,5	18	46	30,4	32	61
29,5	17,4	48	29	32	62
32	16,4	51	27,5	34	62
35,5	15,9	58	25,6	37	60
37	15,5	58	24,6	38	62
38	15,5	58,5	24,2	40	61
40,5	15,4	59	23,4	44	61
44	15,0	60	21,8	49	63
48	14,9	60	20,8	52	63
52	14,9	60	19,8	55	63

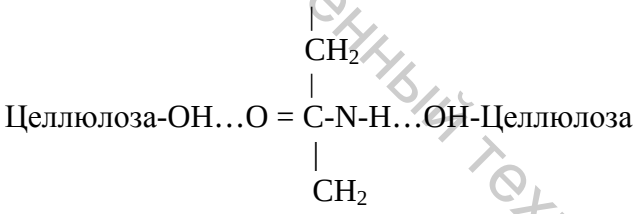
* Вязкость исследуемой дисперсии стирол-акрилата определяли с помощью капиллярного вискозиметра ВПЖ–3, измерения проводились в термостате при постоянной температуре.

Витебский государственный технологический университет

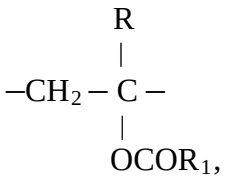
Адгезионная активность связующего зависит от химической природы основного полимера. От адгезионной активности полимерной композиции зависят усилия, необходимые для адгезионного контакта при формировании композиционных текстильных материалов. С точки зрения химической теории адгезии [19] адгезионная активность связующего зависит от наличия в полимере атомов и групп атомов, способных образовывать физические и химические связи с текстильным материалом.

Например, полимерные композиции на основе полиэтилена не содержат в своем составе реакционных групп. При межфазном взаимодействии реализуются межмолекулярные силы, а энергия возможной водородной связи невелика.

Полиамидные связующие имеют высокую адгезионную активность к текстильным материалам, что может являться результатом образования координационной связи между атомами азота группы –NH–CO– и атомами макромолекул приповерхностных слоев. Взаимодействие происходит по следующей схеме:



Полиакрилаты имеют в своей структуре полярные карбоксильные группы, которые усиливают адгезионную активность:



где R и R_1 водород или алкильный радикал.

Экспериментально установлено, что большинство полимеров, имеющих в своем составе полярные группы, обладают хорошими адгезионными свойствами. Для приближенного качественного суждения об адгезии различных полимеров могут быть использованы дипольные моменты исходных мономеров [20] (таблица 2.11).

Чем активнее основной полимер связующего, тем меньше требуется усилие для формирования адгезионного контакта.

Витебский государственный технологический университет

Таблица 2.11 – Зависимость адгезионных свойств некоторых полимеров от величины дипольного момента мономера

Исходный мономер			Адгезионные свойства полимера
Название	Строение	Дипольный момент, Д	
Этилен	$CH_2=CH_2$	0	отсутствуют
Изобутилен	$CH_2=C(CH_3)_2$	0,49	очень слабо выражены
Изопрен	$CH_2=CH-C(CH_3)=CH_2$	0,38	хорошие
Стирол	$C_6H_5-CH=CH_2$	1,37	слабо выражены
Винилхлорид	$CH_2=CHCl$	1,44	удовлетворительные
Хлоропрен	$CH_2=CH-CCl=CH_2$	1,42	хорошие
Винилацетат	$CH_2=CH-O-C(=O)-CH_3$	1,72	хорошие

Для сравнения адгезионной активности связующих был исследован процесс формирования слоистых текстильных композитов из льняной ткани и нетканого полотна (флизелин) [8]. Результаты исследования представлены в таблице 2.12.

Таблица 2.12 – Условия формирования слоистого текстильного композита

Характеристика	Вид связующего		
	полиэтилен	полиамид	полиэфир
Температура соединения слоев, ^0C	165-175	130-160	150-170
Усилие сжатия, кПа	1.5-4.0	0.2-0.4	0.3-0.5
Продолжительность сжатия, с	14-18	10-15	12-15

Наименее чувствительным к прикладываемым усилиям является связующее на основе полиэтилена: режим получения прочного соединения льняной ткани с нетканым полотном отличают самые высокие показатели усилия сжатия, температуры и продолжительности. Полиамидное связующее, наоборот, образует прочное соединение при минимальной температуре и усилии сжатия.

Адгезионные свойства полимеров зависят также от величины прочности связей между его молекулами (*когезионная прочность*). Эти величины, в свою очередь, связаны со структурой и природой групп, входящих в их состав (таблица 2.13).

Витебский государственный технологический университет

Установлено, что макромолекулы, содержащие группы атомов с величиной энергии когезии менее 5,0 ккал/моль, не обладают достаточной адгезией к полярным поверхностям. Это объясняет, почему, например, простые виниловые эфиры и полиизобутилен являются непрочными связующими, а поливинилацетаты, эпоксиды, фенолформальдегидные смолы, полиуретаны и др. – хорошими.

Для термопластичных связующих развитие когезии происходит физическим способом в процессе его затвердевания. Усилие (давление) при формировании текстильного композита позволяет улучшить когезионную прочность связующего. Если связующее представляет собой раствор, то процесс формирования происходит при испарении растворителя.

Для термореактивных связующих процесс образования сшитого полимера происходит непосредственно в процессе формирования. В состав связующего входят различные материалы: олигомер, отвердитель, пластификатор. Часто для отверждения используют нагрев. При этом действует химический механизм отверждения.

Таблица 2.13 – Молярная когезия полимеров

Полимер	Структура звена	Молярная энергия когезии отрезка цепи длиной в 5А, ккал/моль
Полиэтилен	$-CH_2-CH_2-$	1,0
Полиизобутен	$-CH_2-\underset{\displaystyle CH_3}{\overset{\displaystyle CH_3}{C}}-$	1,2
Полибутадиен	$-CH_2-CH=CH-CH_2-$	1,1
Полистирол	$-CH(C_6H_5)-CH_2-$	2,0
Поливинилхлорид	$-CH_2-CHCl-$	2,6
Поливинилацетат	$-CH_2-CH(OC(=O)CH_3)-$	3,2
Поливиниловый спирт	$-CH_2-CH(OH)-$	4,2
Полиамиды	$-C(=O)-(CH_2)_m-C(=O)-NH-(CH_2)_n-NH-$	5,8

Витебский государственный технологический университет

2.2.4 Рекомендуемые рецептуры связующих для формирования текстильных композитов

Связующая композиция для формирования органо-синтетических волокнистых плит

При производстве органо-синтетических волокнистых плит классов эмиссии формальдегида El, E2, используемых в качестве теплоизоляционного материала, в состав связующего входит карбамидоформальдегидная смола КФ-НФП, вода, парафиновая эмульсия, крахмальный клейстер, отвердитель.

Парафиновая эмульсия используется для повышения водостойкости – гидрофобная добавка. Технологический процесс приготовления парафиновой эмульсии включает следующие операции: дозирование компонентов и загрузка их в эмульгатор; плавление и загрузка парафина; эмульгирование; охлаждение.

Дозирование компонентов производится весовым способом по следующей рецептуре: парафин технический 22 м.ч., мыло хозяйственное или стеарин 1 м.ч., вода 77 м.ч.

Смешивание компонентов производится в баке-эмульгаторе. В бак заливается горячая вода температурой 80 – 95 °С, вводится хозяйственное мыло. Смесь перемешивается в течение 2 – 3 мин. При непрерывно работающей мешалке в эмульгатор вливается расплавленный парафин. Температура разогретого парафина 80 – 90 °С. Эмульгирование продолжается в течение 30 мин до образования однородной эмульсии белого цвета при температуре 80 – 90 °С.

Готовая эмульсия имеет молочно-белый цвет. Вязкость по ВЗ-4 должна быть 11 – 15 с, концентрация эмульсии составляет 20 ± 2 %, РН – 6 – 7,5 , устойчивость – не менее 94 % за 24 часа, удельный вес – 0,93 – 0,98 г/см^3.

Для отверждения карбамидоформальдегидного связующего внутреннего слоя используется отвердитель. Комбинированный отвердитель снижает содержание формальдегида за счет того, что в его состав входит карбамид, который связывает свободный формальдегид.

Состав комбинированного отвердителя: карбамид – 165 м.ч.; сульфат аммония – 90 м.ч.; вода – 145 м.ч.

Для определения оптимального состава связующего проведены экспериментальные исследования зависимости основных физико-механических показателей плит от процентного содержания в составе раствора фенолформальдегидной смолы и парафиновой эмульсии [21].

В качестве входных параметров были приняты: содержание фенолформальдегидной смолы X_1, %; содержание раствора парафиновой эмульсии X_2, %. Исследуемыми параметрами являлись физико-механические свойства СВП-М: плотность материала Y_1, кг/м^3; предел прочности при изгибе Y_2, МПа; разбухание Y_3, %. Полученные

Витебский государственный технологический университет

математические модели и графические зависимости представлены на рисунках 2.13 – 2.15.

Анализируя полученные модели, можно сделать вывод о том, что плотность материала (Y_1) и прочность при изгибе (Y_2) повышаются при увеличении процентного содержания раствора фенолформальдегидной смолы (X_1), так как увеличивается количество связываемых смолой волокон, однако до определенного предела. Это объясняется тем, что увеличение содержания смолы ведет также к увеличению неравномерности ее распределения в составе композиции.

$Y_1=403,5+2,58X_1+0,95X_2-0,41X_1^2-0,55X_1^2X_2$

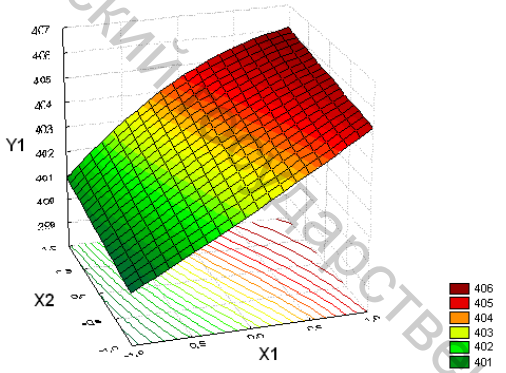


Рисунок 2.13 – Зависимость плотности $У_1$ от % содержания смолы X_1 и парафиновой эмульсии X_2

$Y_2=2,06+0,28X_1+0,06X_2-0,06X_1X_2-0,23X_1^2$

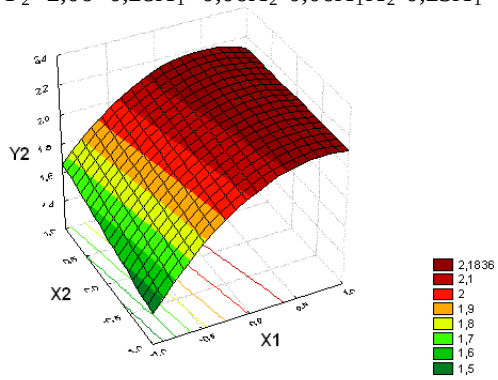


Рисунок 2.14 – Зависимость прочности при изгибе $У_2$ от % содержания смолы X_1 и парафиновой эмульсии X_2

$Y_3=18,44-1,66X_1-3,33X_2+2,33X_1^2+3,33X_2^2$

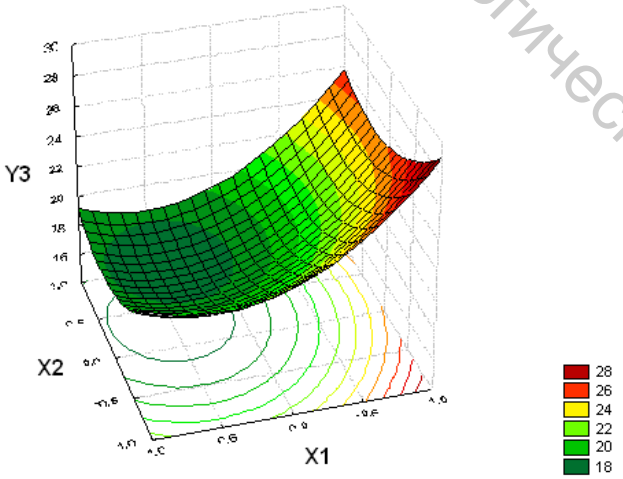


Рисунок 2.15 – Зависимость разбухания $У_3$ от % содержания смолы X_1 и парафиновой эмульсии X_2

Вследствие чего увеличивается хрупкость готового материала, а следовательно – прочность при изгибе снижается. В результате анализа видно, что в зависимости от требуемых показателей качества, органо-

ВитебскийГосударственныйТехнологическийУниверситет

синтетические волокнистые плиты следует вырабатывать с определенным сочетанием содержания компонентов связующего. Для большинства потребителей органо-синтетических плит основным показателем качества является разбухание, значение которого должно быть минимальным. Для этой цели оптимальным является следующий состав:

- содержание фенолформальдегидной смолы 1 % ;
- содержание парафиновой эмульсии 11,5 %;
- содержание отвердителя 10-12 % от массы смолы.

Основные показатели связующего для органо-синтетических плит классов эмиссии формальдегида El, E2 представлены в таблице 2.14.

Таблица 2.14 – Основные показатели связующего для СВП-М

Наименование показателей	Значения показателей
Содержание сухих веществ, %	58 – 62
Вязкость по ВЗ-4, с	17 – 27
Удельный вес, гр/см^3	1,210 – 1,228
Время желатинизации при 100 °С, с	35 – 70
Жизнеспособность, час при 20 °С не менее	8

Связующая композиция для формирования слоистого текстильного материала

Нами была исследована полимерная композиция для формирования слоистого текстильного материала, используемого в качестве текстильных настенных покрытий.

В качестве основных компонентов выбраны поливиниловый спирт (ПВС) и поливинилацетатная дисперсия (ПВА). При определении оптимального состава связующего для соединения текстильного полотна и флизелиновой (бумажной) основы в качестве основополагающих показателей выбраны: жесткость готового дуплексного полотна, внешний вид материалов после склеивания и наличие необходимого уровня прочности клеевого соединения.

Характеристики показателей жесткости и прочности клеевых соединений представлены на рисунке 2.16.

По результатам проведенных исследований установлено, что при использовании поливинилацетатной дисперсии соединение ткани и полотна основы менее прочное, чем при использовании поливинилового спирта, а показатель жесткости у него ниже.

Витебский государственный технологический университет

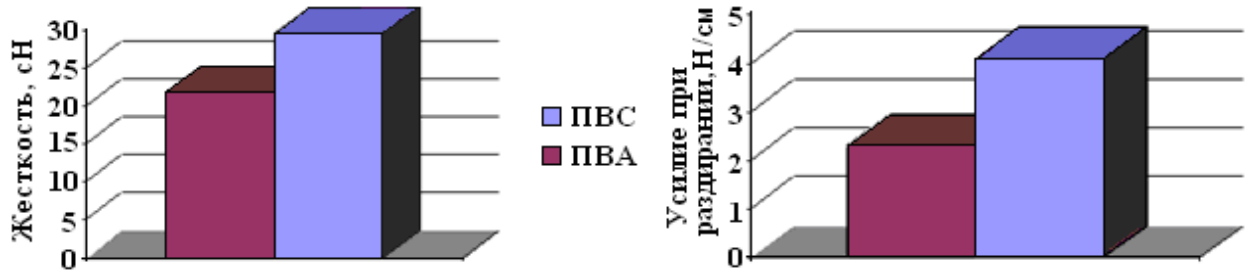


Рисунок 2.16 – Изменение жесткости и прочности клеевого соединения образцов дуплексных материалов в зависимости от состава связующего

Таким образом, необходимо подбирать оптимальное соотношение поливинилового спирта и поливинилацетатной дисперсии, позволяющее обеспечить высокую прочность при низкой жесткости клеевого соединения.

Выбор оптимальной концентрации поливинилового спирта позволит сохранить прочность готовых слоистых текстильных композитов при меньшем содержании поливинилацетатной дисперсии, поскольку она наиболее дорогостоящая. Для этого выбраны следующие составы ПВС: 7 % ПВС ; 10 % ПВС; 13 % ПВС.

Характеристики показателей жесткости и прочности полученных клеевых соединений представлены в таблице 2.15.

Таблица 2.15 – Результаты эксперимента по определению оптимальной концентрации ПВС

Концентрация клея ПВС, %	Усилие при раздирании, Н/см	Жесткость образца, сН
7	3,2	22,8
10	3,5	23,4
13	3,7	24,7

При добавлении ПВА, за счет уменьшения количества ПВС, происходит падение вязкости и, как следствие, снижение первичной адгезии клеевого раствора [22, 23]. Чтобы сохранить вязкость связующего с большим содержанием ПВА, необходимо снизить количество воды в ПВС. При определении оптимального состава связующего изучалось влияние изменения содержания ПВС. Полученные результаты представлены на рисунке 2.17.

По результатам данных исследований выбрано связующее следующего состав: 60 % поливинилацетатной дисперсии и 40 % поливинилового спирта.

При изучении внешнего вида материалов после склеивания было установлено, что проступание клея на поверхности материалов не наблюдается.

Витебский государственный технологический университет

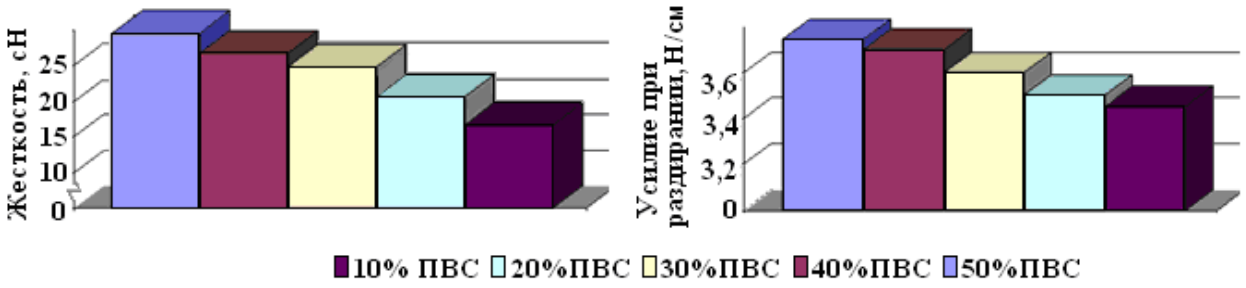


Рисунок 2.17 – Изменение жесткости и прочности образцов дуплексных материалов в зависимости от процентного содержания ПВС

Исходя из требований к жесткости и уровню прочности клеевого соединения, по итогам экспериментальных исследований по введению пластификатора выбран следующий состав связующего:

- содержание поливинилацетатной дисперсии 55 % ;
- содержание поливинилового спирта 30 %;
- содержание пластифицирующих добавок (глицерина или этиленгликоля) 15 %.

При использовании в качестве связующего поливинилового спирта приготовление клеевого состава в производственных условиях осуществляется по следующему режиму.

В реактор емкостью 1600 м^3 заливается 1350,0 ± 10,0 л воды с 20,0 ± 5,0 ^{0}С. При закрытом угловом вентиле в реактор подается пар для нагрева воды до 30,0 – 35,0 ^{0}С. По достижению указанной температуры в реактор медленно, небольшими порциями, во избежание образования комков, засыпается 95,0 ± 1,0 кг сухого ПВС.

Нагревание воды с поливиниловым спиртом продолжается до достижения температуры 90,0 ± 2,0 ^{0}С (продолжительность нагревания 1 час).

Затем в реактор вводится 40 мл пеногасителя и осуществляется варка клея в течение 1 часа при температуре 90,0 ± 2,0 ^{0}С. Температура регулируется подачей пара в реактор.

При окончании варки (проба прозрачная и без комков) прекращается подача пара, взамен которого в реактор подается холодная вода для охлаждения состава до 20,0 – 25,0 ^{0}С. При этой температуре в клей вводится 280,0 – 290,0 г 85 % ортофосфорной кислоты (H_3PO_4), которая используется в качестве пластификатора, антисептика и катализатора. Перемешивание осуществляется в течение 10 – 15 мин. Проба кислотности состава (предел pH 5,0 – 7,0). При этом концентрация клея ПВС должна составлять 6,5 ± 0,5 %.

Рецептура приготовления клеевого состава:

спирт поливиниловый «Мовиол» (56 – 96 %)	(95,0 ± 1,0) кг
пеногаситель	(0,400 ± 0,005) кг

Витебский государственный технологический университет

кислота ортофосфорная (H_3PO_4 – 85%) (0,280 - 0,290) кг
вода (1350,0 ± 10,0) л

Рецептура приготовления клеевого состава на основе дисперсии ПВА включает следующие операции.

Перед приготовлением клеевого состава дисперсия ПВА тщательно перемешивается миксером в течение 10 – 15 мин (количество оборотов миксера – 300 $мин^{-1}$). Затем процеживается через сито и разбавляется водой до вязкости 45,0 ± 5,0 с.

Рецептура приготовления клеевого состава:

дисперсия ПВА (45,0 ± 1,0) кг
вода (21,0 ± 1,0) л

Связующая композиция для формирования композиционного текстильного материала способом импрегнирвания

Состав полимерной композиции для формирования композиционных текстильных материалов из химических комплексных нитей способом импрегнирования зависит от области использования и свойств, предъявляемых к готовому материалу, а также имеющегося специального оборудования.

Анализ рынка аппретов для пропитки текстильных материалов с целью придания им каркасности и фиксированной структуры, стабилизированных линейных размеров позволяет выделить определенный перечень препаратов различных фирм и различных составов в частности нами использовались:

– аминофункциональный полисилоксан («Siligen SIO» производства фирмы «BASF'sSofteners Universesystem»);

– дисперсия поливинилацетата с пластификатором «Stabiform 588», дисперсия поливинилацетата «Stabiform 691», дисперсия винилацетата этилен сополимера «Stabicryl 1009» (фирма «MFK Chemical Corporation»);

– органическое соединение «Cassurit» и дисперсия стирол-акрилата «Appretan № 9616» (фирма «Clariant»).

С целью выбора оптимального препарата для процесса импрегнирования проведены экспериментальные исследования, основанные на анализе показателей, характеризующих вышеуказанные свойства готового композиционного материала.

Для количественного и качественного определения каркасности и стабильности структуры тканой основы композиционных текстильных материалов выбран показатель жесткости. В результате анализа нормативно-технической документации на аналогичные материалы, используемые для производства галантерейных изделий, обуви, настенных покрытий и декоративных элементов корпусной мебели, установлено, что показатель жесткости не должен превышать 220 сН.

Витебский государственный технологический университет

В свою очередь, чем выше жесткость готового текстильного композита, тем ниже способность готового композита драпироваться и принимать нужную форму (усложняет процесс выработки изделий). Данный перечень свойств характеризуется показателем несминаемости.

Результаты экспериментальных исследований по определению жесткости композиционного текстильного материала из вискозных нитей после импрегнирования различными полимерными композициями представлены на рисунке 2.18.

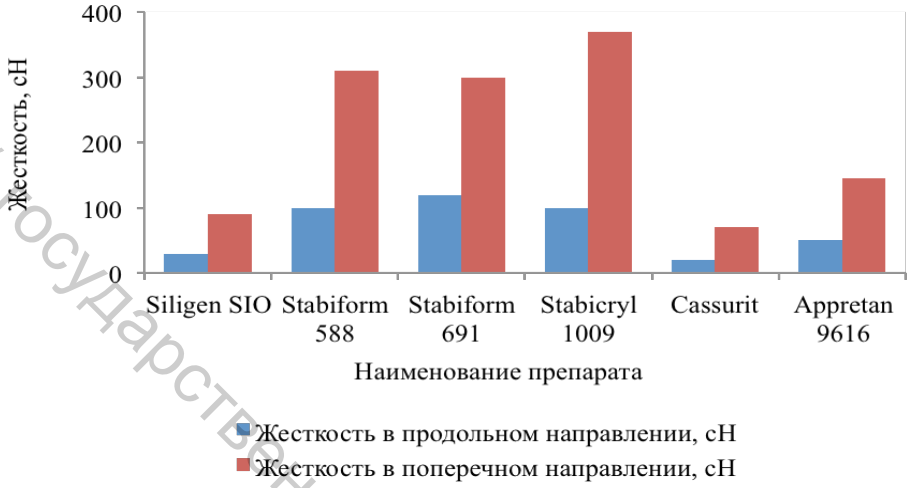


Рисунок 2.18 – Зависимость жесткости текстильного композита из вискозных комплексных нитей от вида аппрета

Как видно, дисперсия поливинилацетата с пластификатором «Stabiform 588», дисперсия поливинилацетата «Stabiform 691» и дисперсия винилацетата этилен сополимера «Stabicryl 1009» (фирма «MFK Chemical Corporation») имеют показатель жесткости, превышающий установленный нормативной документацией.

Результаты измерений несминаемости представлены на рисунке 2.19.

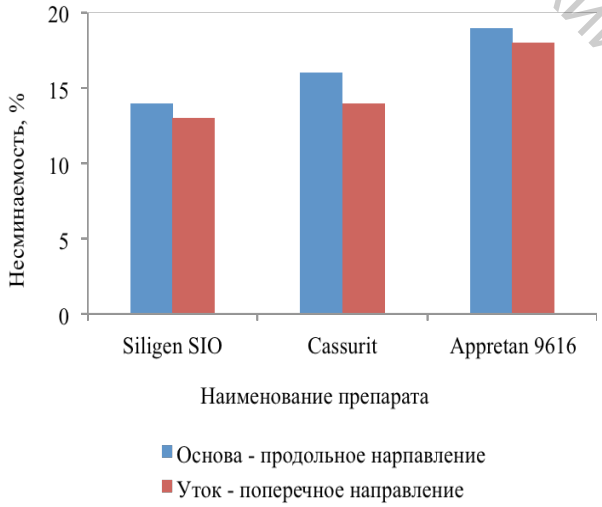


Рисунок 2.19 – Графическая зависимость показателя несминаемости текстильного композита от вида аппрета

Витебский государственный технологический университет

Анализ результатов проведенных экспериментальных исследований показывает, что наиболее подходящим препаратом для импрегнирования тканой основы композита является дисперсия стирол-акрилата фирмы «Clariant» – «Appretan № 9616» (создает перманентный эффект). В ходе обработки данной дисперсией получен образец текстильного композита из вискозных комплексных нитей, обладающий оптимальным показателем жесткости, а, следовательно, обеспечивающий готовому материалу такие свойства, как каркасность, фиксированная структура и стабильность размеров. При этом полученный образец имеет высокую несминаемость, то есть способность не образовывать складки и заломы после смятия при выработке из готового композиционного текстильного материала изделий различного назначения.

«Appretan № 9616» – самосшивающаяся дисперсия стирол-акрилата, совместим с другими отделочными препаратами (с неионогенными, анионактивными фторорганическими дисперсиями, сшивающими агентами, смолами, загустителями, мягчителями, катализаторами и другими текстильно-вспомогательными веществами). Образующийся жесткий гриф устойчив к чистке водой и химчистке, что является важным для обеспечения эксплуатационных свойств готового композиционного текстильного материала.

Свойства препарата «Appretan № 9616» представлены в таблице 2.16.

Таблица 2.16 – Свойства препарата «Appretan № 9616» для формирования текстильного композита способом импрегнирования тканой основы

Наименование показателя	**Значение показателя**
Состав	дисперсия стирол-акрилата, самосшивающая
Внешний вид	низковязкая дисперсия белого цвета
Ионогенность	анионактивная
pH	около 4–6
Растворимость	смешивается с холодной и теплой (до 50^0C) водой в любом соотношении
Рекомендации по хранению	при хранении в соответствующих условиях (при температуре от $+5^0$ до $+40\ ^0$C) не менее 6 месяцев
Гриф	жесткий
Морозоустойчивость	неморозостойкий
Устойчивость к стирке и химической чистке	устойчив к стирке и химчистке

Показатель жесткости зависит от концентрации дисперсии стирол-акрилата «Appretan № 9616» (рисунок 2.20).

Витебский государственный технологический университет

$$Y_1 = 28{,}683 \cdot \ln(X) - 123{,}110.$$

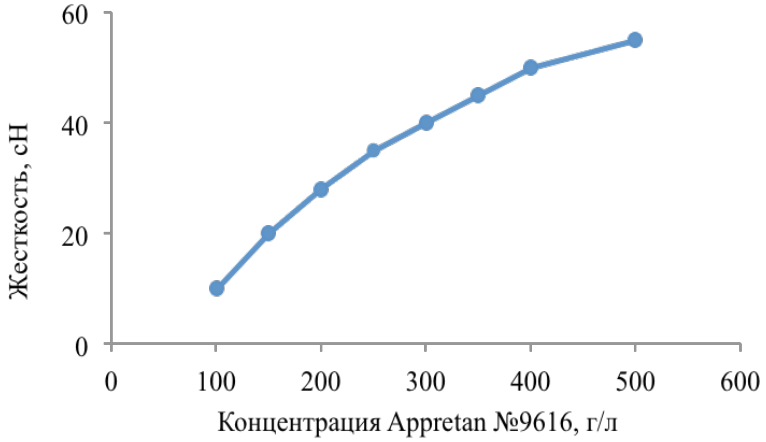


Рисунок 2.20 – Зависимость жёсткости текстильного композита от концентрации «Appretan № 9616»

Анализируя графическую зависимость, можно сделать вывод, что с увеличением концентрации «Appretan № 9616» жесткость импрегнированных тканых основ композиционного материала увеличивается. Следовательно, оптимальная концентрация «Appretan № 9616» выбирается в зависимости от отрасли проработки и назначения готового композиционного текстильного материала: менее жесткие материалы используются для изготовления галантерейных изделий, верха обуви и текстильных настенных покрытий; более жесткие используются при декоративной отделке мебели, производстве жалюзи.

Для текстильных композитов, предназначенных для производства галантерейных изделий и верха обуви необходимо наличие таких показателей, как водо–, масло– и грязеотталкивание.

Наличие данных показателей обеспечивается разнообразными способами, которые сводятся к образованию на внешней поверхности отдельных волокон пленки, со значительно более низким поверхностным натяжением [10]. Образование данной пленки снижает значение удельного поверхностного электрического сопротивления. При этом важно, что система макропор (межволоконное пространство) остается незатронутой.

При разработке композиционных текстильных материалов способом импрегнирования в качестве добавки для обеспечения водо–, масло–, грязеотталкивания применяется препарат фирмы «Clariant» – «Nuva FHN» (дисперсия фтористого соединения).

Для композиционных текстильных материалов, предназначенных для декоративной отделки помещений и корпусной мебели необходимо наличие такого показателя, как огне-, термостойкость [9].

Витебский государственный технологический университет

Для придания текстильным композитам огне-, термостойкости выбрано органическое фосфорное соединение фирмы «Clariant» «Pekoflam DPN – 1» (органическое фосфорное соединение).

Таким образом, выбор состава связующего зависит от назначения текстильного композита, полученного способом импрегнирования. В таблице 2.17 представлены основные результаты исследованных нами составов полимерных связующих.

Таблица 2.17 – Составы полимерных связующих для композиционных текстильных материалов различного назначения и показатели их качества

Назначение КТМ и показатели их качества	**Значения показателей качества**	**Состав полимерной композиции и концентрации ее компонентов в расчете грамм на 1 литр**		
Для верха обуви – жесткость, сН – угол смачивания, град – пылеёмкость, г/(м^2·с)	56,68 102,00 1,30	«Appretan № 9616» – 400	«Nuva FHN» – 50	H_2O – 550 мл
Для галантерейных изделий – жесткость, сН – угол смачивания, град – пылеёмкость, г/(м^2·с)	34,58 102,00 1,30	«Appretan № 9616» – 350	«Nuva FHN» – 50	H_2O – 600 мл
Для текстильных настенных покрытий – жесткость, сН – коэффициент дымообразования, м^2/кг – кислородный индекс, %	5,72 305,90 39,60	«Appretan № 9616» – 200	«Pekoflam DPN–1» – 50	H_2O – 750 мл
Для жалюзи – жесткость, сН – коэффициент дымообразования, м^2/кг – кислородный индекс, %	26,26 305,90 39,60	«Appretan № 9616» – 400	«Pekoflam DPN–1» – 40	H_2O – 560 мл
Для декоративной отделки корпусной мебели – жесткость, сН –коэффициент дымообразования, м^2/кг – кислородный индекс, %	33,8 305,9 39,6	«Appretan № 9616» – 500	«Pekoflam DPN–1» – 40	H_2O – 460 мл

Витебский государственный технологический университет

3 АРМИРУЮЩИЕ ТЕКСТИЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Непропитанные волокнистые материалы, образующие определенную плоскую или пространственную структуру, называют армирующими каркасами. Свойства текстильных композитов, особенно их физико-механические свойства, определяются, прежде всего, армирующими волокнами и нитями — их видом и свойствами, размерами и расположением, то есть строением армирующего текстильного наполнителя.

В качестве армирующих текстильных материалов используются волокна (различной природы и длины резки), нити, жгуты и ровинги (жгутики), ленты, шнуры, ткани, плетеные полотна, трикотажные полотна, нетканые полотна и другие. Используя различные виды текстильных материалов и технологические приемы их расположения, можно оптимизировать расположение армирующих волокон и нитей в готовом композите или изделии на его основе и добиться такого наиболее рационального варианта, при котором большая часть армирующих волокон расположена в направлении главных действующих механических напряжений в условиях эксплуатации.

Выбор структуры армирующего текстильного материала является весьма важным, поскольку он во многом определяет физико-механические, эксплуатационные и потребительские свойства готового композита. Выбор вида армирующего текстильного материала определяется несколькими факторами:

- пространственным строением для получения заданного расположения армирующего компонента — в направлении действующих усилий (для механически нагруженных композитов) или равномерного расположения (для изотропных видов композитов);
- достижением оптимальной (часто максимальной) степени армирования;
- возможностью равномерного расположения текстильного компонента по заданной поверхности материала или изделия сложной формы;
- доступностью и экономическими соображениями.

По расположению структурных элементов армирующие текстильные материалы могут быть условно разделены на следующие виды:

- 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 (волокнистые слои, холсты, большинство нетканых материалов);
- с хаотическим расположением волокон в трехмерном пространстве (специальные текстильные структуры).

Витебский государственный технологический университет

Основные варианты расположения волокон в армирующих наполнителях и, соответственно, в полученных на их основе текстильных композитах приведены на схемах рисунка 3.1.

Рисунок 3.1 – Основные схемы расположения волокон в различных видах армирующих текстильных материалах

3.1 Короткие волокна

Короткие волокна являются одним из основных видов армирующих текстильных материалов. Диапазон длин резаных (рубленых) волокон может быть очень широким — от 3 – 10 мм (для изготовления слоистых композитов с волокнистым покрытием) до 30 –

Витебский государственный технологический университет

40 мм (в композиционных нетканых материалах на основе реактопластов).

Как исходный материал сами короткие волокна применяются редко, поскольку они неудобны при дозировании (недостаточно рассыпчаты) и плохо диспергируются в матрице. Обычно на их основе изготавливаются волокнистые армированные полуфабрикаты (например, волокнистые плиты – волокниты).

Особый интерес представляет использование при формировании текстильных композитов волокнистых отходов, образующихся на текстильных предприятиях, в частности нами были исследованы и разработаны технологии вторичной переработки коротковолокнистых отходов, длина волокон которых менее 25 мм.

Такие отходы применения в своей отрасли не находят, постоянно складируются, создавая тем самым экологическую и экономическую проблему. Следует отметить, что доля коротковолокнистых отходов на некоторых предприятиях Республики Беларусь приближается к 40 % от используемого сырья. Поэтому актуальной задачей является использование коротковолокнистых отходов в качестве основного сырьевого компонента при разработке способов получения композиционных текстильных материалов.

В качестве основного сырьевого компонента нами приняты коротковолокнистые отходы стрижки искусственного меха производства ОАО «БелФа» (кноп стригальный) с длиной волокон не более 10 мм.

Кноп стригальный – это вид отхода, который образуется в результате заключительной отделки трикотажного искусственного меха. Заключительная отделка меха состоит в поднятии, распушивании, стрижке и глажении ворса на отделочно-стригальных машинах, установленных в поточных линиях. Вне зависимости от ассортимента весь мех проходит три стадии стрижки: предварительная, промежуточная, окончательная.

В процессе изготовления трикотажного искусственного меха образуются следующие виды отходов: возвратное волокно одного цвета (образуется на приготовительном и вязальном участках, составляет 1,5 % от всего используемого сырья); возвратное волокно разных цветов (образуется на приготовительном, вязальном и отделочном участках, составляет 12,9 %); лоскут весовой и срывы меха (образуются на швейном участке, составляют 1 %); волокно невозвратное, короткое (кноп стригальный), получаемое в результате стабилизации, стрижки и глажения искусственного меха, (образуется на отделочном участке и составляет до 40 %).

В зависимости от ассортимента выпускаемого меха состав волокон в отходе кноп стригальный колеблется в таких пределах: 100 % нитрон,

Витебский государственный технологический университет

- 75 % нитрон + 25% полиэфир. Цветовая гамма коротких волокон зависит от ассортимента искусственного меха.

Физико-механические свойства волокон нитрон и полиэфир представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Физико-механические свойства волокон

Параметр	Обозначение	Единицы измерения	Значения для волокон	
			нитрон	полиэфир
Линейная плотность	***T***	Текс	0,33	0,33
Диаметр	***d***	мм	0,01872	0,01872
Разрывная нагрузка	***P***	сН	9	18
Относительная разрывная нагрузка	***Po***	сН/Текс	27,3	54,6
Относительное разрывное удлинение	***ξo***	%	18	35
Теплоемкость	***Co***	кДж/(кг · °С)	1,67-1,88	1,09-1,13
Удельное электрическое сопротивление	***R***	Ом	$1{,}17 \cdot 10^{10}$	$1{,}68 \cdot 10^{12}$

3.1.1 Определение длины волокон и классификация коротковолокнистых отходов по длине

Качество текстильного композиционного материала определяется свойствами коротковолокнистых отходов. Определяющим свойством является длина волокон. Для определения длины волокон в коротковолокнистых отходах использовался метод промера отдельных распрямленных волокон. Определение длины волокон в коротковолокнистых отходах проводилось путем промера одиночных волокон при помощи линейки по ГОСТ 427 – 75 с точностью измерений 1 мм, а также при оптическом испытании, при помощи микроскопа с окулярным микрометром с точностью измерений 0,1 мм. Масса волокон определялась при помощи электронных весов с точностью измерений 0,001г. Длина волокна ***L*** – наибольшее расстояние между его концами в распрямленном состоянии. В массе волокон коротковолокнистых отходов длина их неодинакова, поэтому необходимо использовать различные сводные характеристики длины и неравномерности волокон в коротковолокнистых отходах по длине [24]. Средняя арифметическая длина – ***La*** или фактическая длина определяется по формуле

Витебский государственный технологический университет

$$La = \frac{L_1 n_1 + L_2 n_2 + \ldots}{n_1 + n_2 + \ldots}, \qquad (3.1)$$

где n_1, n_2 – количество волокон длиной L_1, L_2 , мм соответственно. Практически значения n_1, n_2 и т. д. определяют после промера длины каждого волокна и подсчета числа волокон относящихся к определенному интервалу длин.

Средняя массодлина – *Lд* определяется по формуле

$$Lд = \frac{L_1 m_1 + L_2 m_2 + \ldots}{m_1 + m_2 + \ldots}, \qquad (3.2)$$

где m_1, m_2 – масса волокон, г длиной L_1, L_2 , мм соответственно.

Модальная массодлина *Lm* – соответствует длине волокон, составляющих группу с наибольшей массой. Модальная длина *Lм* – соответствует длине наиболее многочисленных волокон. Штапельная массодлина *Lш* – это средняя массодлина из длин, больших модальной массодлины.

Для волокон в отходе кноп стригальный после предварительной стрижки: *La* = 5,57 мм; *Lд* = 9,17 мм; *Lm* = 7,7 мм; *Lм* = 2,06мм; *Lш* = 17 мм.

Диаграмма распределения волокон по классам длины в коротковолокнистых отходах после предварительной стрижки представлена на рисунке 3.2.

Рисунок 3.2 – Диаграмма распределения длин волокон в отходе кноп стригальный после предварительной стрижки

Для волокон в коротковолокнистых отходах после промежуточной стрижки *La* = 2,03 мм; *Lд* = 2,1 мм; *Lm* = 2,1 мм; *Lм* = 2,1 мм; *Lш* = 2,5 мм.

На рисунке 3.3 представлена диаграмма распределения волокон по классам длины в коротковолокнистых отходах после промежуточной стрижки.

Витебский государственный технологический университет

Рисунок 3.3 – Диаграмма распределения длин волокон в отходе кноп стригальный после промежуточной стрижки

Для волокон в отходе кноп стригальный после окончательной стрижки

La = 1,06 мм; *Lд* = 1,07 мм; *Lm* = 0,97 мм; *Lм* = 1,00 мм; *Lш* = 1,2 мм.

На рисунке 3.4 представлена диаграмма распределения длин волокон после окончательной стрижки.

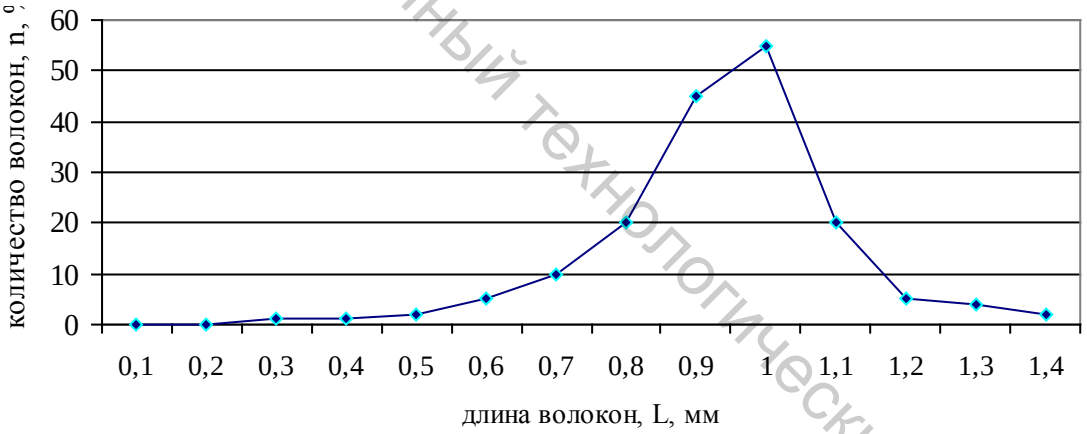


Рисунок 3.4 – Диаграмма распределения длин волокон в отходе кноп стригальный после окончательной стрижки

Характеристикой равномерности геометрических свойств коротковолокнистых отходов является среднеквадратическое отклонение S, мм и коэффициент вариации C, % [24].

Показатели неравномерности определяются по формулам

$$S = \sqrt{\frac{\sum\left[(L - La)^2 n\right]}{\sum n}}, \tag{3.3}$$

Витебский государственный технологический университет

$$C = \frac{100S}{La}, \qquad (3.4)$$

где L – средняя длина отдельных групп волокон, мм;

n – число волокон в отдельных группах.

Анализ диаграмм распределения и коэффициента вариации, который равен 209,4 %, свидетельствует о большой неравномерности и необходимости применения процесса подготовки коротковолокнистых отходов к вторичной переработке.

Для формирования слоистых текстильных композиционных материалов с ворсовым покрытием такая неравномерность волокон по длине не допустима, кроме того, длина волокна не может быть выбрана произвольно. Следует учитывать природу волокна и его механические свойства. Качество покрытия будет тем лучше, чем меньше будет изгибаться волокно, так как износ волокон, используемых в качестве ворса для слоистых композиционных материалов, связан с разрушением в результате накопления усталостных деформаций при многократном изгибе волокна.

Предельная длина волокон для получения слоистых текстильных материалов с ворсовым покрытием при заданной линейной плотности определялась по формуле [26]

$$L = 21.7 d_в (Ep^{-1} - 1), \qquad (3.5)$$

где $d_в$ – диаметр волокна, мм;

Ep – разрывное удлинение, %.

Диаметр волокна $d_в$, мм определяется по формуле [24]

$$d_в = 0{,}0375\sqrt{\frac{T}{\gamma}}, \qquad (3.6)$$

где T – линейная плотность волокон, текс;

γ – плотность вещества волокна, мг/мм^3.

Рассчитанная по формуле (3.5) длина волокон волокнистой смеси не должна превышать 1,2 мм. Превышение длины приводит к снижению жесткости и ухудшению внешнего вида готового материала [27, 28]. Анализ существующих способов подготовки волокнистых отходов к вторичной переработке показал, что для подготовки коротковолокнистых отходов целесообразнее всего применение процесса измельчения [29].

Витебский государственный технологический университет

3.1.2 Выбор длины и толщины волокон.

Соотношение между длиной и толщиной волокон для ворсового покрытия композиционных слоистых текстильных материалов 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 [28]. При исследовании устойчивости шерстяных волокон к многократному изгибу установлено, что число изгибов волокна до появления усталостных изменений в его структуре зависит от соотношения величин ρ/d, где ρ – наименьший радиус кривизны изгиба, мм, а d – диаметр волокна, мм. При ρ/ d ≥ 11 усталостные явления (надлом или расщепление волокна) появляются только после 40 млн. изгибов; при ρ/ d ≥ 13 эти явления не наступают даже после 140 млн. изгибов. Согласно [24] между толщиной волокна и радиусом цилиндра, изгиб по которому приводит к разрушению волокна:

$$\rho_c \leq d/2\ (1/\varepsilon - 1) \qquad (3.7)$$

где ρ_c – наименьший радиус кривизны, изгиб по которому приводит к разрушению волокна, мм;

ε – относительное разрывное удлинение волокна.

Анализ соотношения величин $\frac{\rho}{\rho c}$ для шерстяных волокон показал, что для d = 0,025 мм и ρ = 0,325 мм при

$$\frac{\rho}{\rho c} = n_1 \approx 14 \qquad (3.8)$$

Соотношение между длиной волокна и радиусом изгиба, обеспечивающее высокую выносливость волокон, было найдено для ворса из шерстяных волокон плотностью [28]:

$$\frac{l}{\rho} = n_2 \approx 3{,}1. \qquad (3.9)$$

Решая совместно уравнения 3.7 – 3.9, находим

$$l = 21{,}7d\left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right). \qquad (3.10)$$

Витебский государственный технологический университет

Сравнение выносливости шерстяных и капроновых волокон при многократных изгибах показывает существенно большую выносливость капроновых волокон.

При выборе оптимального соотношения длины и толщины ворса возможен и другой подход, состоящий в оценке наилучших условий для упругого восстановления изогнутых волокон после прекращения действия изгибающих усилий. При этом исходим из того, что изгибающее усилие действует на волокно в течение короткого промежутка времени, когда проявляются только упругие деформации изгиба.

Используем известное соотношение для величины жесткости на изгиб:

$$EI = \frac{ql^3}{A}, \tag{3.11}$$

где E – модуль упругости при изгибе;

I – момент инерции сечения волокна относительно нейтральной оси, мм^4;

q – масса 1 пог. м. волокна, равная $q = \frac{\pi d^2}{4}\gamma$, мг;

γ – плотность волокна, мг/мм^3;

A – табличная функция относительного прогиба $f_0 = f/l$;

f – прогиб волокна, мм.

Для волокон круглого сечения

$$EI = 0.05Ed^4 \tag{3.12}$$

Величина жесткости на изгиб будет максимальной при минимальном значении A, когда как раз проявляются упругие деформации. Минимальное значение A равно 0,1.

Тогда из выражения (3.11) находим ограничение сверху длины ворса при максимальной жесткости на изгиб:

$$l \leq \sqrt[3]{\frac{EIA}{q}}. \tag{3.13}$$

С учетом выражения (3.12) и значения q имеем

$$l \leq \sqrt[3]{\frac{0.063d^2EA}{\gamma}}. \tag{3.14}$$

Таким образом, формулы (3.10) и (3.14) могут быть использованы для расчета оптимального соотношения длины и толщины волокон при

Витебский государственный технологический университет

формировании композиционных текстильных материалов с ворсовым покрытием.

3.1.3 Измельчение волокнистых частиц

Измельчения коротковолокнистых отходов возможно проводить ударным способом с использованием роторной дробилки. Данный способ позволяет полностью управлять процессом и получать волокна заданной длины в зависимости от выбранных технологических и конструктивных параметров оборудования [30].

Для получения однородной по свойствам волокнистой массы, пригодной для использования в качестве ворсового покрытия аэродинамическим способом формирования композиционных текстильных материалов, необходимо выбирать оптимальные параметры процесса измельчения, в частности решать вопросы о длительности процесса подготовки, о возможности повышения производительности за счет увеличения частоты вращения ротора, о качестве получаемой смеси при тех или иных параметрах подготовительного процесса.

При определении оптимальных параметров подготовки однородной волокнистой смеси преследовалась цель получить волокнистую массу, однородную по длине волокон и соответственно с низким коэффициентом вариации по длине.

По результатам расчета основных параметров дробильного оборудования, при известных размерах применяемых ножей, установлено, что для успешного разрушения волокнистых комплексов коротковолокнистых отходов частота вращения ротора должна быть не менее 1500 мин$^{-1}$, кроме этого известно [30], что минимальный размер частиц определяется разводкой между измельчающими органами. Поэтому, с учетом анализа влияния различных факторов на свойства волокнистой смеси, при проведении эксперимента в качестве входных параметров были приняты: длительность процесса обработки τ, мин; частота вращения ротора ν, мин$^{-1}$,

В качестве критериев оптимизации на основании анализа литературных источников [31] были приняты качественные показатели волокнистой смеси: средняя длина волокон смеси L, мм; коэффициент вариации по длине C_L, %; доля спекшихся волокон ω, %. В результате экспериментальных исследований получены математические модели исследуемых параметров подготовки коротковолокнистых отходов:

- средняя длина волокон после измельчения

$$L = 1.48 - 0.38\tau - 0.13\nu; \qquad (3.15)$$

- коэффициент вариации по длине

Витебский государственный технологический университет

$$C_L = 4.12 - 1.15\tau - 0.14\nu + 0.19\tau^2 + 0.1\tau\nu; \quad (3.16)$$

– доля спекшихся волокон

$$\omega = 5.2 + 1.45\tau + 0.8\nu + 1.3\tau^2. \quad (3.17)$$

Анализ полученных математических моделей процесса подготовки коротковолокнистых отходов ко вторичной переработке показывает, что средняя длина волокон после измельчения находится в прямо пропорциональной зависимости от длительности процесса обработки и от частоты вращения ротора. При увеличении длительности процесса измельчения средняя длина волокон уменьшается до определенного предела. Пределом измельчения является разводка между подвижными и неподвижными ножами. Уменьшение длины объясняется увеличением числа ударов подвижных ножей, приходящихся на одно и то же волокно. При увеличении числа оборотов ротора увеличивается скорость вращения ножей и сила воздействия ножей на волокно. Чем больше это воздействие, тем меньше средняя длина волокон. Средняя длина волокон определялась промером длины волокна при оптическом испытании при помощи микроскопа Микромед С–11 с параметром увеличения 80 – 800 крат.

Коэффициент вариации по длине волокон после подготовки уменьшается при увеличении длительности воздействия ножей на волокно. Это объясняется тем, что увеличивается кратность воздействия измельчающих органов на волокна, длина которых больше средней длины волокон (La). При увеличении частоты вращения ротора увеличивается скорость потока, заполняющего пространство между подвижными и неподвижными ножами. Увеличивается центробежная сила, заставляющая движущийся волокнистый поток прижиматься к неподвижным ножам и стенке дробилки, при этом значительно увеличивается доля волокон, подвергаемых обработке. Исключается проскальзывание волокон между ножами, так как с увеличением скорости вращения увеличивается разрушающая сила, воздействующая на волокно, которая больше прочности волокон.

Доля спекшихся волокон увеличивается с увеличением времени обработки и с увеличением частоты вращения ротора. Это объясняется тем, что повышается температура при трении рабочих органов и частиц, что приводит к подплавлению верхнего слоя синтетических волокон, которые в свою очередь спекаются, образуя неразъединимые комочки, ухудшающие качественные показатели волокнистой смеси. Доля спекшихся волокон определялась как разница между массой непросеянной смеси и массой просеянной смеси в процентном отношении. С помощью полученных математических моделей можно определить характер влияния каждого фактора на свойства получаемой

Витебский государственный технологический университет

волокнистой смеси, а также определить оптимальные уровни факторов, обеспечивающие получение волокнистой смеси с заданными свойствами.

В зависимости от требуемых показателей качества волокнистой смеси [27, 28] с заданной длиной волокон следует вырабатывать ее с определенным сочетанием длительности обработки и частоты вращения ротора. Для получения волокнистой смеси, в которой волокна будут иметь среднюю длину 1 мм, с коэффициентом вариации не более 4 % и с долей спекшихся волокон не более 7 %, ее рекомендуется обрабатывать с частотой вращения 1900 – 2800 мин$^{-1}$ в течение 2,5 – 3 минут.

Свойства волокнистой смеси, полученной при оптимальных технологических параметрах, представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Свойства волокнистой смеси для ворсового покрытия

Показатель	Значение показателя
Состав	Смесь полиэфирных и нитроновых волокон
Средняя длинна, мм	1-1,2
Коэффициент вариации по длине, не более, %	4
Доля спекшихся волокон, не более, %	7

3.2 Однонаправленные армирующие текстильные материалы

Нити, жгутики (ровинги), жгуты и ленты на их основе являются однонаправленными армирующими текстильными материалами и применяются для изготовления высокопрочных, однонаправленных композитов. Однонаправленные армирующие текстильные материалы также используются и для получения слоистых композитов путем выкладки слоев во взаимно перпендикулярных направлениях или под различными углами. Такое послойное расположение наполнителя особенно важно в случае прессования композитов на основе хрупких нитей, где в текстильных структурах наличие перегибов приводит к снижению механических свойств волокон (нитей) или их разрушению при прессовании.

При получении жгутиков (ровингов), жгутов и однонаправленных лент методом сложения (трощения) важное значение имеет равномерное сложение отдельных нитей без их разнодлинности, которая может приводить к неравномерности их нагружения в готовом композите и снижает его механические характеристики в направлении армирования (прочность, модуль деформации). Разнодлинность особенно сказывается в случае высокомодульных волокон (нитей) с малыми деформациями при разрыве.

По определению, нить есть линейное соединение волокон,

Витебский государственный технологический университет

сформированное в непрерывную прядь. Нить может состоять из одного или более непрерывных волокон (до нескольких тысяч) либо из множества прерывающихся коротких (так называемых штапельных) волокон. Чтобы предотвратить проскальзывание волокон относительно друг друга и образовать функциональную нить, штапельным волокнам придают значительную крутку или переплетение. Нити из штапельных волокон называются пряжей. Две или более единичные нити могут скручиваться вместе с образованием крученых нитей в два, три и более сложения, из которых последующей круткой можно получить пряжу более сложного строения. На рисунке 3.5 представлены схемы нитей различных структур [32].

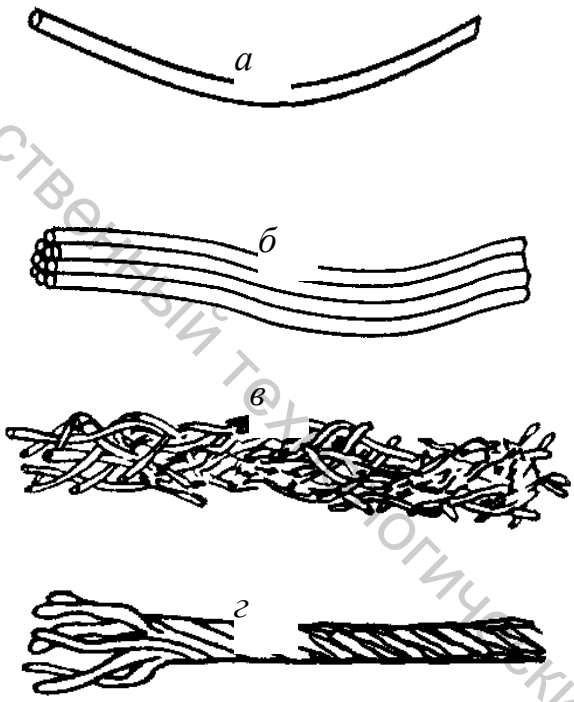


Рисунок 3.5 - Идеализированные схемы нитей различных структур:
а – непрерывное волокно; *б* – некрученая нить из непрерывных волокон; *в* – пряжа; *г* – крученая нить из непрерывных волокон

Свойства нити зависят от физических свойств и структуры составляющих ее волокон. Структурные особенности нити зависят главным образом от геометрии образующих ее волокон, а также от технологических параметров получения нити (ориентации волокна относительно оси нити, крутки, степени сцепления волокон). Важным параметром нити является относительная плотность волокон в поперечном сечении нити, которая выражается количественно через коэффициент упаковки (объемность) волокон. Коэффициент упаковки

Витебский государственный технологический университет

равен отношению удельного объема волокна ($см^3/г$) к удельному объему нити ($см^3/г$). Значения коэффициента упаковки волокон в нитях различных структур приведены в таблице 3.3.

Структура нити играет главную роль в механизме реализации свойств волокон в свойства нити. Эффективность переноса свойств зависит главным образом от искривления волокон в нити и характера зацепления волокон, присущих разным типам структур нити. В нитях из высокомодульных материалов коэффициент реализации значительно ниже, чем у низкомодульных, из-за повреждения волокон в процессе переработки. Известно, что высокомодульные волокна и нити плохо сопротивляются контактным, сжимающим и изгибающим напряжениям. Поэтому высокомодульные волокна в ткани сохраняют не более 50 % исходной прочности и жесткости. Для достижения более высокого коэффициента реализации свойств в системах волокно – нить и волокно – ткань применяют различные структуры ткани, технологические приемы.

Таблица 3.3 – Типичные коэффициенты упаковки различных нитей

Структура нити	Коэффициент упаковки
Моноволокно	1,00
Нить из моноволокон	
некрученая	0,25
слегка крученая	0,30
регулярно крученая	0,60
сильно крученая	0,90
текстурированная	0,33
Пряжа	
слабо крученая	0,33
сильно крученая	0,60

При разработке технологии получения композиционных текстильных материалов с использованием однонаправленных текстильных материалов нами были предложены в качестве текстильного компонента отходы химических нитей, образующиеся при перематывании, сновании и на других переходах производства; обрывки ленты с частичной параллелизацией волокон, получаемые с чесальных и ленточных машин до гребнечесания; концы ленты (чесаной) – однородная масса чистого равномерного волокна в виде обрывков ленты, получаемая с ленточных машин после гребнечесания со всех переходов ровничного ассортимента; концы пряжи (крутые) – обрывки

Витебский государственный технологический университет

пряжи разной длины, получаемые в прядильном, крутильном и ткацком производствах [34].

Данные отходы, как правило, не перерабатывают из-за трудоемкости и неэкономичности процессов дополнительной сортировки, резки, прочесывания, рыхления и т. д.

Состав отходов нитей может использоваться различный: вискозные, полиамидные, полиэфирные.

Свойства отходов химических нитей, используемых при разработке технологического процесса производства композиционных текстильных материалов с волокнистым покрытием механического способа формирования строительного назначения, представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Свойства отходов химических нитей

Параметр	Отходы химических комплексных нитей		
	вискозные	капроновые	лавсановые
Линейная плотность, текс	13,3; 16,6; 22,2; 29	15,6; 29	12,5; 14; 15,6; 16,6; 18,5; 27,7
Относительная разрывная нагрузка, сН/текс	21-22	32-34	40-50
Потеря разрывной нагрузки в мокром состоянии, %	45-50	10-12	0
Износостойкость: - к истиранию, тыс. циклов - к многократному изгибу, тыс. циклов	 30-60 1,5-2,5	 1000 до 100	 97 109
Температура размягчения, плавления или разрушения, ^{0}С	- не плавится, разрушается 150-160	170 215	235 255
Влажность, %	11-13	2,4-2,8	0,4-0,6
Объемная плотность, г/см^3	1,52	1,14	1,38

Состав, линейная плотность, длина нарезки текстильных отходов обусловливают свойства, структуру, внешний вид композитов с текстильным покрытием [35].

При использовании отходов, содержащих вискозные нити, композиционные текстильные материалы будут обладать главным достоинством вискозного волокна – хорошей гигроскопичностью, способностью хорошо поглощать влагу, что обусловливает малую электризуемость. Недостатком таких покрытий являются неустойчивость к действию микроорганизмов, прямых солнечных лучей, следовательно, материал необходимо ламинировать либо не использовать для настенных покрытий в помещениях повышенной влажности.

Витебский государственный технологический университет

Покрытие, содержащее полиамидные нити, по устойчивости к истиранию за счет свойств полиамидных волокон будет превосходить все остальные, обладать стойкостью к воздействию микроорганизмов, обеспечит красивый внешний вид полотна, своеобразный мерцающий блеск, придающий покрытию необычный внешний эффект. Из-за небольшой массы волокнистого материала полотно будет легким, однако, с высокими теплоизоляционными свойствами.

Покрытия с использованием отходов полиэфирных нитей вследствие низкой гигроскопичности будут обладать ценным свойством электроизоляционного материала [36].

При производстве композиционных материалов с волокнистым покрытием отходы химических нитей, пряжи нельзя использовать в чистом виде из-за разности длин, необходимо подготовить их к вторичной переработке. Подготовка заключается в измельчении и смешивании продукта с целью получения однородной по физико-механическим свойствам массы.

Для подготовки отходов химических нитей к дальнейшей переработки возможно использовать метод измельчения текстильных отходов способом резания. Данный способ позволяет полностью управлять процессом и получать продукт заданной длины в зависимости от выбранных технологических и конструктивных параметров оборудования.

Резание материала представляет процесс, определяемый физико-механическими свойствами разрезаемого материала, геометрией режущего инструмента и взаимным движением материала и инструмента. Выбор принципа резания определяется его возможностью обеспечить выполнение технических требований, предъявляемых к измельченному материалу по длине нарезки и качеству реза. Для отходов химических нитей, используемых для декоративного покрытия в композиционном материале, можно рекомендовать принцип комбинированного резания цилиндрической фрезой с вращательным движением фрезы и поступательным движением материала, схожий с принципом разрезания материалов методом ножниц (рисунки 3.6, 3.7).

Регулирование длины нарезки производится изменением скорости вращения подающих валиков или скорости вращения режущего инструмента.

Длина нарезки жгута из химических нитей в устройстве данного типа может быть определена по формуле

$$l = \frac{V_{под}}{\mathrm{n}_{\phi}\mathrm{z}}, \text{ м}, \qquad (3.18)$$

где $V_{под} = \dfrac{zlW_{\phi}}{2\pi}$ – скорость подачи жгута в зону резания, м/с;

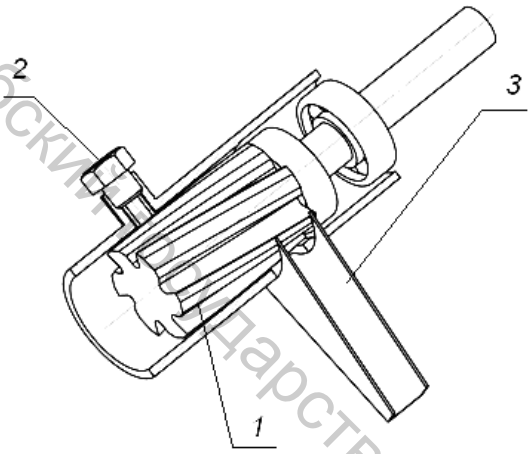
Витебский государственный технологический университет

$W_\phi = \frac{2\pi}{zt}$ – угловая скорость ножевого барабана, с$^{-1}$;

z – количество зубьев фрезы (ножей), шт;

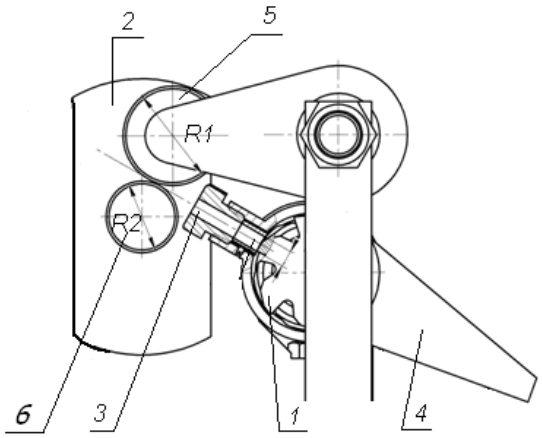
t – время продвижения материала на длину l, с;

n_ϕ – частота вращения фрезы, с$^{-1}$.



1 – осевая цилиндрическая фреза, 2 – направляющая для подачи материала в зону резания, 3 – направляющая для выхода продукта

Рисунок 3.6 – Узел резания



1 – фреза, 2 – двигатель, 3 – направляющая для подачи материала в зону резания, 4 – направляющая для выхода продукта, 6, 7 – прижимные валики

Рисунок 3.7 – Устройство подачи материала в зону резания

Для определения оптимальной длины нарезки отходов химических нитей, используемых при формировании декоративного волокнистого покрытия композиционных материалов, исследовалась зависимость стойкости покрытия к истиранию от длины нарезки. Были получены образцы с нанесенным волокнистым материалом длиной нарезки 9 – 10 мм, 5 – 6 мм и 1 – 2 мм. Экспериментально установлено, что при производстве композиционных материалов с волокнистым покрытием в виде измельченных отходов нитей различной длины нарезки, длина оказывает значительное влияние на сцепляемость продукта с поверхностью основы (рисунок 3.8). При увеличении длины частиц стойкость к истиранию готового полотна снижается, а потери покрытия увеличиваются. Минимальные потери продукта (10 %) наблюдаются при длине нарезки 1 – 2 мм, после 200 циклов потерь не наблюдается. При длине нарезки 9 – 10 мм устойчивость к истиранию волокнистого покрытия снижается. Длина частиц 1 – 2 мм является оптимальной при производстве композиционных текстильных материалов с волокнистым покрытием.

Витебский государственный технологический университет

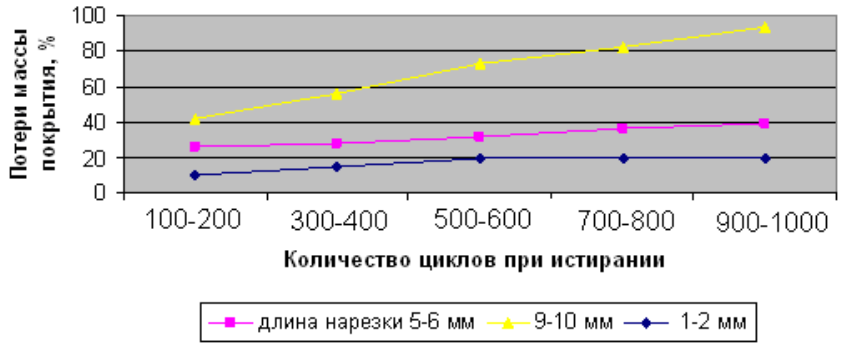


Рисунок 3.8 – Потеря массы покрытия при истирании полотна в зависимости от длины нарезки

В производстве композиционных текстильных материалов, где предусмотрена операция укатки покрытия, либо образования полимерной защитной пленки на поверхности материала, длина частиц не влияет на стойкость к истиранию, а обусловливает только внешний вид готового полотна.

Необходимым условием при измельчении химических нитей является сохранение их свойств с удовлетворительным качеством реза и получением отрезков определенной длины, пригодной для получения композиционных материалов. Нами были проведены исследования зависимости длины нарезки от частоты вращения фрезы (режущего инструмента) и от скорости подачи материала в зону резания при различном количестве зубьев фрезы (рисунок 3.9). Для получения одной и той же длины нарезки готового продукта при увеличении количества зубьев фрезы необходимо увеличить скорость подачи материала в зону резания или скорость вращения фрезы, или оба данных показателя.

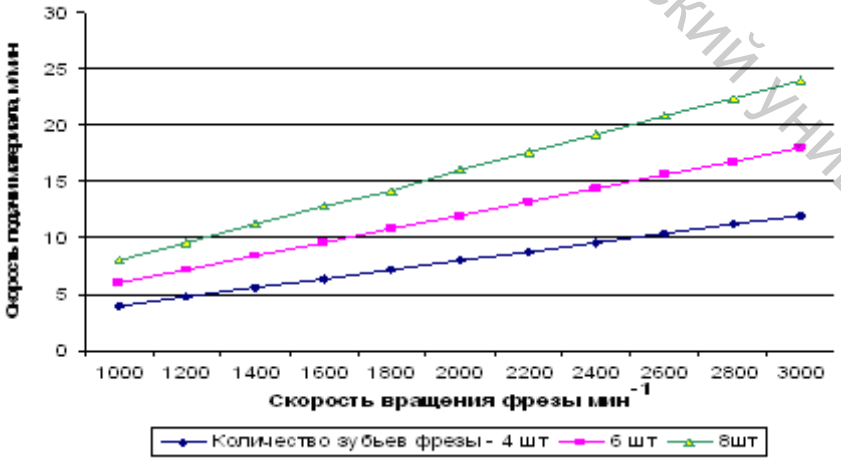


Рисунок 3.9 – График зависимости параметров работы устройства при длине нарезки 1 мм

Витебский государственный технологический университет

При выбранном диаметре подающих валиков $4 \cdot 10^{-3}$м и частоте вращения электродвигателя механизма подачи 16,6 $с^{-1}$, максимальная скорость подачи материала в зону резания ограничена и равна 0,2 м/с. Следовательно, оптимальное количество зубьев фрезы для устройства комбинированного резания цилиндрической фрезой с вращательным движением фрезы и поступательным движением материала равно четырем.

3.3 Структура и текстурные свойства текстильных армирующих материалов

К текстильным армирующим материалам относятся ткани, трикотаж, плетение, нетканый материал. Структура и текстурные свойства данных материалов зависят от требований к прочностным и деформационным свойствам композита, а также от требований, связанных с множеством разных технологических воздействий, которым подвергается армирующий материал в процессе переработки в изделие. В зависимости от технологии переработки и вида изделия армирующий материал должен обладать или высокой размерной стабильностью, или умеренной формуемостью, или способностью принимать нужную форму. Основными типами структур текстильных армирующих материалов являются тканые, трикотажные (вязаные), плетеные и нетканые структуры, показанные в таблице 3.5 и на рисунке 3.10.

3.3.1 Тканые материалы

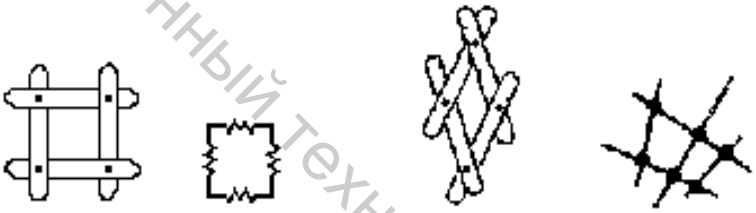
В производстве композитов используются различные типы тканей. Они различаются между собой по весу, толщине, типу и номеру нити, по типу переплетения. Наибольшего применения получили ткани трех основных типов переплетения: полотняного, саржевого и сатинового. В ткани полотняного переплетения (рисунок 3.10 а) основа и уток взаимно переплетаются. Саржевая ткань соткана так, что на ее поверхности получается характерный узор из диагональных полос. В ткани сатинового переплетения каждая нить основы или утка проходит над несколькими нитями утка или основы. Применяя ткани различных типов, можно получать композиты с различными прочностными и технологическими свойствами. Наиболее высокими прочностными свойствами обладают ткани сатинового переплетения, так как нити в них в основном прямолинейны. Ткацкая технология позволяет получать ткани разной ширины, в виде рукавов или полотен с различными конструкциями основы и утка с дополнительными проложенными (непереплетающимися) системами нитей.

К недостаткам тканых материалов с точки зрения конструирования некоторых композитных изделий относятся ограниченная способность

Витебский государственный технологический университет

облегания криволинейных поверхностей (формуемость), слабое сопротивление сдвигу в плоскости, низкая эффективность реализации прочностных свойств волокон в ткани по отношению к растягивающим нагрузкам из-за непрямолинейности нитей основы и утка, обусловленной характером процесса ткачества.

Таблица 3.5 – Основные типы структур армирующих текстильных материалов [32]

	Ткань	Трикотаж	Плетение	Нетканый материал
Составной элемент	Нить	Нить	Нить	Волокно
Способ образования	Перекрещивание	Переплетение	Переплетение	Соединение склейкой
Геометрия				
Модели элементарной ячейки				
Ориентация	Ортогональная	Непрямолинейная	Решетчатая	Хаотическая
Подвижность	Ограниченная	Очень большая	Ограниченная	Незначительная

Ткани, образованные системой трех нитей, переплетающихся под углом 60°, характеризуются меньшей анизотропией, повышенной сдвиговой жесткостью, более однородной формуемостью. Тем не менее ни один из тканых материалов не обладает способностью к вытяжке, достаточной для реализации глубокого формования.

Витебский государственный технологический университет

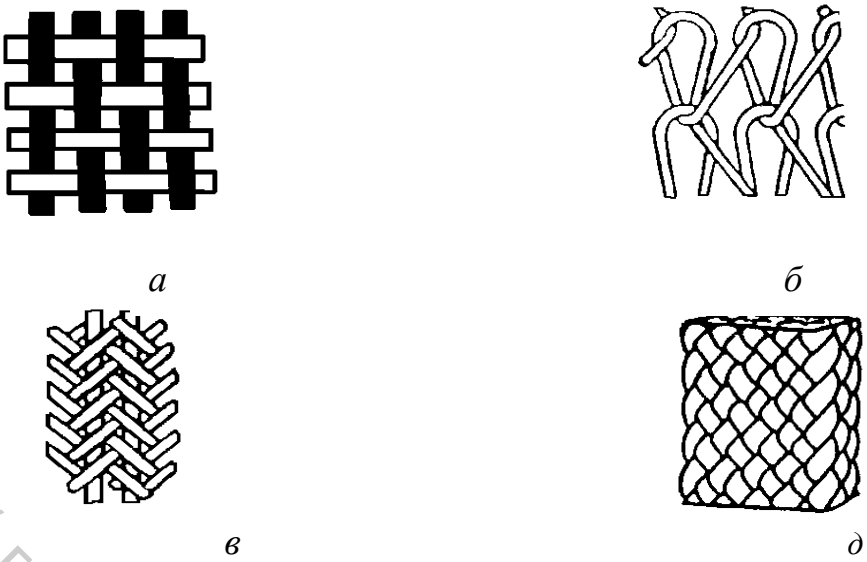


Рисунок 3.10 – Структуры тканых (*а*), вязаных (*б*), плетеных (*в*) и нетканых (*д*) армирующих материалов [32]

3.3.2 Трикотажные структуры

Трикотажные структуры (рисунок 3.10 б), образованные переплетением одной или нескольких армирующих нитей, позволяют реализовать значительно более широкий диапазон форм и свойств, чем тканые. Такие трикотажные структуры, как основно-вязаные и уточно-вязаные (кулирные), обеспечивают деформируемость полотна во всех направлениях и пригодны для изготовления композитных изделий глубоким формованием. Используя систему проложенных непереплетающихся нитей, можно придать стабильность размеров в одном направлении и способность к формованию в других. Основно-вязаные трикотажи с проложенными нитями особенно удобны для ряда областей применения благодаря необычной способности сохранять высокие механические свойства проложенной нити и вследствие этого открывают широкие возможности проектирования изделий с разными эксплуатационными характеристиками, начиная от высокой стабильности размеров до заданной деформируемости в нужных направлениях. Более того, трикотажи этого типа с проложенными основными нитями обладают более высокими коэффициентами реализации свойств волокон при растяжении, сопротивлении сдвигу в плоскости, чем сопоставимые по структуре тканые материалы. Главный недостаток трикотажных систем применительно к некоторым видам изделий: ограниченная толщина материала (от трех до пяти диаметров нити), большой расход сырья относительно требуемой застилостости, а также трудность достижения высоких значений объемного наполнения.

Витебский государственный технологический университет

3.3.3 Плетеные структуры

Плетеные текстильные изделия могут обладать как стабильностью размеров, так и формуемостью в зависимости от структуры и вида переплетения систем нитей (рисунок 3.10 в). Виды плетеных изделий весьма разнообразны и включают полые трубчатые рукава, сплошные цилиндры, полотна, стержни квадратного сечения и др. Структура перечисленных изделий может включать проложенные (непереплетенные) системы нитей, расположенные между переплетаемыми нитями. Плетеные структуры с проложенными нитями или с уплотненными схемами плетения обладают хорошим сопротивлением растяжению в направлении проложенных нитей и одновременно плохо сопротивляются сжатию в этом направлении.

3.3.4 Нетканые текстильные материалы

Наиболее широко распространенной разновидностью арматуры из неориентированных волокон являются волокнистые маты. Они состоят из рубленных или штапельных хаотически расположенных элементарных нитей, механически или химически связанных между собой. Длина отдельных волокон составляет, как правило, 20 – 50 мм. Снижение длины волокна ниже 20 мм приводит к резкому падению прочности, увеличение же длины волокон выше 50 – 70 мм приводит к ухудшению формуемости материала, не давая при этом существенного увеличения прочности. В химически связанных матах связующее (его наносят около 5 %) соединяет отдельные пряди и удерживает их вместе, придавая мату достаточную прочность, необходимую при укладке в процессе формования. В механически связанных матах волокна скреплены между собой механическим путем – прошивкой и взаимным сцеплением. Они лучше поддаются смачиванию связующим и формованию.

3.4 Свойства армирующего текстильного компонента, влияющие на пропитывание связующим и адгезионный процесс

Свойства текстильных материалов, влияющие на конечные показатели композиционных текстильных материалов, можно разделить на три группы:

1) определяющие адгезионную активность текстильного материала, а именно его приповерхностных слоев по отношению к связующему;
2) определяющие потенциальную доступность внутреннего объема текстильного материала для растворов и расплавов полимерного связующего;

Витебский государственный технологический университет

3) влияющие на механизм разрушения адгезионного соединения , при котором может происходить частичное повреждение поверхности текстильного материала.

Характеристики волокон, пряжи и ткани, влияющие на их взаимодействие со связующим, представлены на рисунке 3.11.

Текстильные материалы состоят из природных, искусственных и синтетических волокнообразующих полимеров. На адгезионный процесс и его результативность влияют:

- ♦ химические, электрические, геометрические, электрокинетические свойства, а также прочность волокон и нитей;
- ♦ термостойкость.

Рисунок 3.11 – Характеристики волокон, пряжи и ткани, влияющие на их взаимодействие со связующим

3.4.1 Химические свойства

Потенциальными активными центрами, на которых может происходить адгезионное связывание полимерных композиций, являются функциональные группы элементарных звеньев волокнообразующих полимеров, концевые группы макромолекул, остальные элементы цепи главных валентностей и боковые группы. К возможным силам межфазного взаимодействия связующего и волокна

Витебский государственный технологический университет

относятся силы от межмолекулярных физических до ковалентных химических.

Активные центры основных видов волокон участвуют в образовании различных по характеру и энергии типов связей (таблица 3.6).

Природные полимеры имеют в своем составе полярные функциональные группы, определяющие высокую химическую активность этих полимеров. С позиции адгезии и прочности получаемых соединений важной является способность волокон образовывать с макромолекулами связующего прочные связи от водородных до ковалентных.

Таблица 3.6 – Активные центры волокнообразующих полимеров

Волокно	Строение активных центров	Типы связей, возникающие между волокном и связующим
Целлюлозное	$[C_6H_7O_2(\mathbf{OH}^*)_3]_n$	Водородные , Ван-дер-Ваальсовы силы, ковалентные
Белковое (шерсть,шелк)	-SH (для шерсти), $-NH_2$, -NH-, -OH, =NH, -COOH, $-(CH_2)_n-$	Ионные, координационные, водородные, ковалентные
Полиамидное	$-NH_2$, -COOH, CONH	Ионные, координационные, водородные, Ван-дер-Ваальсовы силы, ковалентные
Полиэфирное	-OH, CO-O-, $-(CH_2)_n-$	водородные, Ван-дер-Ваальсовы силы
Полиакрилонитрильное	$-CH_2-CH-$ CN	Ионные, водородные, Ван-дер-Ваальсовы силы

3.4.2 Природа волокна

На пропитывающие свойства текстильного материала оказывает влияние природа волокна.

По мере снижения способности смачиваться водными растворами волокна можно расположить в такой последовательности: вискозное > хлопковое > поливинилспиртовое > полиамидное > полиэфирное > полипропиленовое, что согласуется с уменьшением гидрофильности волокон.

На рисунке 3.12 изображены кинетические кривые, характеризующие способность различных синтетических волокон пропитываться латексом с содержанием сухого остатка 400 г/л. Капроновое, нитроновое волокна пропитываются латексом примерно одинаково. По способности пропитываться латексом они близки к

Витебский государственный технологический университет

гидрофильному хлопковому волокну. Полиэфирное волокно пропитывается латексом значительно хуже, что, очевидно, объясняется присутствием в молекулах этого волокна сравнительно слабополярных эфирных групп и плотной упаковкой макромолекул, способствующей взаимодействию этих групп друг с другом.

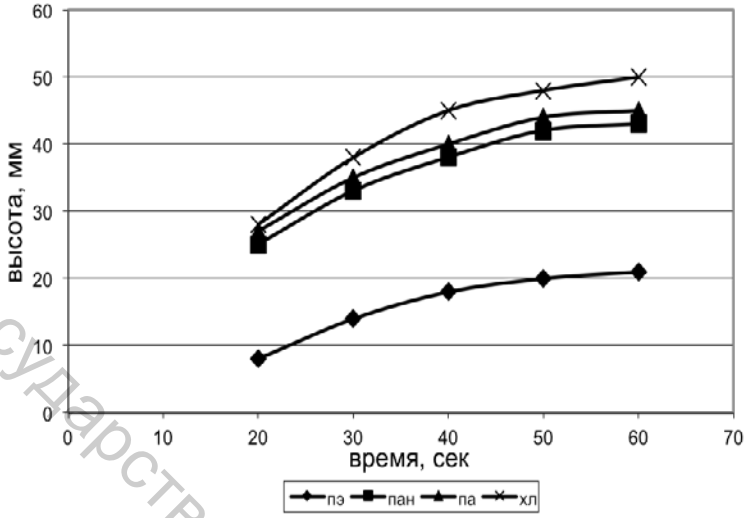


Рисунок 3.12 – Кинетика пропитывания волокнистых материалов

При выборе природы армирующего текстильного компонента для производства композиционного материала специального назначения необходимо учитывать его преимущества и недостатки (таблица 3.7).

Таблица 3.7 – Преимущества и недостатки химических волокон

Наименование волокна	Преимущества	Недостатки
Вискозное	Характеризуется высоким начальным модулем, сохранением прочности при повышении температуры (100-110 ^{0}C)	Сравнительно невысокая прочность, особенно во влажном состоянии
Полиамидное	Высокая прочность, термостойкость и усталостная выносливость	Низкий модуль упругости, недостаточная устойчивость к фотоокислительным воздействиям, гладкая поверхность. Трудность достижения фактора формы
Стекловолокно	Высокий модуль упругости, прочность, отсутствие текучести при длительной нагрузке, устойчивость к термической деструкции и гидролитическому влиянию, невысокая стоимость	Незначительная стойкость к утомлению при динамической нагрузке, высокая плотность волокна, значительный абразивный износ оборудования в процессе переработки стеклонаполненных композитов

Витебский государственный технологический университет

Окончание таблицы 3.7

Арамидное	Обладает химической стойкостью, прочностью, сохраняет свои высокие механические свойства при повышенных температурах и в присутствии влаги	Обладает гладкой поверхностью, а следовательно, недостаточная проч-ность связи между волокнами и эластомерной матрицей, и вследствие этого снижение усиливающей способности
Поливинилспирто-вое	Обладает высокой прочностью, высокомодульностью, стойкостью к действию кислот, щелочей. Имеет хорошие адгезионные свойства по отношению к полимерам	Высокая гигроскопичность, необходимость обработки сшивающим агентом, высокая стоимость производства
Углеродное	Высокие удельные механические свойства, стойкость к действию высоких температур, тепловому старению, обладает электропроводностью	Низкая износостойкость к окислителям, хрупкость
Полиэфирное	Обладает высоким начальным модулем, термостойкостью, эластичностью	Имеет гладкую неразвитую поверхность, химически инертны, поэтому проявляют низкие адгезионные свойства

3.4.3 Электрические свойства

Связи между волокном и связующим имеют электрическую природу. Поэтому при их разрушении происходит эмиссия быстрых электронов, интенсивность которой зависит от числа прореагировавших донорно-акцепторных пар, наблюдаются электрические явления, которые лежат в основе электронной теории адгезии [19]. С помощью этого метода можно косвенно определить интенсивность межмолекулярного взаимодействия текстильных материалов с разными связующими.

Например, замена неполярного полиэтилена на другое связующее – полярный полиамид – сопровождается значительным увеличением интенсивности вылета электронов, что является следствием различия природы возникающих межмолекулярных сил на границе раздела «текстильный материал – связующее».

Соединение волокна и связующего, для которого характерна большая интенсивность эмиссии электронов, обладает и более высокой прочностью.

Поверхностные свойства текстильных материалов определяются структурой поверхности, наличием на ней свободных функциональных групп, силовые поля которых не скомпенсированы межмолекулярным взаимодействием, то есть свободной поверхностной энергией.

Витебский государственный технологический университет

Экспериментально определить величину свободной поверхностной энергии довольно трудно, ее оценивают косвенными методами.

Низкие значения величины поверхностной энергии полиэтилена определяют его низкую адгезионную способность по сравнению с полиамидом.

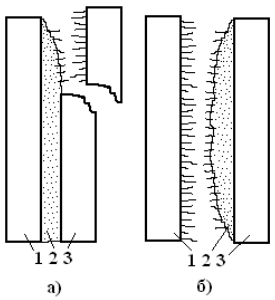
3.4.4 Прочность волокон

Анализ состояния поверхности текстильных материалов показал, что при разрушении текстильного композита происходит выдергивание волокон из текстильного компонента, разрыв волокон, разрушение массы связующего. Можно предположить, что прочность соединения связующего с текстильным компонентом напрямую зависит от прочности волокон, составляющих текстильный материал и степени их закрепления в нем.

При исследовании прочности соединения между слоями текстильных слоистых композитов [8] нами использовались образцы текстильных обоев с применением бумаги и декоративной ткани из короткого льняного волокна, плотностью по основе 49 нитей на 10 см, по утку – 34 нити на 10 см, с использованием чистольняной пряжи линейной плотностью 317 текс.

По результатам проведенных исследований установлено, что под действием прилагаемых нагрузок разрушения текстильных обоев происходят по связующему и нетканому материалу, установлено, что внешняя расслаивающая нагрузка не приводит к разрушению полотна ткани *1* и разрушению по массе связующего *2*, а чаще всего вызывает:

- разрушение полотна основы *3* (рисунок 3.13 а);
- разрыв волокон, внедренных в структуру клея *2* (рисунок 3.13 б).



а – с разрушением полотна бумаги; б – с разрывом волокон
1 – полотно ткани; 2 – клей; 3 – полотно бумаги

Рисунок 3.13 – Разрушение клеевых соединений текстильных настенных покрытий при испытании на раздирание

В ходе экспериментальных исследований определялся процент разрушения клеевого соединения, приходящийся на разрыв полотна бумаги и на разрыв волокон ткани (рисунок 3.14).

Витебский государственный технологический университет

В результате разрушения образцов текстильных настенных покрытий полученные результаты разбивались на 9 групп, в зависимости от усилий при раздирании, и в каждой группе находился процент разрушений, приходящихся на бумагу, и процент разрушений, приходящихся на волокна (рисунок 3.14).

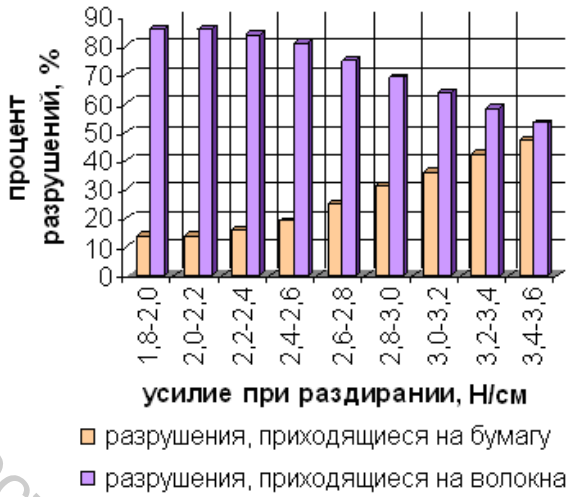


Рисунок 3.14 – Определение процента разрушений, приходящихся на бумагу и волокна

Установлено, что основной причиной разрушений клеевого соединения является разрыв волокон, причем процент данных разрушений тем выше, чем ниже прочность образца текстильных настенных покрытий при раздирании. Таким образом, прочность соединения связующего с текстильным материалом определяется прочностью волокон ткани.

3.4.5 Геометрические свойства текстильных материалов

Пропитывающая способность текстильного материала зависит от геометрических свойств текстильного материала (общая пористость и структура текстильного материала). Чем больше внешняя поверхность текстильного материала (волокна или нити), тем больше макромолекул полимерного связующего может на ней разместиться.

Почти все текстильные волокна имеют сложную геометрию поверхности. Форма поперечного сечения и особенности поверхности волокон зависят от условий и получения, вида исходного полимера и метода получения (для химических волокон). Геометрические характеристики химических волокон представлены в таблице 3.8.

Из приведенных в таблице 3.8 данных видно, что фактор формы может изменяться в широких пределах. При этом следует отметить, что даже применяя волокна одной природы практически невозможно обеспечить постоянство длины волокнистого наполнителя, так как

Витебский государственный технологический университет

волокна, взятые в виде отрезков, а тем более в виде отходов, чрезвычайно неоднородны по размерам. Неоднородность длин ведет к значительным колебаниям фактора формы наполнителя, что, в свою очередь, отражается на нестабильности свойств композиционных материалов. Для оптимального усиления требуется, чтобы фактор формы волокна составил 100 – 200.

Таблица 3.8 – Геометрические характеристики химических волокон

Волокно	Диаметр или размер поперечного сечения, мкм	Длина, мм	Фактор формы L/D
Вискозное	13 27,3 20-30	37,5 6,35-63,5 0,4;3-4,5	2885 233-2326 13,3-20;15-150
Полиамидное	27 16-34 15	2,5-10 8; 2-15 38	93-370 125-441 2533
Полиэфирное	25 20-30	6,35-38,1 3-4,5;12,5	252-1521 15-150;417
Полиакрилонитрильное	16-18	34-36	2060
Поливинилспиртовое	25,6 10,4	4,76 19	186 1827
Арамидное	12,1-12,4 12	6,35-38,1 6,35	525-3149 529
Углеродное	8 10-12 13	6,35 3-10 6,35	794 300-833 488
Стеклянное	8 10	5,1-25,4 2;4;6;8; 12	638-3175 200;400;600;800

Под пористостью в общем случае понимают обусловленное структурой свойство твердых тел, выражающееся в наличии в них

Витебский государственный технологический университет

пустых промежутков (пор) между отдельными зернами, слоями, кристаллическими образованиями и другими элементами тела. Число пор, форма, размеры и распределение по размерам могут быть весьма различными и определяются природой полимера и способами получения материала.

У растительных волокон (хлопковых, лубяных) на поверхности имеются поперечные кольца, трещины, а у шерсти – очень сложный чешуйчатый слой. Все эти образования увеличивают внешнюю поверхность и отражаются на адгезионной способности волокон.

Поверхность химических волокон не является абсолютно гладкой, для нее характерны продольная бороздчатость или поперечные полосы, могут иметься дефекты поверхности (трещины, поры и др.), которые увеличивают внешнюю поверхность волокон. Кроме того, сорбционные свойства химических волокон увеличиваются в случае использования при их формировании специальных профилированных фильер.

Наличие в волокнах разветвленной системы пор позволяет полимерным связующим затекать в них, что увеличивает площадь контакта и прочность адгезионного соединения за счет механической составляющей.

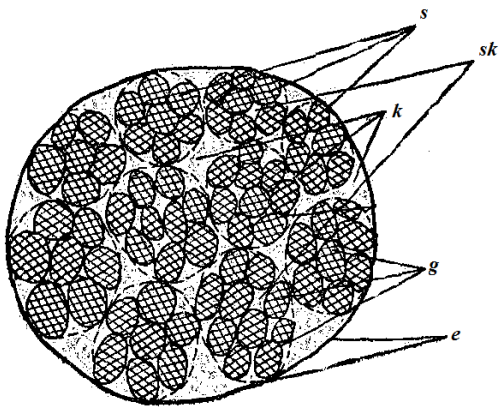
Текстильные материалы имеют капиллярную структуру, которая складывается из микроструктуры вещества волокна, из которого она состоит, и из макроструктуры самого материала.

Согласно схеме (рисунок 3.15) строения растительного волокна по Фрей-Висслингу [16], одиночные текстильные волокна являются пучком микроскопических фибрилл, между которыми расположены микроскопические капиллярные пространства. В свою очередь микроскопические фибриллы состоят из пучков субмикроскопических фибрилл, между которыми находятся сравнительно грубые щели и пустоты шириной 5 – 13 нм, чередующиеся с тонкими капиллярами, которые обладают диаметром не более 1 нм. Микроскопические и субмикроскопические капиллярные пространства обусловливают всасывание жидкостей сухими волокнами при набухании.

Строение животного волокна гораздо более сложно, чем строение растительного, так как шерстяное волокно состоит из большего числа клеток.

Структура химических волокон значительно проще, хотя эти волокна в большинстве случаев также состоят из связанных между собою кристаллитов. Отпадают некоторые морфологические особенности волокна: существование фибрилл, наличие центрального канала и т. д.

Витебский государственный технологический университет



s – щели между кристаллами; sk – субмикроскопические капиллярные пространства; k – микроскопические капиллярные пространства; g – кристаллические пространственные решетки; e – отдельное волокно

Рисунок 3.15 – Капиллярная структура растительного волокна

Макроструктура волокнистых материалов, сформированных из таких волокон, зависит от способов получения (прядение, ткачество, тот или иной способ формирования нетканых основ и т. п.) При этом наряду с тонкой пористостью, присущей самим волокнам, формируются поры большего диаметра.

Таким образом, на пропитывание текстильного материала полимерным связующим значительное влияние оказывает структура и диаметр пор волокнистого материала. Поскольку капиллярная структура таких материалов, как волокнистые холстики, состоящие из нетканых текстильных волокон, и сравнительно рыхлые корды, непостоянна и сильнейшим образом зависит от внешних условий (давления, под которым находится материал, его натяжения и т. д.), говорить о влиянии в этом случае структуры на пропитывание нет смысла. Кроме того, эти материалы, как правило, достаточно рыхлы и расстояние между их отдельными волокнами обычно значительно больше диаметра частиц пропитывающих дисперсии, что делает пропитывание очень легким и исключает вопрос об отфильтровывании в этом случае дисперсной фазы.

Иное дело ткани, в особенности плотные многослойные, в которых капилляры имеют достаточно определенные размеры, хотя и способные меняться в известных пределах в зависимости от внешних воздействий. К сожалению, вопрос о влиянии структуры ткани и размеров капилляров на пропитывание изучался весьма мало, несмотря на его большое практическое значение.

Одной из основных технологических операций формирования композиционных текстильных материалов способом импрегнирования является пропитка текстильной основы. На эффективность данного процесса оказывает большое влияние ее капиллярная структура. Капиллярные процессы возможны благодаря пористости материала.

Витебский государственный технологический университет

Пористость – характеристика материала, совокупная мера размеров и количества пор в твёрдом теле. Является безразмерной величиной от 0 до 1 (или от 0 до 100 %). Ноль соответствует материалу без пор; 100-процентная пористость недостижима, но возможны приближения к ней [37].

Общая пористость текстильного материала слагается из:

– сквозной пористости (поры между нитями основы и утка);

– поверхностной пористости (межволоконные поры, находящиеся в промежутках между волокнами нитей основы и утка);

– внутренней пористости (поры, расположенные на поверхности ткани в углублениях, образуемых изгибами основных и уточных нитей) [38].

Следовательно, на этапе проектирования тканой основы для композиционных текстильных материалов целесообразно определение сквозной пористости тканой армирующей основы, которая позволит определить процент свободного пространства между нитями основы и утка, оценить эффективность процесса формирования композита и правильность выбранного переплетения.

Известно [18], что в процессе пропитки тканой основы пропитывающее вещество удерживается тем прочнее, чем ниже показатель пористости. В свою очередь, величина пористости не должна быть ниже заданных пределов: согласно данным литературы, величина пористости тканой основы, обеспечивающая оптимальную эффективность пропитывания, должна быть не менее 10 %.

Таким образом, необходимо осуществлять проектирование тканой армирующей основы КТМ по показателю сквозной пористости.

Известна теория В.П Склянникова [39], которая основана на том, что сквозная пористость тканой основы зависит от наличия в ней свободных полей. С увеличением длин перекрытий нитей в тканых основах возрастает вероятность образования в них свободных полей, что приводит к увеличению сквозной пористости. Согласно этой теории, расчет свободных полей рассматриваемого переплетения сводится к определению коэффициента уплотненности при максимальном наполнении.

Нами разработан экспресс-метод проектирования структуры тканой основы композиционного материала [40] с целью определения оптимальной величины сквозной пористости через отношение коэффициентов уплотненности:

$$q = \frac{К_{уп_ф}}{К_{уп_{max}}}. \qquad (3.19)$$

Коэффициент уплотненности рассчитывается по формуле

Витебский государственный технологический университет

$$K_{УП_Ф} = \frac{C_{О(У)}{}^2 \cdot \left(P_О{}^2 \cdot T_О + P_У{}^2 \cdot T_У\right) \cdot \left(\sum \frac{1}{n_{f_О}} + \sum \frac{1}{n_{f_У}}\right)_{О(У)_R}}{316^2 \cdot t_{О(У)_{СР}} \cdot R_{О(У)}}, \quad (3.20)$$

где $n_{f_о}, n_{f_у}$ – количество основных и уточных перекрытий, расположенных подряд на каждой нити основы и утка в пределах раппорта;

$R_о$ – раппорт переплетения по основе;

$t_{о_i}$ – число пересечений утка основой на $n_{Н_{о.i}}$ соответствующих нитях основы в пределах раппорта рассматриваемого переплетения;

$C_о$, $C_у$ – коэффициенты сырьевого состава нитей основы и утка, соответственно;

$T_о$, $T_у$ – линейная плотность нитей основы и утка, соответственно, текс;

$P_О$, $P_у$ – плотность тканой основы по основе и утку, соответственно, нит/см.

Тогда относительный коэффициент для системы нитей основы и утка, %:

$$q_о = \frac{q}{З_о} \cdot 100, \quad (3.21)$$

$$q_у = \frac{q}{З_у} \cdot 100, \quad (3.22)$$

где $З_о$, $З_у$ – заполнение тканой основы вдоль нитей основы и утка, соответственно, %:

$$З_о = \mu_о \cdot P_о, \quad (3.23)$$

$$З_у = \mu_у \cdot P_у, \quad (3.24)$$

где $\mu_о$ и $\mu_у$ – максимальные размеры поперечного сечения нити в ткани вдоль большой оси при деформации, мм:

$$\mu_о = d_о \cdot \eta_{ог}, \quad (3.25)$$

$$\mu_у = d_у \cdot \eta_{уг}. \quad (3.26)$$

Витебский государственный технологический университет

Выражая значения величины заполнения тканой основы вдоль нитей основы и утка в % через относительный коэффициент q, получим

$$З_о = \frac{q \cdot 100}{q_о}, \quad (3.27)$$

$$З_у = \frac{q \cdot 100}{q_у}. \quad (3.28)$$

Теоретическое значение сквозной пористости тканой основы композиционного текстильного материала, %:

$$P_{R_{скв.т.}} = 100 - \frac{q \cdot 100}{q_О} - \frac{q \cdot 100}{q_У} + 0{,}01 \cdot \frac{q \cdot 100}{q_О} \cdot \frac{q \cdot 100}{q_У}. \quad (3.29)$$

Для расчета фактической сквозной пористости необходимо задать следующие параметры строения тканой основы:

– вид и линейная плотность нитей основы;
– вид и линейная плотность нитей утка;
– плотность по основе;
– плотность по утку.

Учитывая, что раппорт состоит из $n_о$ нитей основы и $n_у$ нитей утка, определим расстояние, которое занимают нити обеих систем, мм:

$$L_о = \mu_о \cdot n_{о.нит}, \quad (3.30)$$

$$L_у = \mu_у \cdot n_{у.нит}, \quad (3.31)$$

где $n_{о.нит}$ и $n_{у.нит}$ – число нитей основы и утка в раппорте, соответственно.

Определим размер раппорта вдоль нитей основы и утка, мм:

$$L_{R_о} = n_{о.нит} \cdot P_о, \quad (3.32)$$

$$L_{R_у} = n_{у.нит} \cdot P_у. \quad (3.33)$$

Зная размер раппорта в ткани и расстояние, занимаемое нитями, определим величину сквозного пространства (пустот) – сквозные поры между нитями основы и утка, мм:

$$L_{P_о} = L_{R_о} - L_о, \quad (3.34)$$

$$L_{P_у} = L_{R_у} - L_у. \quad (3.35)$$

Витебский государственный технологический университет

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

$$a = \frac{L_{P_o}}{n_{o.пор}}, \quad (3.36)$$

$$b = \frac{L_{P_y}}{n_{y.пор}}, \quad (3.37)$$

где $n_{o.пор}$ и $n_{y.пор}$ – число сквозных пор в раппорте вдоль системы нитей основы и утка, соответственно.

Определим периметр сквозной поры, мм:

$$P = 2 \cdot a + 2 \cdot b. \quad (3.38)$$

Площадь сквозной поры, мм^2:

$$S = a \cdot b. \quad (3.39)$$

Суммарная площадь всех сквозных пор на раппорт, мм^2:

$$S_{общ} = S \cdot n_{пор}, \quad (3.40)$$

где $n_{пор}$ – общее число сквозных пор в раппорте.

Далее определим площадь, занимаемую раппортом переплетения, мм^2:

$$S_R = L_{R_o} \cdot L_{R_y}. \quad (3.41)$$

Отсюда получим, что доля сквозных пор на весь раппорт переплетения –
фактическая сквозная пористость тканой основы композиционного материала, %:

$$P_{R_{СКВ.Ф.}} = \frac{S_{общ}}{S_R} \cdot 100. \quad (3.42)$$

Нами изучалось влияние структуры ткани на пропитывающие свойства при формировании декоративных композиционных текстильных материалов. С учетом назначения таких материалов тканая основа должна обладать рядом специфических свойств:

– эстетичный внешний вид;

Витебский государственный технологический университет

– высокие физико-механические показатели: разрывная нагрузка, удлинение, стойкость к истирающим воздействиям;

– достаточной капиллярностью для взаимодействия со связующим компонентом в процессе формирования композиционного материала способом импрегнирования.

Рисунки тканей для формирования декоративных текстильных композитов представлены на рисунках 3.16, 3.17, 3.18.

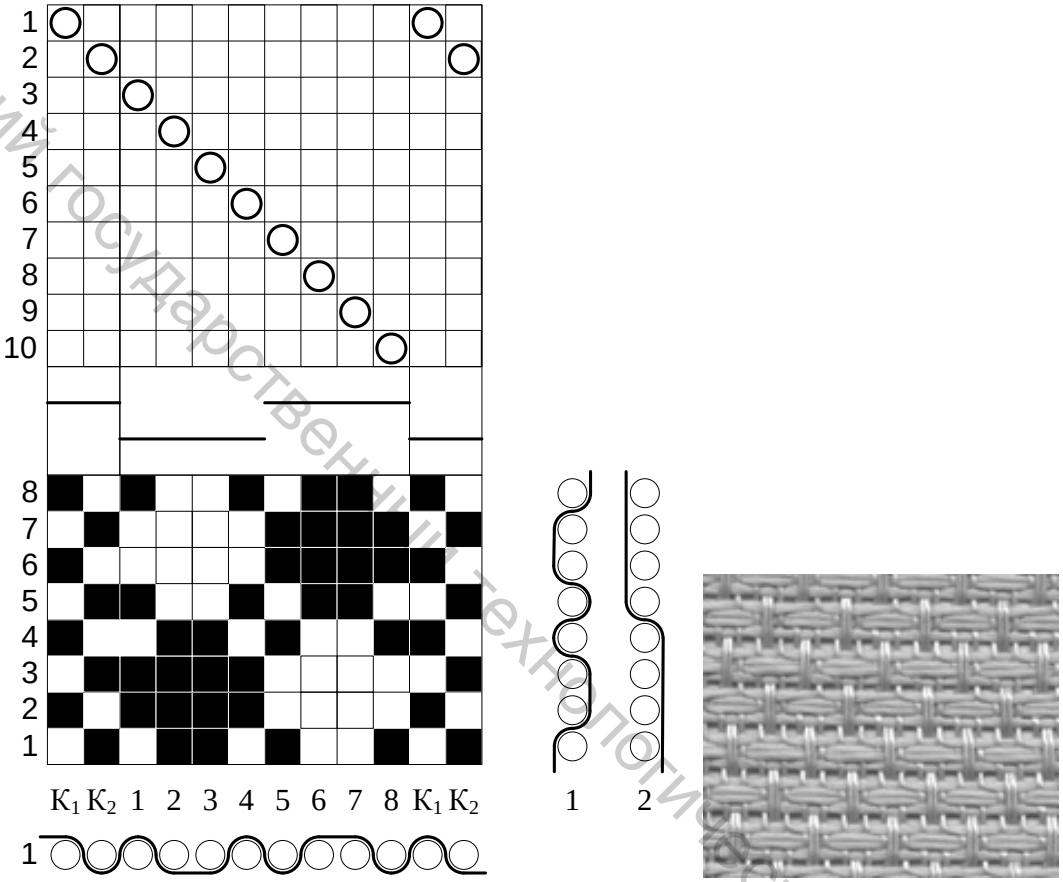


Рисунок 3.16 – Комбинированное переплетение на базе репса 4/4 (Ro = 8 нитей, Ry = 8 нитей, Zф = 4, Zкр = 2)

Витебский государственный технологический университет

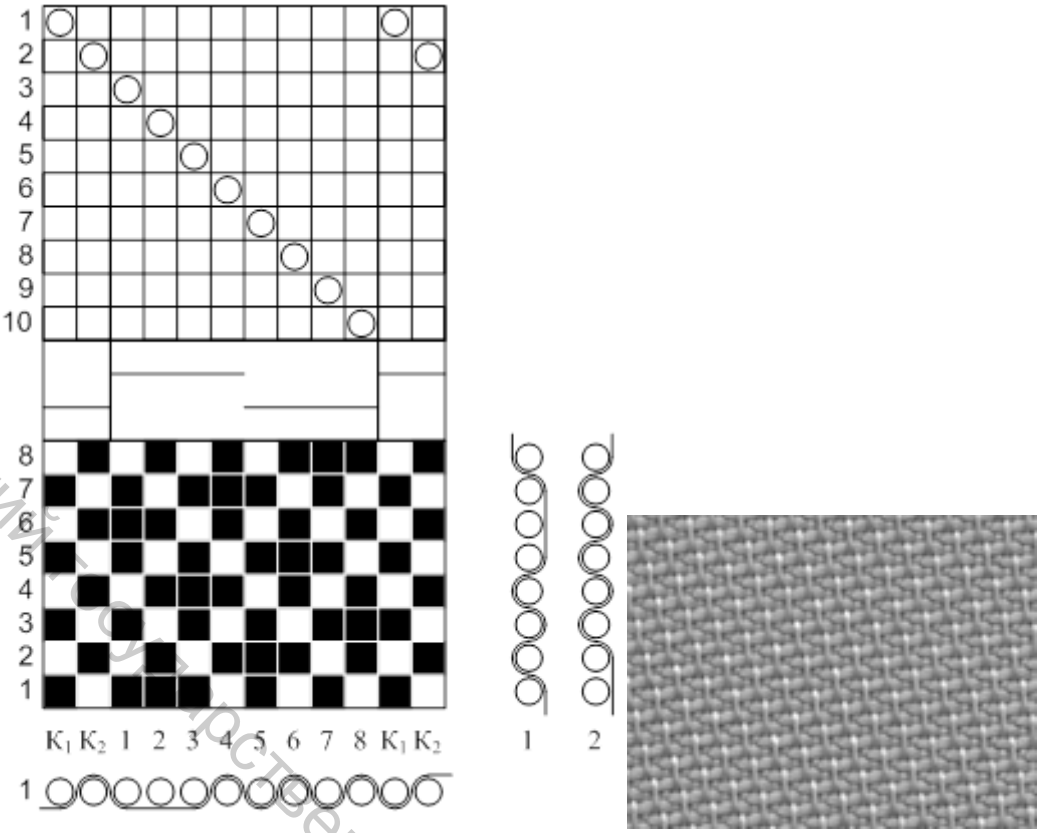


Рисунок 3.17 – Креповое переплетение на базе полотняного (Ro = 8 нитей, Ry = 8 нитей, Zф = 4, Zкр = 2)

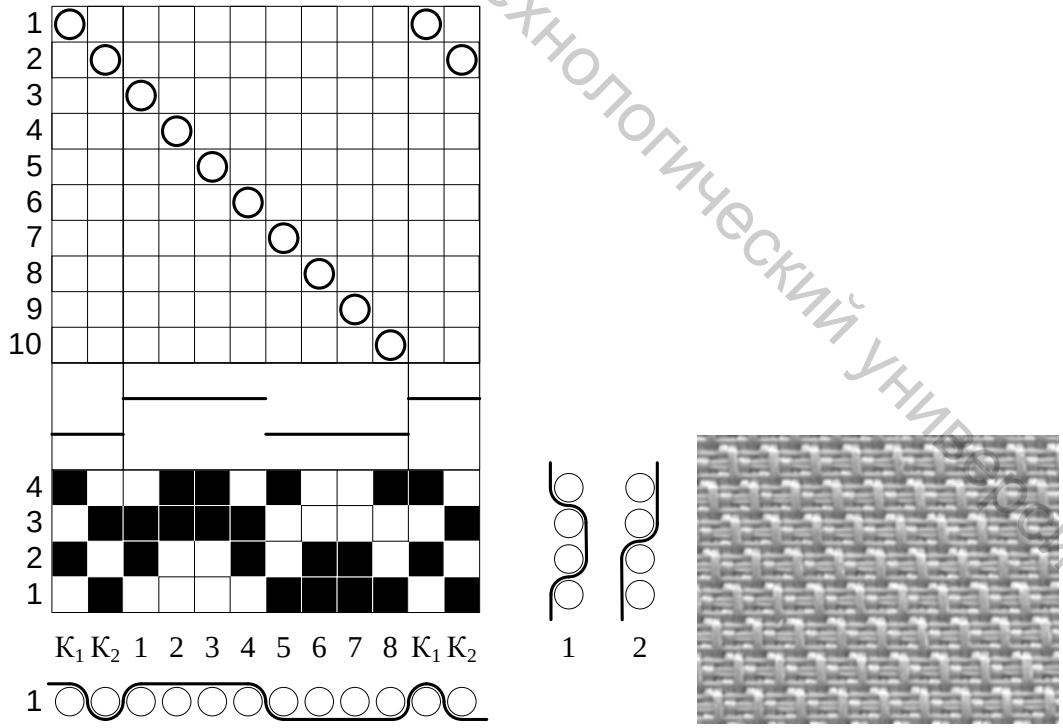


Рисунок 3.18 – Креповое переплетение (Ro = 8 нитей, Ry = 4 нити, Zф = 4, Zкр = 2)

Витебский государственный технологический университет

Таблица 3.9 – Основные физико-механические показатели опытных образцов

Наименование параметра	**Комбинированное переплетение на базе репса 4/4**	**Креповое переплетение на базе полотняного**	**Креповое переплетение**
Линейная плотность нитей, текс: – основы – утка	195,0 390,0		
Ширина суровой тканой основы, см	282,4		
Плотность, нит/ 10 см: – по основе – по утку	80,0 62,0	87,0 62,0	85,0 62,0
Поверхностная плотность, г/м^2	410,0	460,0	417,0
Разрывная нагрузка, Н: – по основе – по утку	1396,0 1970,0	1518,4 1473,6	1678,0 1346,0
Разрывное удлинение, %: – по основе – по утку	21,7 17,9	18,4 15,1	5,2 11,8
Стойкость к истиранию, циклы	1000,0	798,0	890,0

С учетом анализа результатов исследования физико-механических свойств тканей для основы декоративных композиционных материалов (таблица 3.9) и визуальной оценки можно сделать вывод, что наиболее эстетичный внешний вид и высокие физико-механические показатели имеет образец тканой основы комбинированного переплетения на базе репса 4/4.

Оценка капиллярности опытных образцов тканой основы проводилась в соответствии с методикой, изложенной в ГОСТ 3816 – 81 [41]. Проведены экспериментальные исследования по определению высоты капиллярного подъема водной дисперсии стирол-акрилата (мм) в образце тканой основы.

Условия проведения эксперимента: концентрация полимерной композиции при фиксированном значении – 100 г/л, время проведения эксперимента – 30 минут, температура – 20 ^{0}С. Результаты эксперимента представлены на рисунке 3.19.

Анализируя результаты, можно сделать вывод, что тканая основа комбинированного переплетения на базе репса 4/4 обеспечивает наилучшие показатели капиллярности для тканой основы текстильных композитов, полученных способом импрегнирования. Для того, чтобы пропиталась структура двух других образцов, необходимо затратить больше времени, что приведет к снижению производительности

Витебский государственный технологический университет

процесса получения композиционных текстильных материалов, удорожанию конечной продукции.

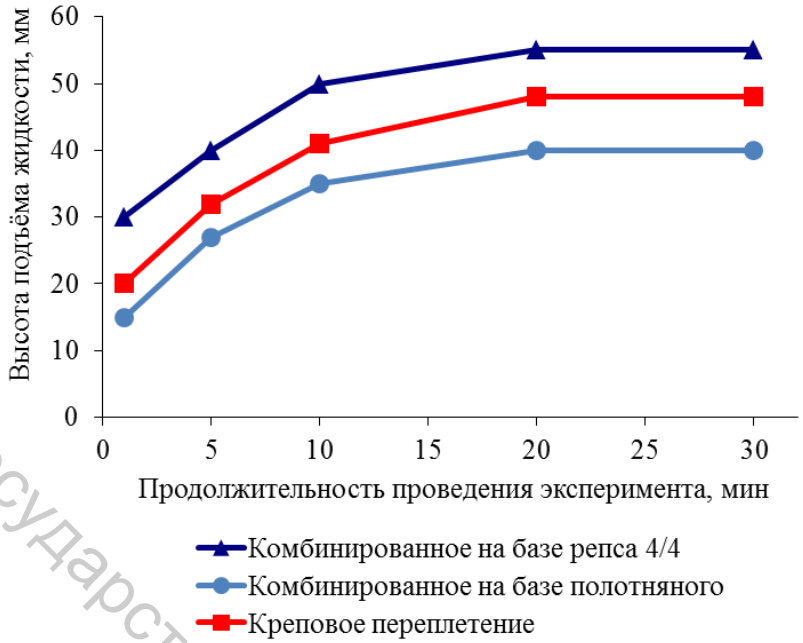


Рисунок 3.19 – Зависимость высоты капиллярного подъема полимерной композиции в тканых основах различного вида переплетения

Говоря о влиянии на пропитывание структуры волокнистых материалов типа тканей, можно сделать общий вывод: чем меньше плотность ткани, чем шире в ней капилляры, тем легче происходит проникновение дисперсии в ее поры.

Весьма существенным является вопрос о соотношении диаметра пор ткани и размера частиц дисперсии, так как это соотношение может определять проникновение или непроникновение частиц дисперсной фазы в ткань при пропитывании. Однако поскольку размер частиц латексов составляет обычно доли микрона, а диаметр наиболее тонких капилляров даже самых плотных многослойных тканей, редко бывает меньше 10 мк, то с отфильтровыванием дисперсной фазы при пропитывании тканей в обычных условиях можно не считаться. Отфильтровывание может происходить только в том случае, если пропитывание ведется дисперсиями с очень грубыми частицами или если в дисперсии, благодаря ее малой агрегативной устойчивости, образуются агрегаты, состоящие из нескольких частиц. Отфильтровывание может происходить также при сорбционно неустойчивой дисперсии — в этом случае дисперсная фаза обычно отлагается в поверхностных слоях ткани. Однако все эти случаи представляют собой исключение.

Витебский государственный технологический университет

4 СПОСОБЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Различают следующие способы формирования композиционных текстильных материалов:

аэродинамический – процесс нанесения волокнистых частиц потоком сжатого воздуха на основу с клеевой пленкой, в результате которого волокна, внедряясь в клеевую композицию, фиксируются на поверхности основы, образуя бархатистую поверхность;

механический – процесс нанесения сыпучего волокнистого материала дозирующим устройством на полотно основы с предварительно нанесенным полимерным связующим;

пропитывание (пропитка, импрегнирование) – обработка сформированных волокнистых систем (тканей, трикотажа, нетканых основ и т. п.) расплавами, растворами, дисперсиями полимеров, в результате которой пропитывающий состав проникает в капилляры и поры материала, затем растворитель или дисперсионная среда удаляется, а полимер остается в капиллярах и порах материала;

проклеивание – технологическая операция, состоящая в том, что расплав или дисперсия высокомолекулярного соединения смешивается с дисперсией раздробленных волокон и после удаления растворителя связывает их в единый однородный слой (холст, материал), при этом полимерное связующее играет роль клея, соединяющего полимерные волокна в местах их контакта;

склеивание – процесс образования клеевого соединения между компонентами слоистого композита, получение неразъемного соединения посредством установления между ними адгезионного взаимодействия с помощью клея в при нагревании, пластическом деформировании, внешнем давлении и последующем охлаждении всех компонентов.

Все технологии получения текстильных композитов направлены на создание условий для возможно более полного контакта между связующим и текстильным материалом. При этом первостепенное значение имеет правильный выбор условий формирования – усилия, температуры, продолжительности.

Основными и общими стадиями формирования композиционных текстильных материалов являются:

- образование зон контакта между связующим и текстильным материалом;
- формирование адгезионных связей между связующим и текстильным материалом;
- возникновение когезионной прочности связующего.

Витебский государственный технологический университет

4.1 Формирование композиционного текстильного материала с ворсовым покрытием аэродинамическим способом

В отраслевой научно-исследовательской лаборатории кафедры «Прядение натуральных и химических волокон» и «Химия» учреждения образования «Витебский государственный технологический университет разработан и запатентован новый способ получения многослойных текстильных материалов, основанный на аэродинамическом осаждении волокнистых частиц на подготовленную поверхность [42, 43]. В качестве волокнистого покрытия использовались коротковолокнистые отходы текстильного производства. На рисунке 4.1 представлена схема получения многослойных текстильных материалов (штучных и рулонных).

Рисунок 4.1 – Технологии получения многослойных (штучных и рулонных) материалов

Технологический процесс получения многослойного покрытия на штучных материалах подразумевает применение трафарета, что

Витебский государственный технологический университет

позволяет быстро и эффектно нанести ворсовой рисунок на различных штучных предметах, деталях кроя и др.

Предложенный способ имеет ряд преимуществ: позволяет получить покрытие типа бархат на любой основе; исключение дорогостоящего электрического поля, используемого при электрофлокировании, делает этот способ экономичным.

В качестве основы для производства многослойных текстильных композитов можно использовать различные по своей природе материалы: ткань, нетканый материал, бумагу, дерево, пластмассу, металл и др. При разработке технологии нами использовались в качестве основы бумага, ткань и нетканое полотно, свойства которых представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Свойства материала основы для формирования слоистого композита с ворсовым покрытием

Показатель	Значение показателя
Ткань льняная	
Поверхностная плотность, г/м^2	180 – 220
Стойкость к истиранию, не менее, циклы	3000
Переплетение	полотняное
Влажность, %	4 – 7
Относительная разрывная нагрузка, сН/текс: основа уток	 47,0 30,7
Бумага	
Поверхностная плотность, г/м^2	80 – 100
Разрушающее усилие в сухом состоянии, Н, не менее	55
Разрушающее усилие во влажном состоянии, Н, не менее	7
Влажность, %	4 – 7
Нетканое полотно (флизелин)	
Поверхностная плотность, г/м^2	65 – 70
Разрушающее усилие в сухом состоянии, Н, не менее	70
Разрушающее усилие во влажном состоянии, Н, не менее	3
Влажность, %	6 – 8

Вид клеевого состава, его рецептура подбираются в зависимости от вида основы. Для приклеивания ворса пригодны клеевые составы на основе поливинилового спирта, поливинилацетатной дисперсии, акриловые клея, клея на основе эпоксидных смол и др. Связующие должны соответствовать своему назначению, способствовать

Витебский государственный технологический университет

получению материала наиболее простым и экономичным способом, обеспечивать получение материала, в максимальной степени отвечающего требованиям его эксплуатации. В данной работе использовались клея на основе поливинилового спирта, поливинилацетатной дисперсии, клей на основе акриловой дисперсии, свойства которых представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Свойства клеевых составов

Показатель	Значение показателя
Клей на основе поливинилового спирта	
Назначение	Применяется для бумаги и нетканого материала (флизелин)
Концентрация, %	4 – 9
Растворимость в воде после высыхания	да
Клей на основе поливинилацетатной дисперсии	
Назначение	Применяется для бумаги, нетканого материала (флизелин), дерева, ткани
Адгезионная прочность, Н/см: для ткани для нетканого материала (флизелин)	 6,8 2,2
Растворимость в воде после высыхания	да
Клей на основе акриловой дисперсии	
Назначение	Применяется для бумаги, нетканого материала (флизелин), ткани
Адгезионная прочность, Н/см: для ткани для нетканого материала (флизелин)	 3,7 2,0
Растворимость в воде после высыхания	нет

4.1.1 Технологический процесс нанесения ворсового покрытия на штучный материал

Для осуществления способа получения ворсового покрытия на штучный материал спроектировано и запатентовано [43] мобильное аэродинамическое устройство, принципиальная схема которого представлена на рисунке 4.2. Принцип действия аэродинамического устройства заключается в следующем. В сырьевой патрубок 1 аэродинамического устройства помещается определенное количество волокнистых частиц 2. Сжатый воздух, поступающий от компрессора, с помощью пневмопистолета подается в сырьевой патрубок и транспортирует скоагулированные волокнистые частицы. При транспортировке волокнистых частиц сжатый воздух разбивает их коагулированные комочки о сита 3 на отдельные волокнистые частицы

Витебский государственный технологический университет

4. Применение в сите пильчатой ленты обеспечивает получение мелкодисперсной системы и отсутствие «залипания» частиц. Частицы при выходе из сопла 5 аэродинамического устройства фиксируются на обработанной клеевым составом поверхности 6 и образуют текстильное покрытие 7.

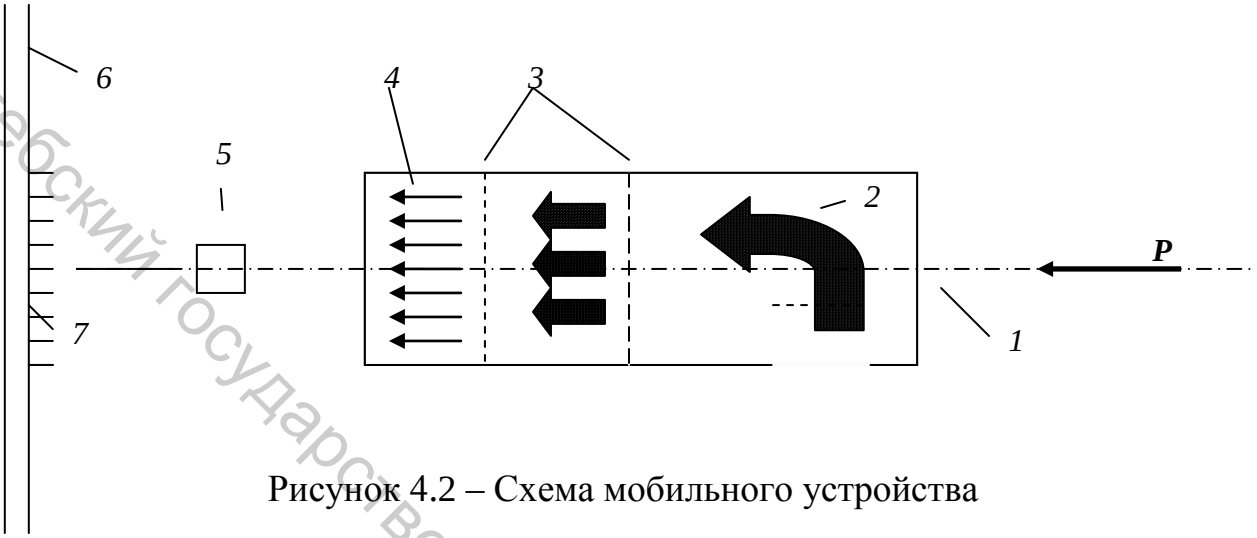


Рисунок 4.2 – Схема мобильного устройства

Последовательность технологических операций при аэродинамическом напылении следующая. К пневматическому пистолету присоединить сырьевой патрубок аэродинамического устройства. В корпус аэродинамического устройства вставить пильчатые сита и присоединить необходимую насадку. К штуцеру пневматического пистолета присоединить шланг от компрессора. Включить компрессор и нагнетать воздух до показания на манометре $2{,}0 \cdot 10^5$ Па. В корпус аэродинамического устройства поместить 10 – 15 г коротких волокон и плотно закрыть крышку аэродинамического устройства. Подготовить обрабатываемую основу (к подготовке в зависимости от основы относится ошкуривание, обеспыливание, обезжиривание, грунтовка). На обработанную поверхность нанести клеевой состав, при необходимости применить трафарет. Открыть клапан пневматического пистолета и напылить волокна на смоченную клеем основу. После высыхания очистить поверхность от излишков волокна.

В ходе предварительных исследований было выявлено, что на качественные показатели ворсового покрытия, такие, как стойкость покрытия к истиранию, плотность заполнения основы ворсом и коэффициент вариации по плотности заполнения основы ворсом оказывает влияние скорость потока при выходе из аэродинамического устройства и положение устройства по отношению к основе. Можно предположить, что определяющими факторами в процессе

Витебский государственный технологический университет

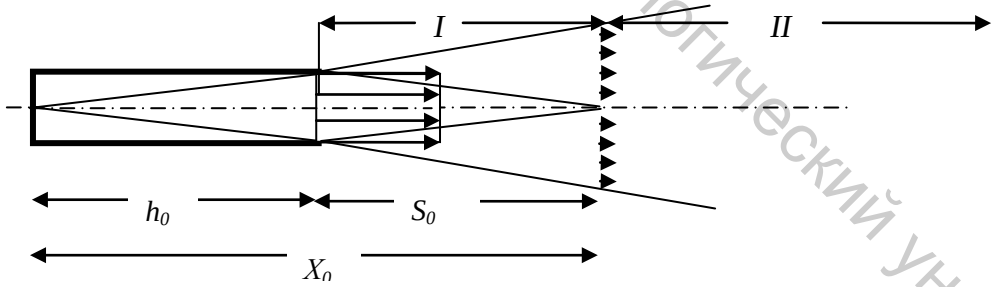
формирования многослойного покрытия являются давление сжатого воздуха, размер и форма сопла, расстояние от устройства до основы.

На первом этапе исследовалась зависимость качественных показателей многослойного покрытия от скорости волокнистых частиц перед внедрением их в клеевой состав.

В начальный момент времени скорость волокнистых частиц равна нулю, а струя сжатого воздуха движется с достаточно большой скоростью. Затем волокнистые частицы, попадая под воздействие воздушной струи, постепенно увеличивают свою скорость. На выходе из сопла устройства, в результате трения о неподвижный воздух, присоединения неподвижных слоев к воздушно-волокнистому потоку, увеличивается масса потока и скорость движения воздушно-волокнистой струи постепенно замедляется.

Известно [44], что при истечении сжатого воздуха из круглого сопла в атмосферу получается конусообразный воздушный факел, имеющий структуру, представленную на рисунке 4.3.

Доказано [44], что на некотором пути осевая скорость воздушной струи является постоянной и равной скорости истечения. Эта центральная часть струи, называемая ядром, окружена пограничным слоем, который вследствие контакта с окружающей атмосферой имеет по мере приближения к периферии постепенно понижающуюся скорость. Диаметр ядра струи по мере удаления от сопла уменьшается и, наконец, на некотором расстоянии S_0 ядро исчезает.



I – начальный участок;

II – основной участок;

h_0 – глубина полюса, мм;

S_0 – длина начального участка, мм;

X_0 – расстояние от полюса струи до конца начального участка, мм

Рисунок 4.3 – Структура воздушного факела

Витебский государственный технологический университет

Теоретически скорость волокнистых частиц ($Vч$) должна равняться скорости истечения сжатого воздуха из сопла устройства и в том случае, когда отношение давления во внешней среде $p2$ ($1 \cdot 10^5$ Па) к давлению перед соплом $p1$ ($(1{,}0024 \div 1{,}0056) \cdot 10^5$ Па) > β (β = 0,528), может быть рассчитана по формуле Сен-Венана [45]:

$$Vч = \sqrt{2g \frac{K}{K-1} RTo \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right]} \qquad (4.1)$$

где K – показатель адиабаты расширения, равный 1,4;

R – газовая постоянная, для воздуха равная 287, Дж/(кг град);

T_0 – температура воздуха при истечении в ^{o}К;

p_2 – давление во внешней среде, Па;

p_1 – давление перед соплом, Па.

Для начального участка струи (I) (рисунок 4.3) отношение скоростей по сечению начального участка VI к скорости истечения $V0$ равно 1 [44].

Для основного участка (II) это отношение определяется по формуле

$$\frac{VII}{V_0} = \frac{0.96}{\frac{aLc}{Ro} + 0.29}, \qquad (4.2)$$

где VII – осевая скорость в рассматриваемом сечении, м/сек;

V_0 – скорость истечения, м/сек;

a – экспериментальная константа, зависящая от структуры потока (для сопла диаметром 6 мм, а = 0,056; для сопла 10 мм, а = 0,055 [45]);

Lc – расстояние рассматриваемого сечения струи от начального, мм;

R_0 – радиус начального сечения струи, мм.

В таблице 4.3 представлено соотношение принятых безразмерных координат в зависимости от фактических размеров диаметра сопла и исследуемого расстояния для конкретных точек, зафиксированных от начала сопла (точка 1) через каждые 50 мм (точки 2, 3, 4, 5, 6, 7). На рисунке 4.4 представлена характерная кривая изменения относительной скорости струи от расстояния рассматриваемого сечения последней. График, представленный на рисунке 4.4, показывает, что наибольшей скоростью волокнистые частицы обладают в 2-х точках: на выходе из сопла (точка 1) и на небольшом расстоянии от сопла (точка 2 на расстоянии 50 мм от сопла).

Витебский государственный технологический университет

Таблица 4.3 – Исследование параметров двухфазной струи

Исследуемые точки	Участок струи	Расстояние *Lc* , мм	Радиус начального сечения, R_0 ,мм	Безразмерное расстояние, aLc/R_0
1	начальный	0	6	0,0000
2	начальный	50	6	0,4583
3	основной	100	6	0,9166
4	основной	150	6	1,3750
5	основной	200	6	1,8333
6	основной	250	6	2,2916
7	основной	300	6	2,7500

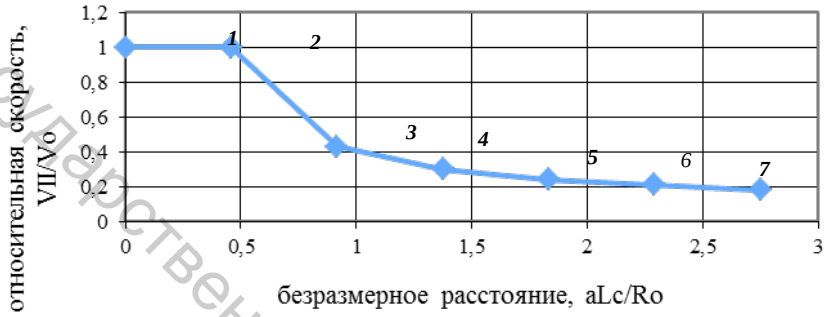


Рисунок 4.4 – Изменение скорости воздушной струи на различных расстояниях от сопла в безразмерных координатах

По результатам исследования установлено, что наилучшими качественными показателями при рабочем давлении сжатого воздуха, подаваемого в аэродинамическое устройство, в пределах $(1,5\div2)\cdot10^5$ Па, обладают материалы, образованные напылением волокнистых частиц с наибольшей скоростью. Скорость частиц, оптимальная для напыления, находится в зоне разделения начального и основного участка струи. Размер начального участка зависит от давления перед соплом и от диаметра сопла. Следовательно, задаваясь давлением сжатого воздуха перед соплом, можно определить скорость струи по ее оси, используя формулу Сен-Венана (4.1); по отношению скоростей по сечению струи к скорости истечения и диаметру сопла, формула (4.2), определяется оптимальное расстояние между соплом устройства и напыляемой основой. Результаты исследования влияния скорости воздушно-волокнистой струи на свойства многослойных текстильных материалов отражены в публикациях [46], [47] и [48].

Наблюдение за процессом напыления показало, что при выходе из сопла устройства практически все частицы движутся параллельно друг другу и с одинаковыми скоростями, по мере удаления от сопла, за счет смешения подвижного потока и неподвижных слоев воздуха, происходит изменение траекторий движения пограничных частиц. На

Витебский государственный технологический университет

рисунке 4.5 представлены траектории движения частиц воздушно-волокнистой струи, истекающей из сопла круглой формы.

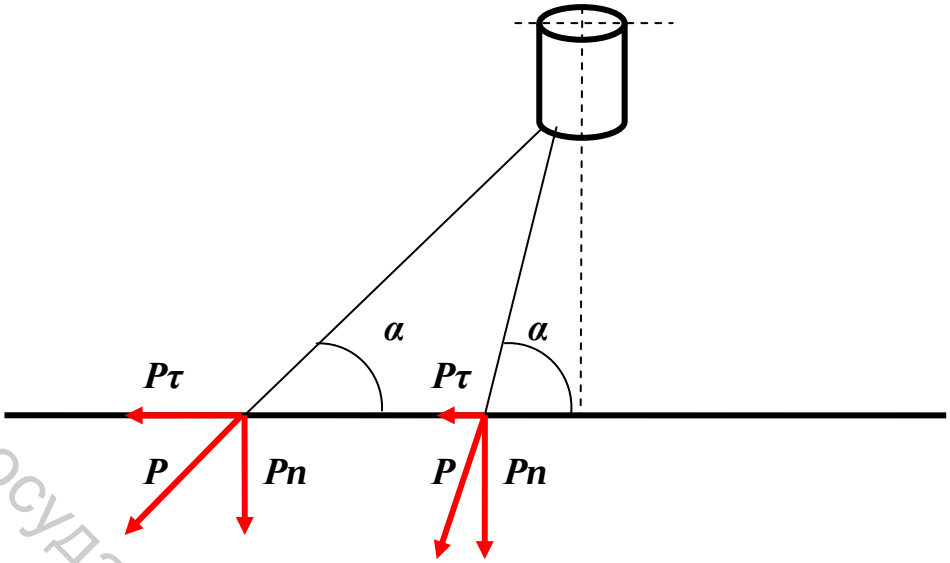


Рисунок 4.5 – Изменение силы напыления при уменьшении угла падения

При уменьшении угла падения частиц α нормальная составляющая Pn силы удара P сокращается, а составляющая $P\tau$ силы удара, направленная тангенциально, наоборот увеличивается и способствует тому, что определенное количество частиц, попадая на поверхность, не приклеивается, а отлетает в сторону. Следовательно, равномерность покрытия и поверхностная плотность покрытия зависят от скорости движения частиц и угла их падения.

Для выравнивания потока воздушно-волокнистой струи применялась насадка с выходным отверстием прямоугольного сечения с размерами 4×28 мм, что практически соответствует площади круглого сечения (выходного сопла аэродинамического устройства) с радиусом 6 мм. Замена насадки произведена, основываясь на том [49], что скорость на оси круглой струи затухает быстрее, чем на оси плоской струи, так как скорость на оси круглой струи обратно пропорциональна расстоянию от полюса, в то время как для плоской струи она обратно пропорциональна корню квадратному из того же расстояния.

В таблице 4.4 представлены сравнительные результаты исследования работы аэродинамического устройства с насадкой и без нее при прочих равных условиях.

Применение насадки с выходным отверстием прямоугольного сечения позволяет стабилизировать угол напыления и скорость воздушно-волокнистого потока, значительно снизить количество потерь, связанных с нестабильностью потока, истекающего из круглого

Витебский государственный технологический университет

сопла, улучшить качественные показатели многослойного текстильного материала.

Таблица 4.4 – Результаты исследований работы аэродинамического устройства

Форма сечения сопла	Площадь сечения, мм^2	Рабочее давление, Па	Потери, %	Плотность заполнения основы ворсом, г/м^2
Круглое сечение	112	$1 \cdot 10^5$	50	70
		$2 \cdot 10^5$	30	100
		$3 \cdot 10^5$	42	80
Прямоугольное сечение	112	$1 \cdot 10^5$	15	150
		$2 \cdot 10^5$	5	170
		$3 \cdot 10^5$	8	160

В таблице 4.5 представлены рекомендуемые параметры работы аэродинамического устройства.

Результаты исследования влияния скорости воздушно-волокнистой струи на свойства многослойных текстильных материалов отражены в публикации [50].

Таблица 4.5 – Рекомендуемые параметры работы аэродинамического устройства

Параметры	Значение
Рабочее давление, МПа	0,2
Ячейка сита, мм	8
Насадка	Прямоугольное сечение
Расстояние до основы, мм	50

4.1.2 Технологический процесс нанесения ворсового покрытия непрерывным способом

Способ нанесения ворсового покрытия на рулонный материал предусматривает применение непрерывной линии с раскатным и клеенаносным механизмом. Последовательность процесса получения многослойных рулонных материалов следующая. Подготовленные (измельченные) отходы, упакованные в транспортную тару, поставляются на предприятие-изготовитель, связующие подбираются в зависимости от вида основы и приготовляются в соответствии с разработанной рецептурой. Основа устанавливается на раскатный механизм, клеевой состав заправляется в клеенаносной механизм. После устанавливается аэродинамическое устройство, где наносится

Витебский государственный технологический университет

волокнистая смесь. Последней технологической операцией является сушка.

На рисунке 4.6 показана принципиальная схема технологического процесса получения многослойных текстильных рулонных материалов, который осуществляется следующим образом.

Полотно основы 1 сматывается с рулона 2. Проходя узел нанесения клея 3, полотно смачивается клеевым составом, затем полотно основы попадает в зону аэродинамического напыления. Зона аэродинамического напыления состоит из узла дозирования волокнистых частиц 4 и аэродинамического устройства 5.

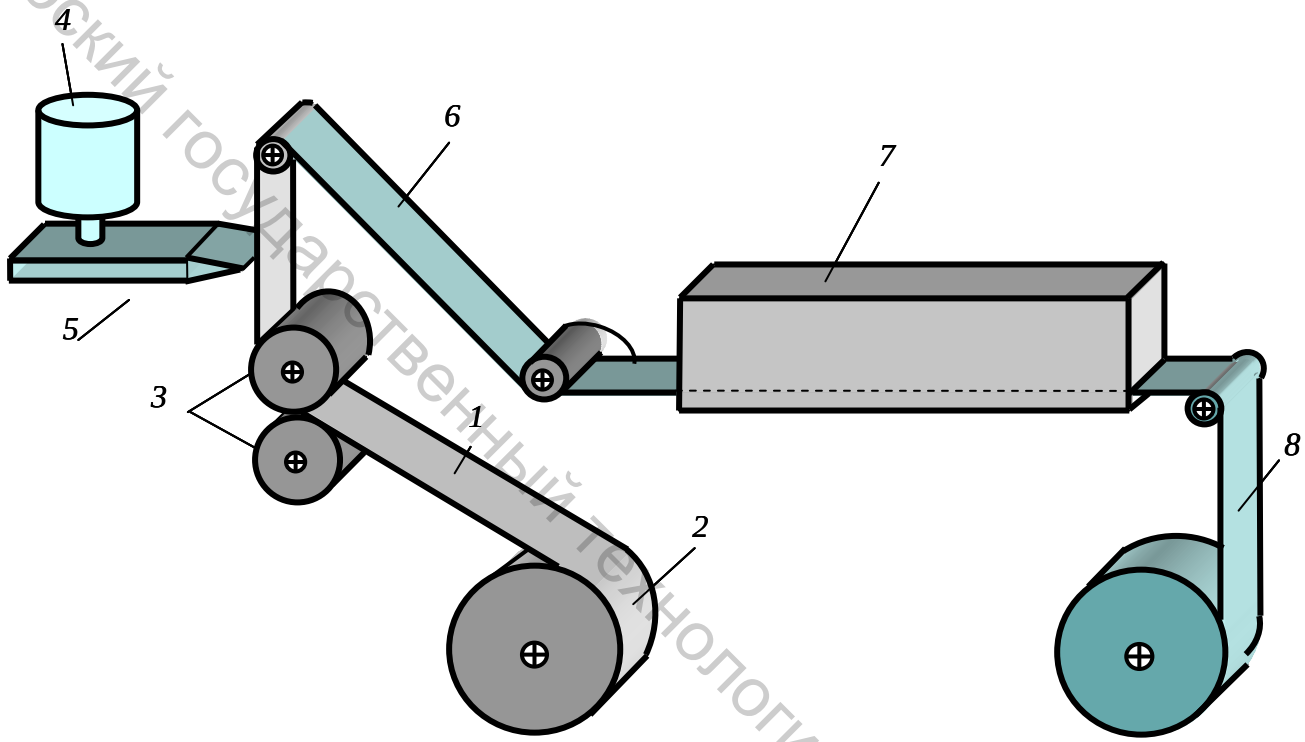


Рисунок 4.6 – Принципиальная схема процесса получения многослойных рулонных материалов

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

Затем полотно подается в сушильную камеру 7, где происходит фиксация волокнистых частиц на основе. После выхода из сушильной камеры полотно подвергается чистке от излишков волокнистых частиц и наматывается в рулон 8.

Анализ работы клеевого узла

Первой технологической операцией процесса получения многослойных текстильных рулонных материалов является операция

Витебский государственный технологический университет

нанесения клея на поверхность основы. В данной технологии принят валичный способ нанесения клеевой пленки, так как для непрерывного способа формирования он является самым эффективным.

Физическая сущность операции нанесения клея заключается в совмещении процессов смачивания, адсорбции, капиллярном проникновении связующего внутрь материала и последующем закреплении в нем. Однако на качество конечного продукта значительное влияние оказывает не только состав применяемого связующего, но и режим работы клеевого узла, условной характеристикой которого является толщина клеевой пленки.

Для многослойных материалов с ворсовым покрытием толщина клеевой пленки в мокром состоянии должна составлять 0,4 мм [51].

Проведены экспериментальные исследования по определению зависимости толщины клеевой пленки $h_К$ от вязкости связующего $\mu_К$, с; уровня связующего в клеевой ванне $f_К$, м; линейной скорости клеенаносного валика $V_К$, м/с; зазора между клеенаносным и прижимным валиками $a_К$, м. На рисунке 4.7 схематично изображен узел нанесения клея на основу.

Основными рабочими органами узла являются клеенаносной 1 и прижимной 2 валики. Под клеенаносным валиком установлена ванночка с клеем 3. Основа 4 проходит между валиками и смачивается клеем 5.

В качестве основы применялась бумага поверхностной плотностью 90 г/м^2, в качестве связующего использовали клей на основе поливинилового спирта.

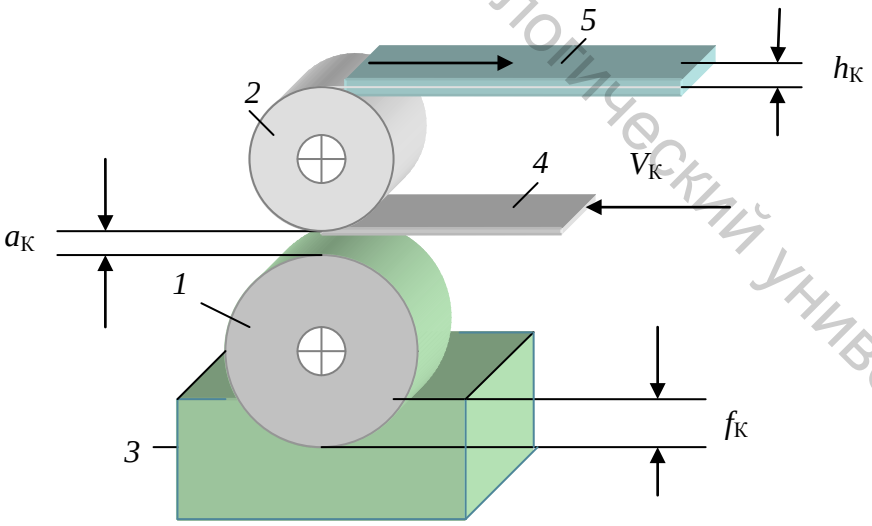


Рисунок 4.7 – Узел нанесения клея

Связующее имеет показатель рабочей вязкости $\mu_К$ = 57 с; зазор между валиками в диапазоне $a_К$ = 0,25 – 1,25 10^{-3} м; уровень связующего

Витебский государственный технологический университет

в клеевой ванне в пределах $f_К$ = 1 – 21 10^{-3} м; линейная скорость клеенаносного валика $V_К$ в пределах от 0,03 до 0,21 м/с.

Для определения величины клеевой пленки из образцов вырезались пробы, на каждой пробе производился срез, по которому с помощью микроскопа типа «Биолан» измерялась толщина клеевой пленки с точностью до 0,1 мм.

По результатам эксперимента, с учетом всех зависимостей, построена математическая модель процесса нанесения клеевого слоя на поверхность основы:

$$h_К = 0,5a_К - 0.2a_К{}^2 + 9f_К - 0.15V_К, \qquad (4.3)$$

где $a_К$ – величина зазора между валиками, м;

$f_К$ – уровень клея в клеевой ванне, м;

$V_К$ – линейная скорость клеенаносного валика, м/с.

При увеличении уровня связующего в клеевой ванне возрастает значение толщины клеевой пленки. Это объясняется тем, что увеличивается дуга, по которой идет перенос клея из клеевой ванны на основу. Связующеее по меньшей (внешней) дуге за одно и то же время стекает в ванну в меньшем количестве, чем с большей дуги.

При увеличении скорости клеенаносного валика толщина клеевой пленки уменьшается, так как сокращается время контакта основы с линией переноса клеенаносного валика, а это влечет за собой уменьшение времени адгезии, что приводит к уменьшению толщины покрытия основы клеем.

Увеличение толщины клеевой пленки при увеличении зазора между валиками в исследуемых пределах объясняется тем, что при увеличении зазора между валиками уменьшается сила давления прижимного валика на участок нанесения клея на основу и в результате в зоне контакта выдавливается меньшее количество связующего. Однако увеличение наблюдается до определенного предела. Существует момент, когда величина зазора слишком велика и величины когезии самого клея недостаточно, чтобы сохранять степень контакта между валиками, тогда увеличения толщины клеевой пленки уже не наблюдается.

Формула (4.3) позволяет определить толщину клеевой пленки в зависимости от изменяемых параметров. Получение требуемой толщины клеевого слоя на основе может быть достигнуто соответствующими регулировками вязкости клея, величиной уровня заполнения клеевой ванны, скоростью валиков и зазором между ними. Результаты исследования основных закономерностей работы клеевого узла при формировании слоистых композитов с ворсовым покрытием отражены в публикациях [52] и [53].

ВитебскийГосударственныйТехнологическийУниверситет

Анализ работы узла аэродинамического нанесения

На рисунке 4.8 представлен узел нанесения волокнистых частиц на поверхность-основу, который состоит из дозирующего устройства и аэродинамической форсунки.

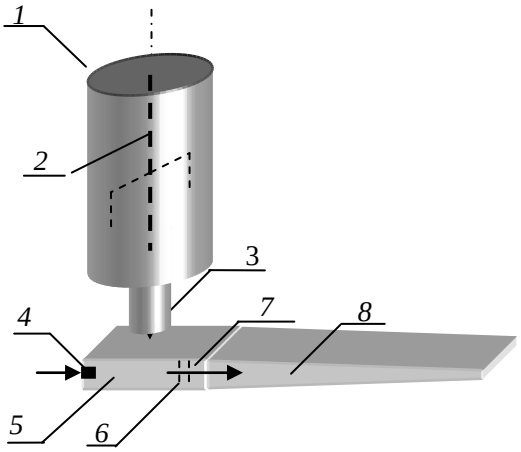


Рисунок 4.8 – Схема узла аэродинамического нанесения

Подготовленные волокнистые частицы загружается в бункер 1, в бункере установлено шнековое устройство 2, которое равномерно подаёт волокнистые частицы в пневмоинжекционный патрубок 3. Частота вращения
шнека регулируется, что позволяет подобрать необходимый технологический режим и получить синхронизацию работы всей системы. Сжатый воздух, подаваемый через штуцер 4, создает разряжение в пневмоинжекционном патрубке и засасывает волокнистые частицы, регулярно подаваемый шнеком, в приемную камеру 5. В приемной камере 5 происходит смешение потока скоагулированных волокнистых частиц и подаваемого воздуха, при этом создается однородная воздушно-волокнистая смесь. В камере смешения 7 установлены, расположенные перекрестно, пильчатые сита 6, проходя через которые неразделенные комочки скоагулированных частиц разбиваются на отдельные волокнистые частицы. Воздушно-волокнистая смесь под действием постоянно подаваемого сжатого воздуха равномерно распределяется в распределительной камере 8. Волокнистые частицы при выходе из устройства, обладая достаточной кинетической энергией, долетают до подготовленной основы и фиксируются на ней.

Двухфазная смесь, образующаяся в результате смешения воздуха и волокнистых частиц, характеризуется такими показателями, как концентрация дисперсного потока, критическая скорость частиц и массовый расход воздуха [54].

Витебский государственный технологический университет

Концентрация дисперсного компонента в массе несущего газа определяется как отношение весового расхода дисперсного компонента к весовому расходу смеси:

$$X = \frac{G_2}{G_1 + G_2}, \qquad (4.4)$$

где G_2 – весовой расход дисперсного компонента, кг/с;

G_1 – весовой расход воздуха, кг/с.

В свою очередь весовой расход воздуха G_1 определяется по формуле

$$G_1 = f_{щ} V_{вп} \rho_в, \qquad (4.5)$$

где $f_{щ}$ – площадь щели диффузора, м;

$V_{вп}$ – скорость воздушно-волокнистого потока, м/с;

$\rho_в$ – плотность воздуха, кг/м^3.

Весовой расход мелкодисперсных волокнистых частиц можно определить по формуле

$$G_2 = ПM, \qquad (4.6)$$

где M – массовый расход мелкодисперсных волокнистых частиц, кг/м^2;

$П$ – планируемая производительность оборудования, м^2/с.

Исходя из весового расхода смеси определяется необходимая скорость транспортируемого полотна, м/с:

$$V_{П} = \frac{MП}{B\delta\rho_ч}, \qquad (4.7)$$

где B – ширина полотна, м;

δ – толщина покрытия, м;

$\rho_ч$ – плотность частиц, кг/м^3.

Критическая скорость $V_{КР}$ - это та минимальная скорость, при которой еще не происходит выпадение взвешенных в потоке частиц. Величина критической скорости зависит от размеров мелкодисперсных волокнистых частиц, их плотности и концентрации. Для пневмотранспорта она определяется по эмпирической формуле [54]

$$V_{КР} = 0,3gD_э\sqrt{\left(\frac{\rho_ч}{\rho_в}\right)}, \qquad (4.8)$$

где $Dэ$ – эквивалентный диаметр поперечного сечения диффузора, м;

Витебский государственный технологический университет

$\rho_ч$ – плотность мелкодисперсной волокнистой частицы, кг/м^3;

$\rho_р$ – плотность рабочего (сжатого) воздуха;

X – расходная концентрация, определяемая по формуле.

Эквивалентный диаметр поперечного сечения диффузора определяется по формуле [54]

$$Dэ = 4\frac{a \cdot в}{2(a + в)}, \qquad (4.9)$$

где a – ширина щели диффузора, м;

$в$ – длина щели диффузора, м.

Диффузор выполнен в виде слегка расширяющегося сопла, что позволяет заполнить ворсом заданную ширину полотна. Диффузор схематично изображен на рисунке 4.9.

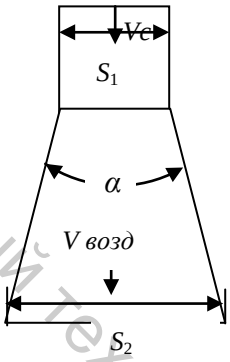


Рисунок 4.9 – Схема диффузора

Коэффициент местного сопротивления за счет расширения диффузора определяется как

$$\xi = Kп.р.(\frac{S_2}{S_1} - 1)^2, \qquad (4.10)$$

где $Kп.р$ – поправочный коэффициент [54], учитывающий постепенное расширение газового потока и зависящий от угла α.

$$\alpha = \arccos\left[\frac{1}{2}(1 + \sqrt{1 - \frac{\lambda}{2}\frac{n+1}{n-1}})\right], \qquad (4.11)$$

где n – отношение площадей сечений диффузора S_2 к S_1;

λ – гидравлический коэффициент, определяемый по универсальной формуле Альтшуля А.Д. [54]:

$$\lambda = 0.11(\frac{\Delta э}{dэ} + \frac{68}{\mathrm{Re}})^{0.25}, \qquad (4.12)$$

Витебский государственный технологический университет

где $\Delta_э$ – эквивалентная шероховатость, принятая для новых технически гладких труб равной 0,001 мм.

Скорость воздуха в камере смешения определяется по формуле

$$V_C = \frac{V_{вп}}{\sqrt{\xi}}. \quad (4.13)$$

Необходимое давление, достаточное для транспортирования мелкодисперсных волокнистых частиц в камере смешения можно определить по формуле

$$Pc = \frac{V^2_{вп}\rho_в}{2\xi}. \quad (4.14)$$

4.1.3 Конструкция аэродинамического устройства для нанесения ворсового покрытия

Аэродинамическое устройство для формирования волокнистого покрытия должно обеспечивать инжекцию для засасывания волокнистых частиц, подаваемых из бункера, смешение волокнистых частиц и воздушного потока, транспортирование волокнистых частиц по каналу диффузора и осаждение волокнистых частиц на подготовленную поверхность.

Пневмоинжекционный участок аэродинамического устройства.

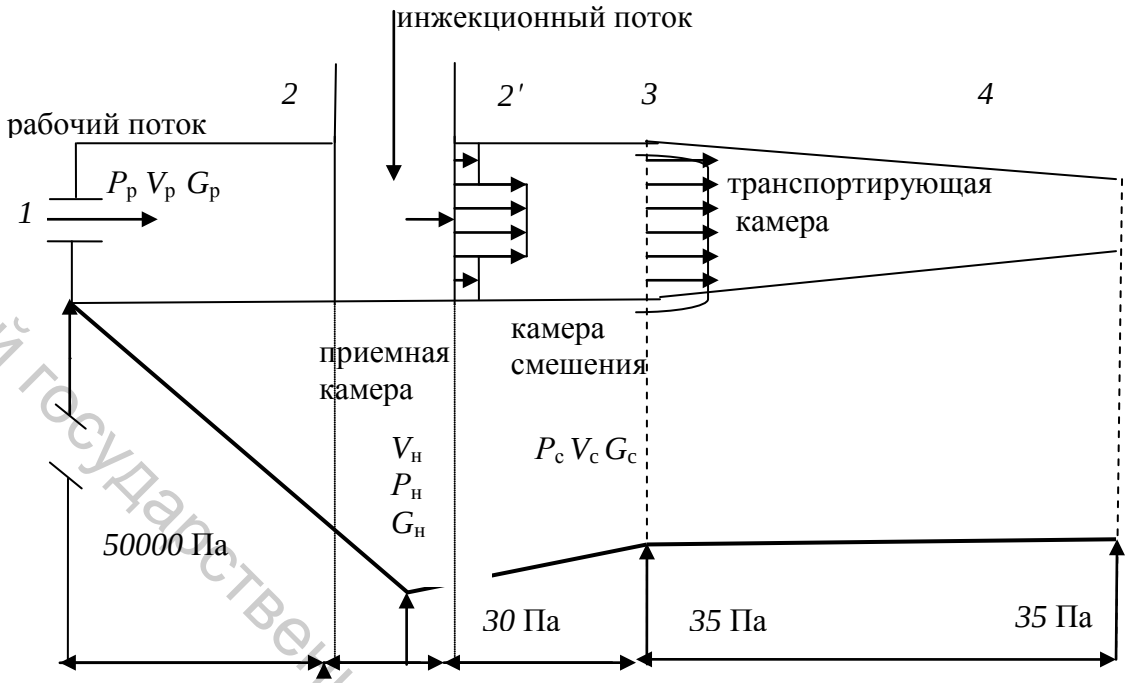
Аэродинамическое устройство, предназначенное для напыления мелкодисперсных волокнистых частиц, можно рассматривать как струйный аппарат на основании того, что в устройстве осуществляется процесс инжекции, заключающийся в передаче кинетической энергии одного потока другому потоку путем непосредственного контакта (смешения) [55].

Участок аэродинамического устройства, представленного на рисунке 4.10, между сечениями 1 – 2 – 2′ – 3 рассмотрим как струйный инжектор с газовой рабочей средой и сыпучей инжектируемой средой. Участок между сечениями 3 – 4 является камерой транспортирования. Толщина щели диффузора принята равной 4 мм, ширина щели диффузора 350 мм, угол расширения диффузора равен 13º.

Рабочий поток с параметрами $P_Р$, $G_Р$, $V_Р$ через штуцер 1 с эквивалентным диаметром $d_Р$ поступает в приемную камеру, из которой подсасывает смесь воздуха и мелкодисперсных волокнистых частиц. Избыточное давление в приемной камере уменьшается до значения 30 Па. По мере удаления от приемной камеры массовый расход движущегося потока непрерывно увеличивается за счет присоединения массы инжектируемой среды, а поперечное сечение движущегося потока непрерывно возрастает. На некотором расстоянии от приемной

Витебский государственный технологический университет

камеры движущийся поток заполняет все поперечное сечение смешивающей камеры. Избыточное давление в смешивающей камере увеличивается до значения 35 Па.



$P_Р$, $G_Р$, $V_Р$ – рабочее давление, расход и скорость рабочего потока;

$P_Н$, $G_Н$, $V_Н$ – давление, расход и скорость инжекционного потока;

$P_С$, $G_С$, $V_С$ – давление, расход и скорость потока в камере смешения

Рисунок 4.10 – Принципиальная схема аэродинамического устройства

Массовый расход движущегося потока в сечении 3 есть значение суммы массового расхода рабочей среды $G_Р$ и массового расхода инжектируемой среды $G_Н$, кг/с.

Во входном сечении ′2камеры смешивания профиль ско ростей неравномерный. На границе струи скорость мала, а по оси скорость соизмерима со скоростью истечения газа из сопла 1. Инжектируемый поток в этом сечении движется почти параллельно рабочему потоку. В выходном сечении 3 камеры смешения за счет расширения струи и вовлечения в движение близлежащих слоев воздуха поток имеет достаточно ровный профиль скоростей, который сохраняется ровным во всех сечениях камеры транспортирования.

Исходными данными для исследований являются следующие показатели:

1. Давление рабочего потока $P_Р = [1{,}5 \pm 0{,}05]\cdot 10^5$ Па.

Витебский государственный технологический университет

2. Скорость рабочего потока $V_{\text{Р}}$, м/с

Площадь поперечного сечения рабочего потока значительно меньше площади поперечного сечения камеры смешения аэродинамического устройства. По этой причине можно считать, что рабочий поток истекает в свободную среду. Тогда скорость рабочего потока можно рассчитать по формуле Сен-Венана (4.1).

3. Плотность рабочего потока, определяемая из соотношения

$$\rho_{\text{Р}} = \frac{P_{\text{Р}}}{RT}, \tag{4.15}$$

где $P_{\text{Р}}$ – давление в рабочем сечении.

4. Средняя скорость инжектируемого потока V_H, учитывая необходимый перепад давлений ΔP = 30 Па, определяемая по формуле

$$V_H = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho\xi}}, \tag{4.16}$$

где ξ – коэффициент потерь, принятый по [56] равным значению 0,611.

Для установления эффективной работы аэродинамического устройства для напыления волокнистых частиц на поверхность-основу, необходимым этапом является определение достижимого коэффициента инжекции и соответствующих основных геометрических параметров устройства.

Критические скорости рабочего ($a_{\text{Р}}$) и инжектируемого ($a_{\text{Н}}$) потоков определялись по формуле [45]

$$a_{\text{КР}} = \sqrt{\frac{2k}{k+1}\cdot\frac{P}{\rho}}. \tag{4.17}$$

По отношению давлений рабочего и инжектируемого потоков и по газодинамическим таблицам [45] определяются основные газодинамические характеристики $\lambda_{\text{РН}} = 0,8$ и $q_{\text{РН}} = 0,9518$. По неравенству $q_{c\text{З}} \geq \frac{P_{\text{Р}}}{P_C}\cdot q_{ps}$ определяется, нет ли области $q_{c\text{З}}$, в которой работа струйного аппарата невозможна. По отношению

$$\Pi_{\text{PS}} = \frac{P_{\text{Н}}}{P_{\text{Р}}}\Pi_{\text{Н}} \tag{4.18}$$

Витебский государственный технологический университет

определяется газодинамическая функция $q_{PS} = 0.988$, и отношение давлений

$$\frac{P_P}{P_C} \cdot q_{PS} = 1.47.$$

Поскольку физически возможная область значений $q \geq 1$ [45], то отсутствует область значений $q_{СЗ}$, в которой работа струйного аппарата невозможна.

Таким образом, значение достижимого коэффициента инжекции при $\lambda_{РН} = 0{,}8$ и $q_{РН} = 0{,}9518$, $u_{ОПТ} = 0{,}547$ [45]. Так как коэффициент инжекции это отношение массового расхода инжектируемого потока к массовому расходу рабочего потока, а массовый расход есть произведение скорости потока на площадь поперечного сечения, через которое истекает поток, и умноженное на плотность вещества, следовательно, справедливо следующее равенство:

$$V_Р \cdot \rho_Р \cdot f_Р \cdot u_{ОПТ} = V_Н \cdot \rho_Н \cdot f_Н, \qquad (4.19)$$

по которому определяется оптимальное отношение сечений рабочего и инжектируемого потоков.

Для эффективной работы аэродинамического устройства конечное сечение свободной струи, истекающей из рабочего сопла аэродинамического устройства, должно быть на уровне входного сечения камеры смешения.

Предельное расстояние от сопла до входного сечения камеры смешения 2 определяется следующим образом.

При коэффициенте инжекции $u \geq 0{,}5$ струя эффективно работает не только на уровне начального участка, но и на уровне основного участка. Длина струи при этом определяется по формуле [45]

$$L_1 = \frac{0.37 + u}{4.4 \cdot a} d_Р, \qquad (4.20)$$

где a – опытная константа, принятая равной 0,07 [45].

Диаметр свободной струи на расстоянии L_1, при коэффициенте инжекции 0,547, определяется по формуле [45]

$$d_y = 1{,}55\, d_Р (1 + u). \qquad (4.21)$$

Витебский государственный технологический университет

Таблица 4.6 – Расчетные данные основных геометрических параметров аэродинамического устройства

Показатель	Условное обозначение	Ед. изм.	Значение
Скорость рабочего потока	$V_{\text{Р}}$	м/с	250
Плотность рабочего потока	$\rho_{\text{Р}}$	кг/м^3	1,8
Площадь поперечного сечения сопла рабочего потока	S	мм^2	4,5
Средняя скорость инжектируемого потока	$V_{\text{Н}}$	м/с	9
Относительное давление	$П_{\text{РН}}$	-	0,67
Эквивалентный диаметр рабочего сопла	$d_{\text{Р}}$	мм	3,8
Длина струи	L_1	мм	11,6
Диаметр свободной струи на расстоянии L_1	d_y	мм	9,35
Длина участка камеры смешения между сечениями 1-2’	$L_{CM(1-2')}$	мм	50
Диаметр камеры смешения	d_C	мм	84
Длина камеры смешения	$L_{\text{К}}$	мм	240

Для поддержания струйного аппарата в рабочем режиме, значение расстояния от выходного сечения сопла до входного сечения камеры смешения (рабочая камера + приемная камера) должно быть не менее длины свободной струи $L_{CM(1-2')} > L_1$. Диаметр камеры смешения должен быть не менее диаметра свободной струи $d_C > d_y$. Длину камеры смешения рекомендуется принимать в пределах $L_{CM} = (6 \div 10)\, d_C$ [45]. В таблице 4.6 представлены расчетные данные основных геометрических параметров аэродинамического устройства. Результаты исследования пневмоинжекционных эффектов в аэродинамическом устройстве при взаимодействии газовой среды и мелкодисперсных волокнистых частиц отображены в публикации [52].

Контур щели диффузора аэродинамического устройства

При движении мелкодисперсных волокнистых частиц в камере транспортирования аэродинамического устройства (рисунок 4.10) возникает сопротивление из-за силы трения между движущимся потоком и ограничивающими стенками диффузора. Преодоление сопротивления приводит к тому, что теряется часть энергии частиц, и скорость их по сечениям диффузора значительно разнится.

Потери скорости приграничных частиц приводят к образованию вторичных вихревых течений, которые, накладываясь на продольное движение сжатого потока, непрерывно переносят количество движений по потреблению к углам. Образование застойных зон приводит к искажению траектории движения волокнистых частиц. На рисунке 4.11 представлен диффузор с прямолинейным исполнением контура щели,

Витебский государственный технологический университет

на рисунке 4.13 представлен диффузор с криволинейным исполнением контура щели. Для сравнения работы аэродинамических устройств с различными вариантами исполнения диффузора были проведены исследования и построены эпюры скоростей дисперсной смеси. На рисунке 4.12 представлена эпюра скоростей при прямолинейном исполнении щели диффузора. На рисунке 4.14 представлена эпюра скоростей при криволинейном исполнении щели диффузора.

Анализ эпюр свидетельствует о том, что при применении криволинейного диффузора происходит выравнивание скоростей по сравнению с прямолинейным диффузором.

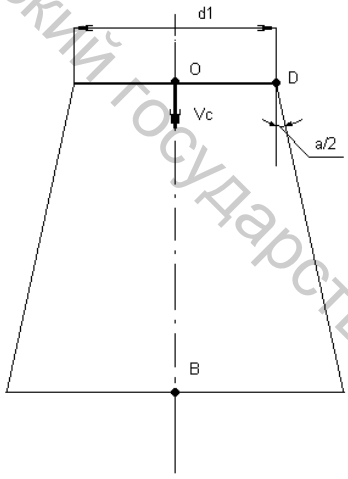


Рисунок 4.11 – Прямолинейный диффузор

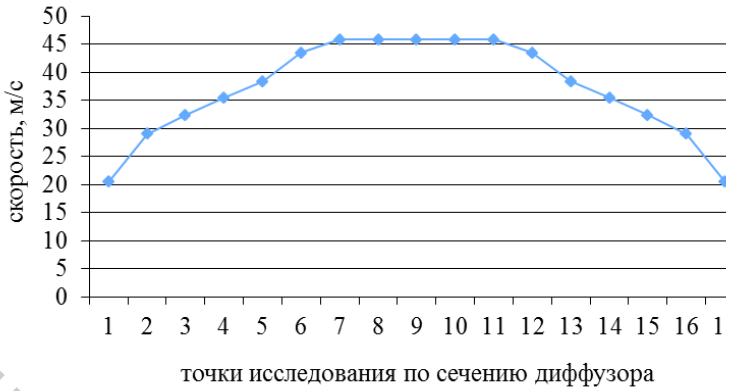


Рисунок 4.12 – Эпюра скоростей истекающего потока при прямолинейном исполнении диффузора (при рабочем давлении 2 *10^5 Па)

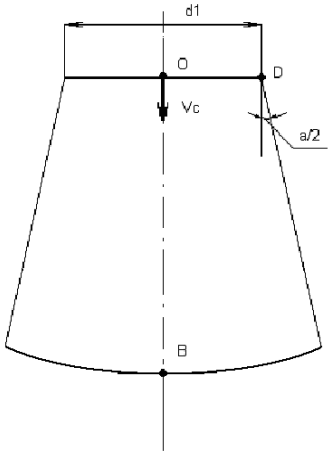


Рисунок 4.13 – Криволинейный диффузор

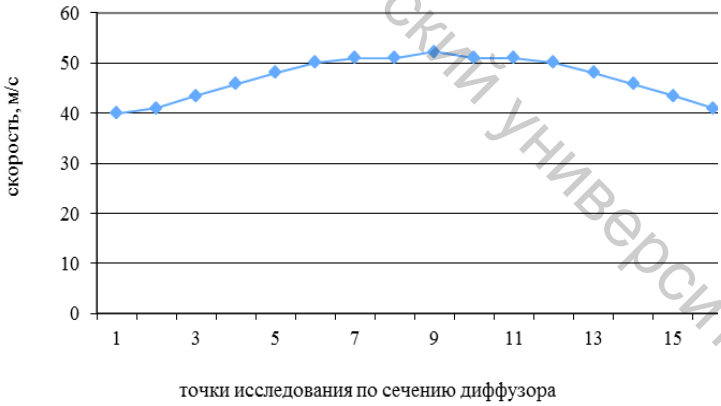


Рисунок 4.14 – Эпюра скоростей истекающего потока при криволинейном исполнении диффузора (при рабочем давлении 2 *10^5 Па)

Витебский государственный технологический университет

На рисунке 4.15 представлена расчетная схема диффузора с криволинейным исполнением контура щели диффузора.

Введем систему координат с началом в точке О.

Исходными данными являются:

$DO = \frac{d_1}{2}$;

$OB = r_{\text{КР}}$;

$\frac{\alpha}{2}$ – угол конусности.

Определим координату точки Q как точки пересечения окружности радиуса $r_{\text{КР}}$ и прямой QD. Уравнение прямой QD

$$X = \frac{d_1}{2} + KY, \qquad (4.22)$$

где K – тангенс угла конусности.

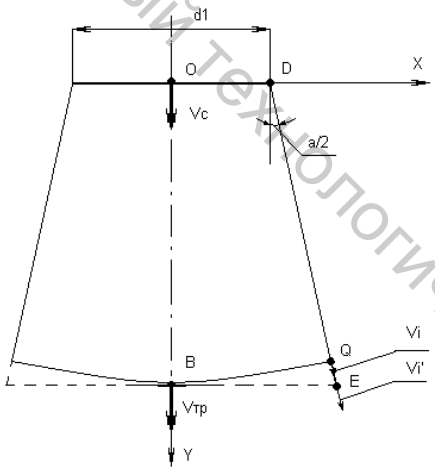


Рисунок 4.15 – Геометрическая схема диффузора с криволинейным исполнением

Уравнение окружности:

$$X^2 + Y^2 = r_{KP}^2, \qquad (4.23)$$

$$X = \sqrt{r_{KP}^2 - Y^2}. \qquad (4.24)$$

Витебский государственный технологический университет

Подставляя выражение (4.24) в уравнение (4.22) и после преобразования получили:

$$r_{KP}^2 - Y^2 = \frac{d_1^2}{4} + Kd_1 \cdot Y + K^2 Y^2 \qquad (4.25)$$

или

$$Y^2\left(K^2+1\right) + K \cdot d_1 Y + \left(\frac{d_1^2}{4} - r_{KP}^2\right) = 0 . \qquad (4.26)$$

Корни квадратного уравнения:

$$Y = \frac{-Kd_1 \pm \sqrt{K^2 d_1^2 - 4\left(K^2+1\right)\left(\frac{d_1^2}{4} - r_{KP}^2\right)}}{2\left(K^2+1\right)}, \qquad (4.27)$$

$$X = \frac{d_1}{2} + KY . \qquad (4.28)$$

Длина наклонного участка диффузора

$$l_{QD} = \sqrt{\left(X - \frac{d_1}{2}\right)^2 + \left(Y^2\right)} . \qquad (4.29)$$

Увеличение скорости движения потока сжатого воздуха с дисперсными частицами пропорциональны пути:

$$\frac{V_{TP}}{Vi} = \frac{r_{KP}}{l_{QD}} . \qquad (4.30)$$

Выравнивание скоростей происходит за счет уменьшения длины наклонных стенок диффузора.

Форма диффузора аэродинамического устройства

Струя сжатого воздуха, истекающая из рабочего сопла, является свободной затопленной струей [45, 49, 57], так как физические свойства истекающего вещества аналогичны физическим свойствам принимающей среды. На рисунке 4.16 представлены схемы истечения струй из насадок двух видов: с круглым сечением (а) и с прямоугольным щелевым сечением (б).

Условие постоянства количества движения вдоль струи:

$$\int_s PV^2 ds = const , \qquad (4.31)$$

Витебский государственный технологический университет

где P – давление, Па;

V – скорость, м/с.

Учитывая, что для круглой струи элементарная площадка ds будет равна

$$ds = 2\pi r dr\,, \tag{4.32}$$

для плоской струи на единицу длины

$$ds = 1 \cdot dy\,. \tag{4.33}$$

Следовательно, для круглой струи

$$2\pi \int_0^{r_{гр}} PV^2 r dr = \pi r_0 P_0 V_0^{\,2}\,; \tag{4.34}$$

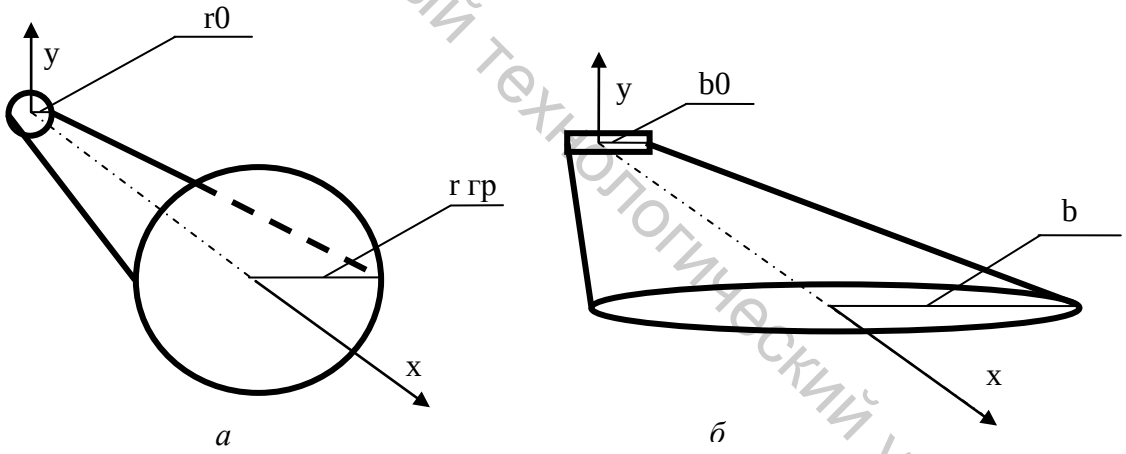


Рисунок 4.16 – Формы струй, при истечении из насадок различной формы (круглой и щелевой)

для плоской

$$\int_0^{b} PV^2 dy = P_0 V_0^{\,2} b_0\,. \tag{4.35}$$

Витебский государственный технологический университет

Представив оба интеграла в безразмерном виде и считая, что $P = P_0$, получили:

$$2\int_0^{\frac{r_г}{\kappa}}\left(\frac{V}{V_0}\right)^2\left(\frac{r}{r_0}\right)d\left(\frac{r}{r_{гр}}\right)=1, \qquad (4.36)$$

$$\int_0^{\frac{b}{b_0}}\left(\frac{V}{V_0}\right)^2 d\left(\frac{y}{b}\right)=1. \qquad (4.37)$$

Представив безразмерные величины, входящие в подынтегральные выражения в виде двух сомножителей:

$$\frac{r}{r_0}=\frac{r}{r_{гр}}\cdot\frac{r_{гр}}{r_0}, \qquad \frac{V}{V_0}=\frac{V}{V_{\max}}\cdot\frac{V_{\max}}{V_0}, \qquad \frac{y}{b_0}=\frac{y}{b}\cdot\frac{b}{b_0},$$

получим следующий вид интегралов:

$$2\left(\frac{V_{\max}}{V_0}\right)^2\left(\frac{r_{гр}}{r_0}\right)^2\int_0^1\left(\frac{V}{V_{\max}}\right)^2\frac{r}{r_{гр}}d\frac{r}{r_{гр}}=1, \qquad (4.38)$$

$$\left(\frac{V_{\max}}{V_0}\right)^2\frac{b}{b_0}\int_0^1\left(\frac{V}{V_{\max}}\right)^2 d\left(\frac{y}{b}\right)=1. \qquad (4.39)$$

Окончательно получим величину максимальной скорости на оси круглой струи в виде:

$$V_{\max}=\frac{const}{r_{гр}}\sim\frac{const}{x} \qquad (4.40)$$

и на оси плоской струи:

$$V_{\max}=\frac{const}{\sqrt{b}}\sim\frac{const}{\sqrt{x}}. \qquad (4.41)$$

Эпюра скоростей транспортирующего потока при применении диффузора круглой формы представлена на рисунке 4.17, на рисунке 4.18 представлена эпюра скоростей транспортирующего потока при применении насадки со щелевым отверстием.

Витебский государственный технологический университет

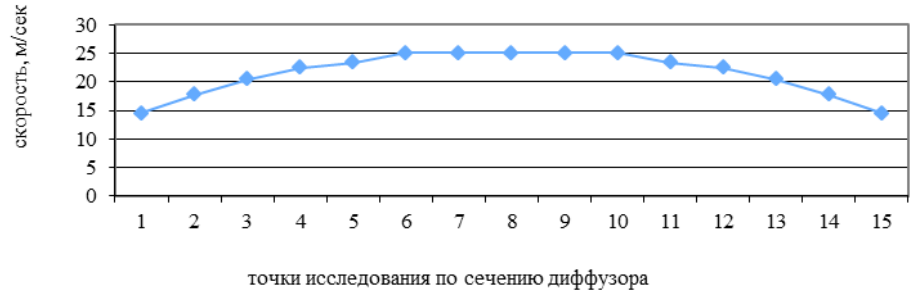


Рисунок 4.17 – Эпюра скоростей истекающего потока при применении насадки с круглым отверстием (при рабочем давлении 1 *10^5 Па)

Рисунок 4.18 – Эпюра скоростей истекающего потока при применении насадки со щелевым отверстием (при рабочем давлении 1* 10^5 Па)

Таким образом, учитывая теоретические и экспериментальные исследования для рабочего сопла аэродинамического устройства, осуществляющего напыление волокнистых частиц, рекомендована насадка со щелевым отверстием.

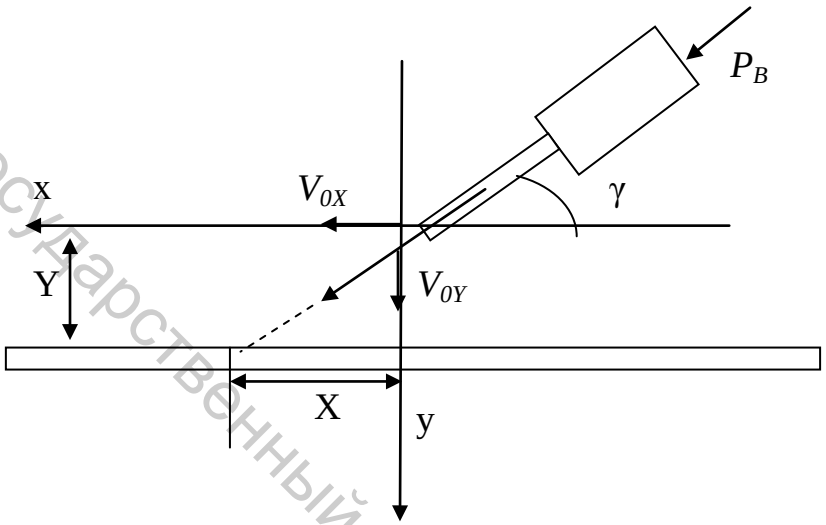
4.1.4 Определение координаты положения волокнистых частиц на полотне основы при аэродинамическом формировании текстильного композита

Перемещение волокнистых частиц при получении многослойных текстильных материалов аэродинамическим способом формирования осуществляется силой давления сжатого воздуха. Процесс перемещения волокнистых частиц важен не только как транспортировка их от

Витебский государственный технологический университет

патрубка аэродинамического устройства к основе, но и как подготовка к внедрению волокнистых частиц в слой связующего, в котором происходит закрепление ворса.

Волокнистые частицы, находящиеся в патрубке аэродинамического устройства, увлекаются потоком сжатого воздуха. При выходе из насадки аэродинамического устройства, представленного на рисунке 4.19, частицы продолжают свое движение с начальной скоростью V_0.



γ – угол атаки, рад; V_{0X} – начальная скорость волокнистой частицы по оси x, м/с; V_{0Y} – начальная скорость волокнистой частицы по оси y, м/с; P_B – давление сжатого воздуха, Па

Рисунок 4.19 – Аэродинамическое устройство и схема процесса напыления

Поступательное движение частицы описывается линейным дифференциальным уравнением

$$\frac{dV}{dt} = \frac{3\pi\mu_v d_э}{m}(W - V), \qquad (4.42)$$

где μ_v – коэффициент динамической вязкости воздушной среды, Па·с;

$d_э$ – эквивалентный диаметр частицы, м;

m – масса частицы, кг;

W – средняя скорость воздушной среды, м/с;

V – абсолютная скорость частицы, м/с.

Эквивалентный диаметр мелкодисперсной волокнистой частицы $dэ$ определен из условия равенства скоростей питания цилиндрической и шаровой частицы равной плотности [58]:

Витебский государственный технологический университет

$$d_{ЭКВ} = \frac{3}{16}\pi \cdot d \,, \tag{4.43}$$

где d – диаметр цилиндрической частицы, м.

В координатной форме дифференциальное уравнение (4.42) принимает вид:

$$\begin{cases} \dfrac{dV_X}{dt} = \dfrac{3\pi\mu_\nu d_Э}{m}\left(W_X - V_X\right) \\ \dfrac{dV_Y}{dt} = \dfrac{3\pi\mu_\nu d_Э}{m}\left(W_Y - V_Y\right) \end{cases}. \tag{4.44}$$

Начальная скорость волокнистых частиц принята равной скорости истечения сжатого воздуха из сопла устройства. Для ее определения использовалась формула Сен-Венана.

Решением системы уравнений 4.44 [59] определены координаты дисперсной частицы с начальной скоростью при выходе из сопла аэродинамического устройства $V_{0X} = V_0 \cos\gamma$ и $V_{0Y} = V_0 \sin\gamma$ учитывая при этом, что движение происходило в покоящейся среде ($W = 0$), при отсутствии каких-либо иных сил, кроме аэродинамического сопротивления:

$$\begin{cases} \dfrac{dV_X}{dt} = -\dfrac{3\pi\mu_\nu d_Э}{m}V_{0X} \\ \dfrac{dV_Y}{dt} = -\dfrac{3\pi\mu_\nu d_Э}{m}V_{0Y} \end{cases}, \tag{4.45}$$

$$\begin{cases} \ln\dfrac{V_X}{V_{0X}} = -t\dfrac{3\pi\mu_\nu d_Э}{m} \\ \ln\dfrac{V_Y}{V_{0Y}} = -t\dfrac{3\pi\mu_\nu d_Э}{m} \end{cases}, \tag{4.46}$$

$$\begin{cases} V_X = V_{0X} \cdot e^{t\frac{3\pi\mu_\nu d_Э}{m}} \\ V_Y = V_{0Y} \cdot e^{t\frac{3\pi\mu_\nu d_Э}{m}} \end{cases}, \tag{4.47}$$

$$\begin{aligned} X &= V_{0X} \cdot \frac{m}{3\pi\mu_\nu d_Э}\left(1 - e^{-t\frac{3\pi\mu_\nu d_Э}{m}}\right) \\ Y &= V_{0Y} \cdot \frac{m}{3\pi\mu_\nu d_Э}\left(1 - e^{-t\frac{3\pi\mu_\nu d_Э}{m}}\right) \end{aligned}. \tag{4.48}$$

Витебский государственный технологический университет

Координата X, полученная по формуле (4.48), является радиусом пятна, на которое распыляется ворс из сопла диаметром d_C аэродинамического устройства. Зная площадь напыления и массу частицы, получили удобную для расчетов формулу предельно возможного заполнения поверхности частицами на заданный радиус, г:

$$П' = \frac{\pi(X + 0.5d_C)^2 \cdot m}{\pi(0.5d_Э)^2} s, \qquad (4.49)$$

где m – масса частицы, г;

$d_Э$ – эквивалентный диаметр частицы, м;

d_C – диаметр сопла, м;

s – поправочный коэффициент (1-0,585).

Формула (4.48) позволяет определять координаты положения частиц на полотне в результате аэродинамического напыления. Результаты исследования по определению координаты частицы при аэродинамическом напылении отображены в публикации [60].

Экспериментально координаты частицы определялись промером расстояния, на которое переместилась частица, вылетевшая из сопла аэродинамического устройства. При проведении эксперимента изменялись:

– параметры положения сопла относительно линии горизонта: 30^0 и 60^0;

– избыточное давление, подаваемое в аэродинамическое устройство 1000 Па, 2000 Па, 3000 Па.

Положение частицы фиксировалось на плоскости с помощью координатной сетки. В таблице 4.7 сведены результаты эксперимента, а на рисунке 4.20 представлены графики зависимостей положения частицы на системе координат от угла атаки и скорости напыления. Теоретически положение частицы по оси X, мм определялось по формуле (4.48).

Таблица 4.7 – Результаты эксперимента по определению координаты частицы

Угол атаки		Избыточное давление, подаваемое в аэродинамическое устройство, Па		
		100000	200000	300000
Положение частицы по оси X, мм				
30^0	Теоретически	84	107	132,7
	Экспериментально	88	110	135
60^0	Теоретически	48	62,27	77,6
	Экспериментально	46	60	74

Витебский государственный технологический университет

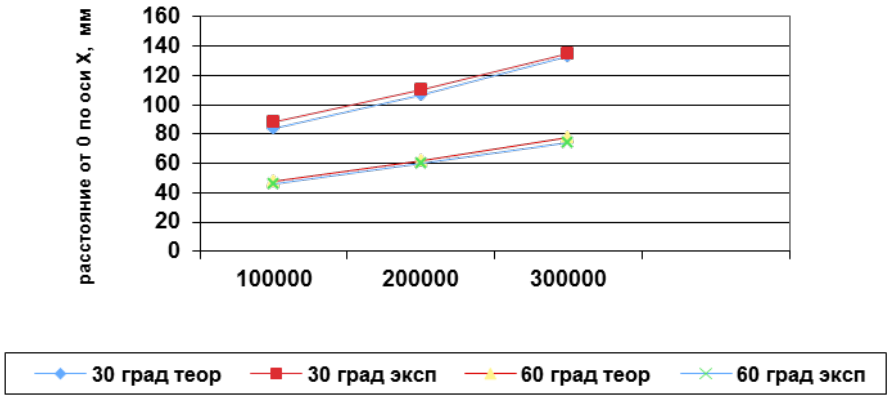


Рисунок 4.20 – Теоретические и экспериментальные зависимости положения частицы на полотне-основе

4.1.5 Влияние расположения аэродинамического устройства на равномерность нанесения волокнистых частиц

Одним из показателей качества текстильного композита с волокнистым покрытием, полученного в результате аэродинамического напыления, является равномерность нанесения волокнистых частиц на основу.

На рисунке 4.21 представлена схема взаиморасположения диффузора с основой. Предположим, что для того, чтобы равномерно заполнить ворсовым покрытием ширину полотна b, необходимо расположить диффузор аэродинамического устройства на некотором расстоянии X_{BC}.

Рассмотрим фигуру $ODFC$ как прямоугольную трапецию. Тангенс угла конусности есть отношение отрезка $(CF - OD)$ к отрезку OC или:

$$\frac{b-d_1}{2\left(r_{кр}-X_{BC}\right)}=tg\frac{\alpha}{2}, \qquad (4.50)$$

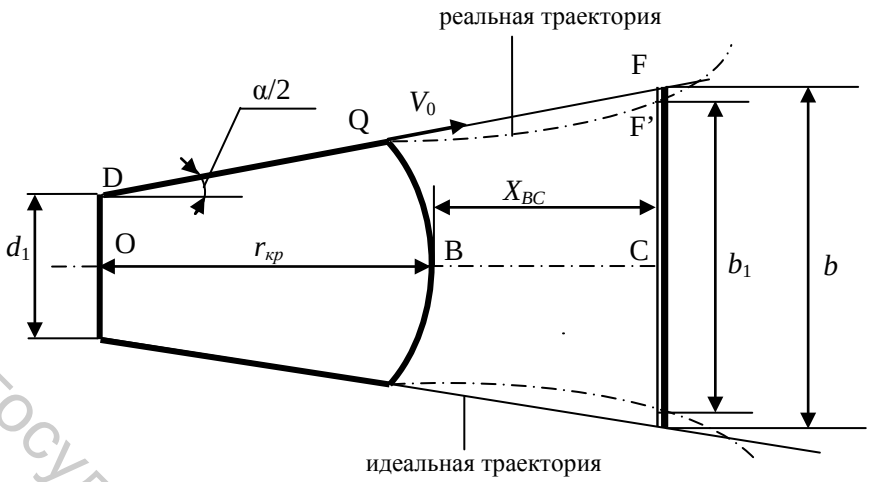
тогда расстояние от оси диффузора до основы X_{BC} равно:

$$X_{BC}=\frac{b-d_1}{2tg\dfrac{\alpha}{2}}-r_{кр}. \qquad (4.51)$$

Расстояние X_{BC} от оси диффузора до основы, рассчитанное по формуле (4.51), может быть определено при допущении прямолинейной траектории движения волокнистой частицы в покоящейся среде. В реальном же процессе напыления имеет место динамическое взаимодействие между твердой волокнистой частицей и окружающей ее покоящейся средой, следствием этого является искажение траектории. Наличие вязкого трения приводит к тому, что на расстоянии X_{BC},

Витебский государственный технологический университет

рассчитанном по формуле (4.51), равномерно покрывается ширина полотна b_1.



d_1 – ширина основания диффузора, м; $r_{кр}$ – радиус кривизны, м; α/2 – угол конусности, рад.; X_{BC} – расстояние между диффузором и основой, м; V_0 – скорость частиц при истечении из диффузора, м/с; b_1 – ширина напыления полотна, м; b – заданная ширина полотна, м

Рисунок 4.21 – Схема взаимодействия воздушно-волокнистого потока, истекающего из диффузора, с основой

В качестве тормозящей принята сила Стокса. Полагая частицу в виде шарика с эквивалентным диаметром $d_э$, который определяется по формуле (4.43), сила торможения F определяется следующим образом [56]:

$$F = 6\pi\mu * \frac{d_э}{2} V , \qquad (4.52)$$

где μ^* – коэффициент динамической вязкости среды с твердыми частицами, Па·с, который определяется по формуле

$$\mu^* = \mu(1 + 5X) , \qquad (4.53)$$

где μ = $1 \cdot 10^{-5}$ Па·с, вязкость воздуха при t^0C = 20;

V – скорость дисперсного потока, м/с.

X – объемная расходная концентрация твердых частиц.

Уравнение движения дисперсного потока с учетом силы торможения (4.52) имеет вид:

Витебский государственный технологический университет

$$m\frac{dV}{dt} = -6\pi\mu^* \frac{d_Э}{2} V . \qquad (4.54)$$

Интегрируя уравнение (4.52), получим выражение для определения скорости двухфазной смеси, истекающей из диффузора по линии его наклонной стенки:

$$V_X = V_0 \exp(-\frac{6\pi\mu^* \frac{d_Э}{2}}{m} t) . \qquad (4.55)$$

Определим длину участка прямолинейной траектории l_{QF}:

$$l_{QF} = l_{DF} - l_{QD} , \qquad (4.56)$$

где l_{DF} определяется по формуле

$$l_{DF} = \frac{r_{кр} + {}_{BC}}{\cos\frac{\alpha}{2}} . \qquad (4.57)$$

Тогда формула (4.56) для определения длины участка прямолинейной траектории примет вид:

$$l_{QF} = \frac{r_{кр} + {}_{BC}}{\cos\frac{\alpha}{2}} - l_{QD} . \qquad (4.58)$$

Зависимость пути движения дисперсной частицы $x = f(t)$ определим с учетом того, что ускорение есть производная по времени:

$$a_X = -V_0 \frac{3\pi d_Э \mu^*}{m} e^{\frac{-3\pi d_Э \mu^*}{m} t} . \qquad (4.59)$$

Таким образом, зависимость пути $x = f(t)$ принимает вид:

$$l_{QF} = V_0 t - \frac{t^2 V_0 3\pi d_Э \mu *}{2m} e^{-\frac{3\pi d_Э \mu *}{m} t} . \qquad (4.60)$$

Время прямолинейного движения волокнистой частицы определяется по формуле

Витебский государственный технологический университет

$$t = \frac{l_{QF}}{V_0}, \qquad (4.61)$$

где расстояние l_{QF} определяется по формуле 4.58.

Оценив время t прямолинейного движения частицы по формуле (4.61) и подставляя его в уравнение (4.60), получим длину пути с учетом силы сопротивления воздушной среды. Результаты исследования равномерности напыления волокнистых частиц при формировании рулонных материалов отображены в публикациях [61] и [62].

Для экспериментального исследования влияния расположения аэродинамического устройства по отношению к напыляемому материалу в качестве входных параметров были приняты:

– Р – давление, подаваемое в струйный аппарат, так как скорость воздушно-волокнистой струи, истекающей из щели диффузора, зависит от давления, подаваемого в аэродинамическое устройство 100 – 200 кПа;

– l_{QF} – расстояние между полотном основы и диффузором 0,1 – 0,5 м.

Исследуемыми параметрами являлись свойства многослойного текстильного материала, а именно:

– П – поверхностная плотность, г/м^2;

– $С_п$ – коэффициент вариации по поверхностной плотности как показатель равномерности.

Полученное экспериментальное уравнение зависимости поверхностной плотности от давления, подаваемого в струйный аппарат, и от расстояния между полотном основы и диффузором имеет вид:

$$П = 145 + 10 \cdot Р - 38 \cdot l_{QF}^{\,2}. \qquad (4.62)$$

Исследование полученной математической модели поверхностной плотности (П) показывает, что при увеличении давления (Р) до некоторого предела поверхностная плотность увеличивается. Однако когда скорость частиц достигает значительной величины, они влипают в клеевой слой и таким образом создают застилостный слой, не позволяющий последующим частицам внедриться в связующее, следовательно, поверхностная плотность снижается.

Уравнение зависимости коэффициента вариации по поверхностной плотности от давления, подаваемого в аэродинамическое устройство, и от расстояния между полотном основы и диффузором имеет вид:

$$С_п = 9.9 - 6.7 \cdot l_{QF} + 1.6 \cdot Р^2 - 1.7 \cdot l_{QF}^{\,2}. \qquad (4.63)$$

Витебский государственный технологический университет

Исследование математической модели коэффициента вариации по поверхностной плотности ($C_п$) показывает, что при увеличении давления коэффициент вариации увеличивается. Это объясняется тем, что увеличение давления, и, как следствие, увеличение скорости полета частиц приводит к значительной хаотичности движения последних. Увеличение расстояния между основой и диффузором значительно снижает коэффициент вариации по поверхностной плотности. Это объясняется тем, что угол расширения воздушно-волокнистого потока α определяется из условия $\alpha = arctg 3{,}4 \cdot a$, где а – (коэффициент турбулентности) = 0,07. При достижении охвата воздушно-волокнистым потоком всей ширины полотна коэффициент вариации по поверхностной плотности значительно снижается, и волокнистое покрытие текстильного композита становится равномерным.

Оптимальным расстоянием между основой и диффузором принято такое, при котором коэффициент вариации по поверхностной плотности по всей ширине полотна не будет превышать 5 %, а поверхностная плотность будет стремиться к максимуму. Для получения максимального значения поверхностной плотности и минимального коэффициента вариации по поверхностной плотности процесс напыления необходимо проводить при следующих технологических параметрах:

– давление, подаваемое в аэродинамическое устройство, 0,16 – 0,25 МПа;

– расстояние от основы до диффузора 0,35 – 0,45 м.

Теоретически расстояние между полотном основы и диффузором определено по формуле 4.60, при экспериментально определенном времени движения частицы t = 0,2 с. Практически, зная экспериментально определенное оптимальное расстояние от оси диффузора до полотна основы (X_{BC} = 0,35÷0,45 м), можно определить расстояние l_{QF}.

В таблице 4.8 представлены данные между теоретическими расчетами и экспериментальными показаниями.

Таблица 4.8 – Теоретические и экспериментальные данные

№ опыта	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4
Давление, подаваемое в аэродинамическое устройство, Па	140000	150000	160000	170000
Расстояние l_{QF}, определенное теоретически, м	0,50455	0,50507	0,50571	0,50635
Расстояние l_{QF}, определенное экспериментально, м	0,500	0,505	0,505	0,510

Витебский государственный технологический университет

4.1.6 Влияния аэродинамических параметров волокнистой частицы на процесс аэродинамического формирования текстильного композита

Из-за наличия тормозящей силы Стокса и силы тяжести, траектория движения волокнистой частицы имеет криволинейный характер. Рассмотрим процесс движения дисперсной частицы массой m в потоке сжатой струи, истекающей из диффузора, представленного на рисунке 4.22, на полотно основы. Движение частицы массой m происходит по кривой BC', и частица отклоняется от точки C на величину CC'.

Введем систему координат хВу, отрываясь от точки В диффузора, частица массой m имеет начальную скорость V_0, которую можно определить по формуле Сен-Венана. Скорость движения частицы в направлении оси х с учетом силы торможения F, определяемой по формуле (4.52), обозначим V_X, скорость движения частицы в поле сил тяжести обозначим V_Y.

Скорость V_X определена по формуле

$$V_X = V_0 \exp(-\frac{3\pi\mu * d_Э}{m} t). \qquad (4.64)$$

Скорость V_Y равна

$$V_Y = gt. \qquad (4.65)$$

Ускорение частицы в проекции на ось х определено как

$$a_X = -V_0 \frac{3\pi d_Э \mu^*}{m} e^{\frac{-3\pi d_Э \mu^*}{m} t}. \qquad (4.66)$$

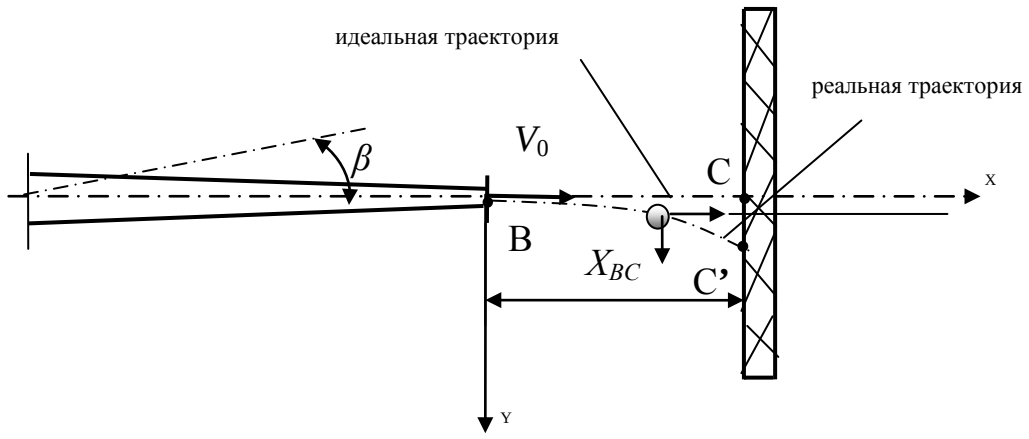
Ускорение частицы на ось у равно

$$a_Y = g. \qquad (4.67)$$

Линейные координаты движения частицы массой m соответственно равны

$$\begin{aligned} x &= V_0 t - (\frac{V_0 3\pi d_э \mu^*}{2m} e^{\frac{-3\pi d_Э \mu^*}{m} t}) t^2 \\ y &= \frac{gt^2}{2} \end{aligned}, \qquad (4.68)$$

ВитебскийГосударственныйТехнологическийУниверситет



β – угол подъема диффузора

Рисунок 4.22 – Схема истечения волокнистой частицы из диффузора

Координата y определяется по формуле

$$y = \frac{gt^2}{2}. \qquad (4.69)$$

Координата y соответствует отрезку CC' (рисунок 4.22). Угол подъема диффузора от линии горизонта можно определить из соотношения

$$\beta = arctg \frac{y}{X_{BC}}. \qquad (4.70)$$

В результате теоретических исследований установлено, что расположение диффузора под углом β обеспечит попадание дисперсной частицы массой m в точку C.

В результате экспериментального исследования процесса напыления с учетом аэродинамических параметров частиц получена математическая модель зависимости поверхностной плотности от уровня расположения диффузора l_y:

$$П = 144.46 + 123.3l_y - 1023\, l_y^2. \qquad (4.71)$$

Анализ графической зависимости, представленной на рисунке 4.23, показывает, что при увеличении координаты по оси y до определенного значения идет значительное увеличение поверхностной плотности. Однако дальнейшее увеличение координаты по оси y приводит к уменьшению оптимизируемого параметра и к ухудшению процесса

Витебский государственный технологический университет

напыления. Это происходит из-за того, что значительно увеличивается сопротивление, которое частицам необходимо преодолевать.

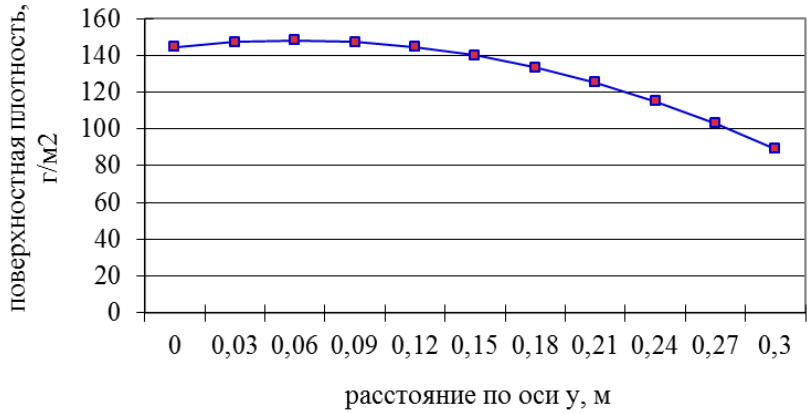


Рисунок 4.23 – Зависимость поверхностной плотности от угла расположения диффузора

Для определения оптимального расстояния по оси y можно использовать градиентный метод поиска, согласно которому производная от целевой функции в точке, соответствующей ее максимальному значению, равна нулю.

Дифференцированием уравнения (4.71) и приравниванием производной к нулю получаем:

$$\frac{dY}{dX} = 123.3 - 2046 \cdot X, \qquad (4.72)$$

откуда получим расстояние по оси y : X = 0,06 м.

Подставляя значение расстояния по оси y в уравнение (4.70) и решая его, получим значение оптимального угла β : β = 6,84 градуса.

Для получения максимального значения поверхностной плотности текстильного композита с ворсовым покрытием, формируемого способом аэродинамического напыления, технологический процесс рекомендуется проводить при следующих технологических параметрах:
– расстояние от оси диффузора до основы 0,45 м;
– угол положения диффузора по отношению к горизонтальной оси 7˚.

4.2 Формирование композиционного текстильного материала с волокнистым покрытием механическим способом

Нанесение волокнистого материала механическим способом может осуществляться на любой рулонный материал: ткань, бумагу, нетканый материал [64], что значительно улучшит внешний вид композиционных

Витебский государственный технологический университет

материалов, придаст колорит и значительно расширит ассортимент текстильных композитов декоративного назначения.

Упрощенная схема технологического процесса изготовления композиционных текстильных рулонных материалов механическим способом формирования представлена на рисунке 4.24.

В качестве наносимого волокнистого слоя применяются измельченные отходы химических нитей. В качестве связующих веществ применяются клеевые составы, соответствующие назначению материалов с учетом адгезии клея к основе и волокнистой массе [65].

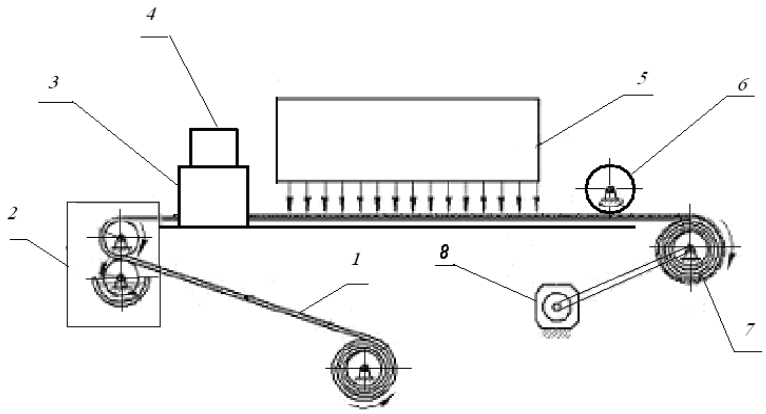
Рисунок 4.24 – Схема технологического процесса изготовления композиционных рулонных материалов

Согласно разработанному технологическому процессу на поверхность основы можно наносить любой сыпучий материал: льняную костру, древесную стружку, глиттер и другие мелкодисперсные частицы [66].

На рисунке 4.25 показана принципиальная схема технологического процесса получения композиционных рулонных текстильных материалов.

Технологический процесс осуществляется следующим образом: полотно основы *1* сматывается с рулона, проходя узел нанесения клея *2*, смачивается клеевым составом, затем оно попадает в устройство для нанесения волокнистого материала *3*, состоящего из самого устройства и накопительного бункера *4*, подающего волокнистую массу на распределительные валы. Устройство распределяет продукт по всей ширине полотна, образуя волокнистое покрытие.

ВитебскийГосударственныйТехнологическийУниверситет



1 – полотно основы, 2 – узел нанесения клея, 3 – устройство для нанесения волокнистого материала, 4 – накопительный бункер, 5 – сушильная камера, 6 – прижимной валик, 7 – рулон готовой продукции, 8 – электродвигатель

Рисунок 4.25 – Схема получения композиционных рулонных материалов в лабораторных условиях

Затем полотно подается в сушильную камеру *5*, где происходит фиксация материала на основе. После выхода из сушильной камеры покрытие уплотняется прижимным валиком *6*. Далее полотно подвергается чистке от излишков волокнистого материала и сматывается в рулон *7*, который вращается от электродвигателя *8*.

Количество наносимого волокнистого продукта определяется технологическими параметрами устройства для его нанесения. Для осуществления нанесения волокнистого продукта на материал основы разработано устройство, обеспечивающее равномерное распределение материала по поверхности, состоящее из накопительного бункера *1* и узла нанесения продукта *2* (рисунок 4.26), которое установлено на линии по производству обоев бумажных, декорированных волокнистым материалом [67]. Волокнистый материал из накопительного бункера с помощью ротора *3* попадает в питающую шахту *4*, затем на валики *5*, распределяющие его на поверхности основы.

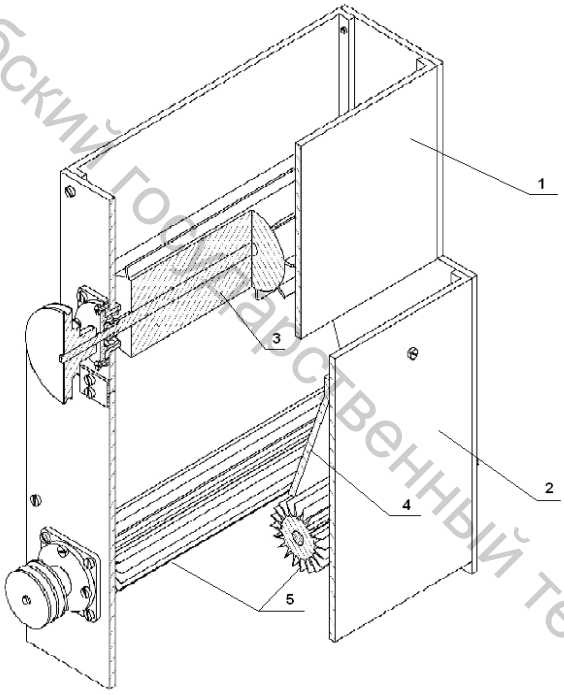
Разработанное устройство универсально, с его помощью на поверхность основы можно наносить любой сыпучий материал: измельченные отходы нитей, измельченный лоскут, оверлочную обрезь, льняную костру, древесную стружку, глиттер и другие мелкодисперсные частицы [68].

Частицы волокнистого материала при прохождении через все узлы устройства имеют сложную траекторию движения. Каждый механизм придает частицам определенное ускорение, следовательно, от параметров работы устройства зависит скорость падения частиц на основу и поверхностное заполнение основы волокнистым материалом. На рисунке 4.27 показано движение частиц в устройстве для нанесения волокнистого материала на основу.

Витебский государственный технологический университет

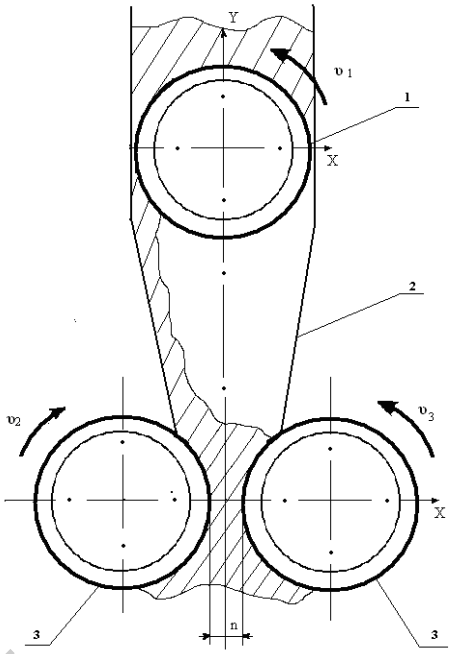
В общем случае при движении волокнистого материала наблюдается три режима: режим связанного движения, переходный и режим несвязанного движения.

Первый режим движения характеризуется тем, что материал перемещается в виде однородной массы. Переходный режим движения отличается образованием локальных разрывов в компактной массе частиц. Третий – характеризуется полным распадом массы на отдельные, не связанные между собой волокнистые частицы.



1 – накопительный бункер, 2 – узел нанесения волокнистого материала,
3 – ротор, 4 – питающая шахта,
5 – распределяющие валики

Рисунок 4.26 – Устройство для нанесения волокнистого материала на поверхность основы



1 – ротор, 2 – питающая шахта,
3 – распределяющие валики

Рисунок 4.27 – Движение волокнистых частиц в устройстве

В устройстве наблюдаются все три режима движения. Волокнистый материал в виде однородной массы поступает из накопительного бункера в питающую шахту *2*, при движении по наклонным стенкам шахты наблюдается образование локальных разрывов в общей массе, при выходе из устройства материал распадается на отдельные частицы и закрепляется на поверхности полотна.

Витебский государственный технологический университет

Устройство для нанесения волокнистого материала может быть установлено на непрерывной линии для формирования рулонных композиционных материалов.

4.2.1 Дозирование волокнистого материала при подаче в устройство для нанесения

Для накопления и объемного дозирования волокнистого материала предлагается использовать роторный дозатор. Он состоит из корпуса *1* (рисунок 4.28). В корпусе закреплен на валу ротор *2* с лопастями *3*. Материал поступает в пространство между лопастями и торцовыми стенками ротора, при вращении ротора продукт поочередно, из каждого отделения между лопастями, высыпается в устройство для нанесения.

Производительность дозатора (кг/с) определяется по формуле

$$П_p = 0.785\rho\psi z_p n_p V_n, \qquad (4.73)$$

где ρ – плотность материала, кг/м^3;
ψ – коэффициент разрыхления материала;
z_p – число полостей в роторе, шт;
n_p – частота вращения ротора, с$^{-1}$;
V_n – объем полости, м^3.

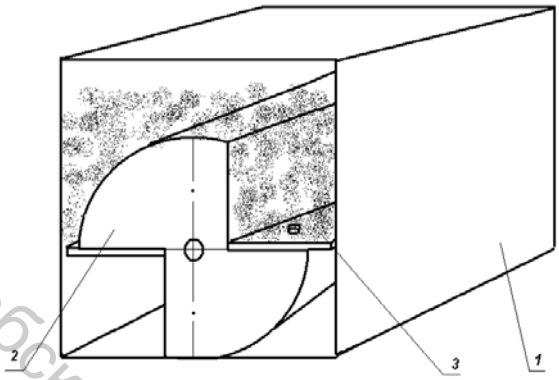
Ротор поворачивается и приводится в движение электродвигателем, соединенным с валом. Частота вращения ротора, а соответственно производительность дозатора, зависит от частоты вращения электродвигателя. Количество подаваемого материала, в зависимости от сырьевого состава, можно регулировать величиной выступа лопастей.

На массовый расход материала будет оказывать влияние количество пластин ротора, что проверено экспериментально и результаты отражены на графике (рисунок 4.30).

Из графика видно, что увеличение количества пластин роторного дозатора увеличивает массовый расход волокнистого материала. При оптимизации параметров роторного дозатора необходимо учитывать свойства наносимого волокнистого материала, а именно его плотность.

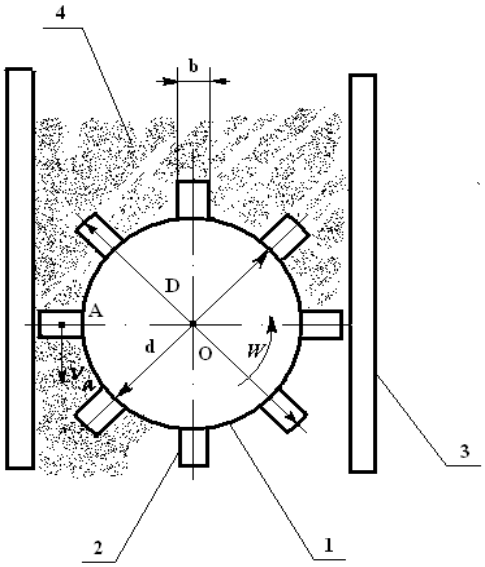
Площадь сечения накопительного бункера (рисунок 4.29) должна быть такой, чтобы волокнистая масса 4 преодолевала силы трения о стенки бункера 3. Для равномерности питания устройства важное значение имеет степень разрыхленности продукта и его однородность, то есть в зависимости от этих факторов изменяется давление массы материала на единицу площади ротора.

Витебский государственный технологический университет



1 – корпус, 2 – ротор, 3 – лопасти

Рисунок 4.28 – Схема роторного объемного дозатора



1 – ротор, 2 – пластины, 3 – стенки, 4 – сыпучий материал

Рисунок 4.29 – Движение потока частиц в накопительном бункере

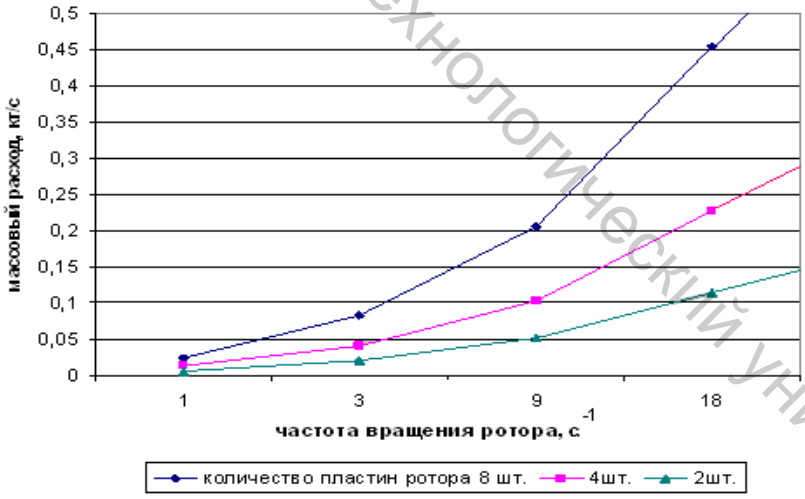


Рисунок 4.30 – График зависимости массового расхода продукта от количества лопастей роторного дозатора

К внешним параметрам ротора *1* (рисунок 4.29) относятся: крутящий момент *M*, частота вращения ротора *n*, угловая скорость *W*; к внутренним – расход *Q*. Параметры работы ротора представлены в таблице 4.9.

Витебский государственный технологический университет

Таблица 4.9 – Параметры ротора

Внешний диаметр ротора, м	Внутренний диаметр ротора, м	Длина пластины, м	Толщина пластины, м	Количество пластин, шт	Плотность материала, г/м^3
0,076	0,06	0,22	0,002	8	80

При расчете производительности роторного дозатора в зависимости от количества пластин необходимо учитывать конструктивные параметры устройства и свойства потока подаваемых частиц.

Высота наполнения бункера все время изменяется, но объемный расход выпускаемого продукта остается неизменным и равен

$$Q_v = \upsilon_A f \text{ , м}^3\text{/с}, \tag{4.74}$$

где υ_A – окружная скорость центра пластины, м/с;
f – площадь пластины, м^2.

$$\upsilon_A = W l_{OA}, \tag{4.75}$$

где W – угловая скорость ротора, с$^{-1}$.

$$l_{OA} = \frac{D-d}{4} \quad , \tag{4.76}$$

где D, d – диаметры внешней и внутренней окружности ротора, м.
Площадь одной пластины равна

$$f = \frac{D-d}{2}\delta , \tag{4.77}$$

где δ – длина пластины, м.
При количестве пластин z объемный расход равен

$$Q_v = W\frac{(D-d)^2}{8}\delta z \text{ ,м}^3\text{/с}. \tag{4.78}$$

Зная объемный расход, можно определить массовый расход материала:

$$Q_m = Q_v \rho \text{ ,кг/с}, \tag{4.79}$$

где ρ – плотность материала, кг/м^3.

Витебский государственный технологический университет

$$Q_v = W\rho\delta z\frac{(D-d)^2}{8}. \quad (4.80)$$

Реальная подача волокнистого материала будет меньше за счет объема, занимаемого пластинами. Объем пластин равен

$$V = \frac{D-d}{2}\delta b, \text{м}^3 \quad (4.81)$$

где b – толщина пластины, м.

При количестве пластин z объем, занимаемый пластинами равен

$$V_z = \frac{D-d}{2}\delta bz. \quad (4.82)$$

Тогда реальный объемный расход Q_v^p равен

$$Q_v^p = W\delta z\frac{(D-d)^2}{8} - \frac{D-d}{2}\delta bzW, \quad (4.83)$$

$$Q_v^p = W\delta z\left[\frac{D-d}{2}\left(\frac{D-d}{4}-b\right)\right]. \quad (4.84)$$

Реальный массовый расход равен

$$Q_m^p = \rho W\delta z\left[\frac{D-d}{2}\left(\frac{D-d}{4}-b\right)\right]. \quad (4.85)$$

При экспериментальном определении массового расхода накопительного бункера установлено, что необходимо учитывать уплотнение волокнистого материала лопастями роторного дозатора.

Полученные экспериментальные и теоретические значения расхода материала представлены в таблице 4.10.

С учетом полученных экспериментальных данных реальный массовый расход будет равен

$$Q_v^p = \lambda\rho W\delta z\left[\frac{D-d}{2}\left(\frac{D-d}{4}-b\right)\right], \text{кг/с}, \quad (4.86)$$

где λ – коэффициент уплотнения потока материала, равен 0,408.

Модель (4.86) можно использовать для определения массового расхода роторного дозатора при производстве композиционных

Витебский государственный технологический университет

текстильных материалов с волокнистым покрытием при заданной поверхностной плотности готового полотна.

Таблица 4.10 – Значения расхода волокнистого материала

Частота вращения ротора, $с^{-1}$	Массовый расход ($Q_м^p$), кг/с		
	Расчетные значения	Экспериментальные значения	Расчетные значения с учетом коэффициента уплотнения
1	0,06033	0,02460	0,02461
3	0,20091	0,08192	0,08197
9	0,50258	0,20492	0,20505
18	1,11617	0,45510	0,45539

Крутящий момент на валу ротора $M_к$ при количестве пластин z

$$M_k = \frac{D-d}{2}\delta P l_{OA} z, \qquad (4.87)$$

где P – давление пластины на подаваемый материал, Н/м^2.

Подставив в выражение (4.87) значение l_{OA} (4.76) получим

$$M_k = \frac{(D-d)^2}{8}\delta P z. \qquad (4.88)$$

Тогда давление пластин на подаваемую волокнистую массу определяется как

$$P = \frac{8M_k}{(D-d)^2 \delta z}, \text{ Н/м}^2. \qquad (4.89)$$

Крутящий момент выбираем из условия

$$M_k \geq M_{сопр}. \qquad (4.90)$$

Зная крутящий момент, можно определить мощность ротора

$$N = WM_k = \frac{(D-d)^2}{8}\delta P z W, \text{ Вт}. \qquad (4.91)$$

Скорость частиц на выходе из накопительного бункера υ_0 оказывает влияние на скорость движения потока частиц в питающей шахте устройства для нанесения волокнистого материала и равна

Витебский государственный технологический университет

$$\upsilon_0 = Wr_в = \frac{D}{2}, \text{м/с}, \quad (4.92)$$

где $r_в$ – внешний радиус ротора, м.

Движение потока волокнистого материала по наклонной плоскости питающей шахты (рисунок 4.31) возможно в случае $mg\sin\theta \rangle F_{сопр}$.

Рассмотрим движение дисперсных частиц как движение вязкой жидкости. За основу определения силы сопротивления примем нелинейный закон распределения скоростей (рисунок 4.32, 4.33).

$$F_{сопр} = l\left(\frac{d\upsilon}{dh}\right)^2 m_{тр}, \quad (4.93)$$

где $F_{сопр}$ – сила трения волокнистого материала о поверхность, Н;
l – длина наклонной пластины, м;
$d\upsilon/dh$ – градиент скорости, $с^{-1}$;
h – толщина слоя потока частиц, м;
$m_{тр}$ – масса транспортируемая, кг.

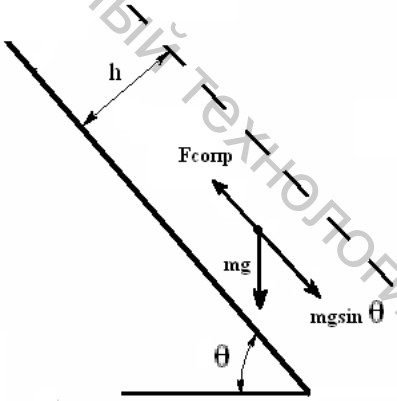


Рисунок 4.31 – Движение потока сыпучего материала по наклонной плоскости

Тогда условие движения потока частиц по наклонной плоскости

$$mg\sin\theta \rangle m_{тр} l\left(\frac{d\upsilon}{dh}\right)^2, \quad (4.94)$$

где m – масса продукта, сбрасываемая с ротора, кг;
$m_{тр}$ – масса транспортируемая, кг.

Витебский государственный технологический университет

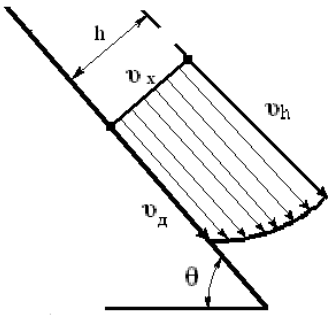


Рисунок 4.32 – Распределение скоростей в потоке частиц

υ_x – местная скорость частиц в слое потока находящемся на расстоянии x от поверхности пластины; υ_h – поверхностная максимальная скорость – на расстоянии h; $\upsilon_д$ – донная скорость

$$m = hl\delta\rho. \tag{4.95}$$

$$h\rho l\delta g\sin\theta \rangle m_{mp} l\left(\frac{d\upsilon}{dh}\right)^2. \tag{4.96}$$

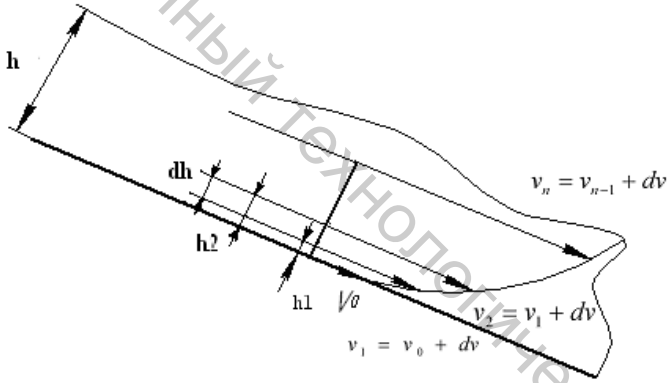


Рисунок 4.33 – График изменения скорости движения потока частиц по наклонным стенкам питающей шахты

Тогда

$$\frac{d\upsilon}{dh} \le \sqrt{\frac{h\delta\rho g\sin\theta}{m_{mp}}}. \tag{4.97}$$

Получим дифференциальное уравнение для скорости потока волокнистых частиц

$$d\upsilon = h^{\frac{1}{2}}\sqrt{\frac{\delta\rho g\sin\theta}{m_{mp}}}dh; \tag{4.98}$$

Витебский государственный технологический университет

$$\int_{\upsilon_0}^{\upsilon} d\upsilon = \int_0^h h^{\frac{1}{2}} \sqrt{\frac{\delta \rho g \sin\theta}{m_{mp}}} dh; \qquad (4.99)$$

$$\upsilon - \upsilon_0 = \frac{2}{3}\sqrt{h^3}\sqrt{\frac{\delta \rho g \sin\theta}{m_{mp}}} \ . \qquad (4.100)$$

Конечная скорость потока частиц по наклонной плоскости

$$\upsilon = \upsilon_0 + \frac{2}{3}\sqrt{\frac{h^3 \delta \rho g \sin\theta}{m_{mp}}} \ , \qquad (4.101)$$

где $m_{mp} = Q_m$; δ – ширина, м.

Полученные теоретические и экспериментальные значения скоростей потока частиц при угле наклона пластин питающей шахты $\theta = 20^0$ представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Значения скоростей потока волокнистых частиц

Частота вращения ротора, $с^{-1}$	Массовый расход ($Q_м^p$), кг/с		Начальная скорость потока частиц, м/с	Скорость потока частиц, м/с	
	Расчетные значения	Экспери-ментальные значения		при h = 0,001м	при h = 0,010м
3	0,2009	0,0819	0,1270	0,2836	1,6934
9	0,5026	0,2049	0,3165	0,6519	3,6696
18	1,1162	0,4551	0,7030	1,5318	8,9908

4.2.2 Устройство для непрерывного нанесения волокнистого материала на основу

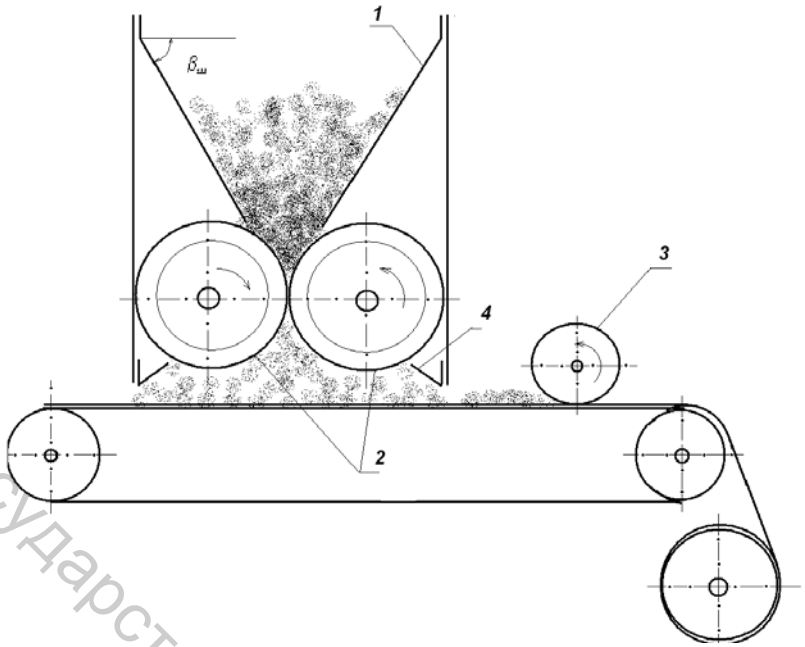
Устройство для нанесения волокнистого материала на поверхность основы обеспечивает равномерное распределение материала, исключает зацепление частиц и накапливание их на валиках.

Предлагаемое устройство состоит из загрузочной шахты *1*, механизма нанесения материала на основу, включающего валики *2* и щетки *4* (рисунок 4.34), поверхность валиков выполнена в виде иголок (рисунок 4.35).

Устройство работает следующим образом: волокнистый материал из загрузочной шахты *1* по наклонным стенкам под силой тяжести попадает на питающие валики *2*, которые разрыхляют и распределяют волокнистый материал на поверхности основы. Установленные на корпусе съемные щетки *4* исключают накапливание волокнистого материала на валиках. Материал, попадая на основу, уплотняется

Витебский государственный технологический университет

валиком *3* (при необходимости, в случае дополнительной отделке текстильных композитов).



1 – загрузочная шахта, 2 – питающие валики, 3 – уплотняющий валик, 4 – щетки

Рисунок 4.34 – Схема устройства для нанесения волокнистого материала на основу

Шахта *1* выполнена в виде конуса, под углом к питающим валикам *2*. Угол наклона стенок питающей шахты ($\beta_ш$) изменяется в зависимости от свойств наносимого продукта, его массы и требуемой поверхностной плотности готового полотна, обеспечивая непрерывную подачу под действием силы тяжести нитей. Для непрерывной подачи материала необходимо выполнение условия

$$\beta_ш \geq arctg\, f_ш \ ,$$

где $f_ш$ – коэффициент трения материала о стальную поверхность.

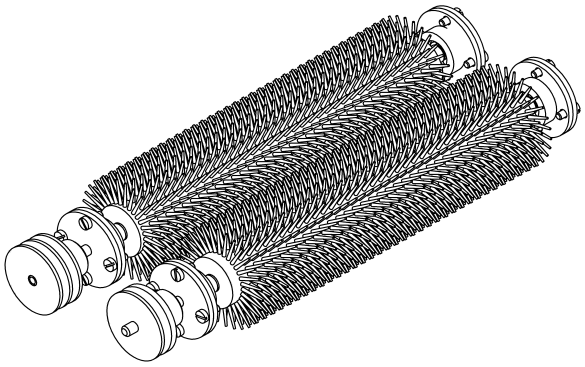


Рисунок 4.35 – Питающие валики

Витебский государственный технологический университет

Диаметры питающих валиков равны между собой и соответствуют 50 мм. В устройстве предусмотрено регулирование расстояния между питающими валиками, что обеспечивает возможность дозирования подачи материала на основу.

Производительность устройства можно определить по формуле

$$P = S_{щ} V_{в} \mu_{в}, \text{ кг/с}, \quad (4.102)$$

где $S_{щ}$ – площадь щели между валиками, м^2;

$V_{в}$ – скорость валиков, м/с;

$\mu_{в}$ – плотность продукта, зажимаемого выпускными валиками, кг/м^3.

$$S_{щ} = a_{щ} b_{щ}, \text{ м}^2, \quad (4.103)$$

где $a_{щ}$ – длина щели между валиками, м;

$b_{щ}$ – ширина щели между валиками, м.

Для получения равномерного покрытия необходимо, чтобы продукт поступал на основу равными порциями в единицу времени, то есть необходимо изменять скорость его подачи в зависимости от требуемого поверхностного заполнения основы продуктом. В равные промежутки времени через питающие валики должно проходить одно и то же количество материала по объему, при этом работа валиков должна отвечать условию

$$V_{в} h_{сл} a_{сл} \rho_{сл} = const,$$

где $V_{в}$ – скорость питания, линейная скорость питающих валиков, м/с;

$h_{сл}$ – толщина подаваемого слоя, м;

$a_{сл}$ – ширина слоя, м;

$\rho_{сл}$ – плотность слоя волокна, кг/м^3.

Рассмотрим условие затягивания волокнистого материала в зазор между питающими валиками (рисунок 4.36). На материал действуют следующие силы:

G – сила тяжести волокнистого материала, Н;

N_1,N_2 – силы реакции валиков, Н;

T_1, T_2 – силы трения материала о поверхность валиков, Н;

α_1, α_2 – углы захвата волокнистой массы валиками, град.

α_1, α_2 зависят от угла наклона стенок шахты и расстояния между пластинами.

Витебский государственный технологический университет

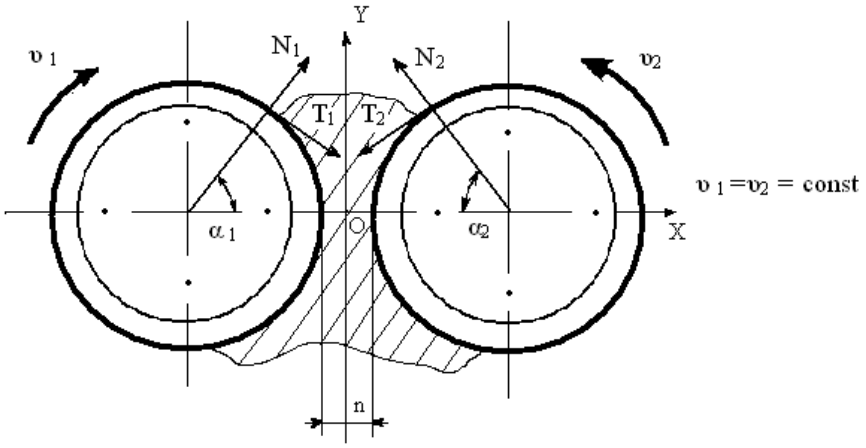


Рисунок 4.36 – Схема затягивания материала валиками

Материал в постепенно сужающемся пространстве претерпевает все увеличивающуюся деформацию, он испытывает растягивающие, сжимающие напряжения, которые увеличиваются за счет вращения валиков.

Силы трения определяются из следующих зависимостей:

$$T_1 = T_2 = N_1 f_1 = N_2 f_2 = N_1 tg\beta_1 = N_2 tg\beta_2,$$

где f_1, f_2 – коэффициенты трения материала о поверхность валиков;

β_1, β_2 – углы трения волокнистой массы о поверхность валиков, град.

Величины β_1, β_2 зависят от вязкости волокнистой массы.

Составим уравнение равновесия величины проекций сил на ось *OX*; при этом примем, что центр координат находится в середине зазора:

$$F = G - N_1 \sin\alpha_1 - N_2 \sin\alpha_2 + T_1 \cos\alpha_1 + T_2 \cos\alpha_2, \qquad (4.104)$$

где F – сила затягивания материала в зазор, Н.

Подставляя значения T_1, T_2, получим

$$F = G - N_1(\sin\alpha_1 + \cos\alpha_1 tg\beta_1) - N_2(\sin\alpha_2 + \cos\alpha_2 tg\beta_2). \qquad (4.105)$$

Если принять, что

$$\alpha = \alpha_1 = \alpha_2 \text{ и } \beta = \beta_1 = \beta_2,$$

то сила затягивания материала в зазор между валиками равна

$$F = G - 2N(\sin\alpha + \cos\alpha tg\beta). \qquad (4.106)$$

Витебский государственный технологический университет

Тогда масса продукта, затягиваемая валиками, при $G = mg$

$$m = \frac{F + 2N(\sin\alpha + \cos\alpha tg\beta)}{g}, \text{ кг.} \qquad (4.107)$$

Рассмотрим движение частиц, падающих на поверхность основы с высоты h, без учета сопротивления воздуха (рисунок 4.37). Частицы падают на поверхность основы под углом α с начальной скоростью υ_0 и конечной υ_y.

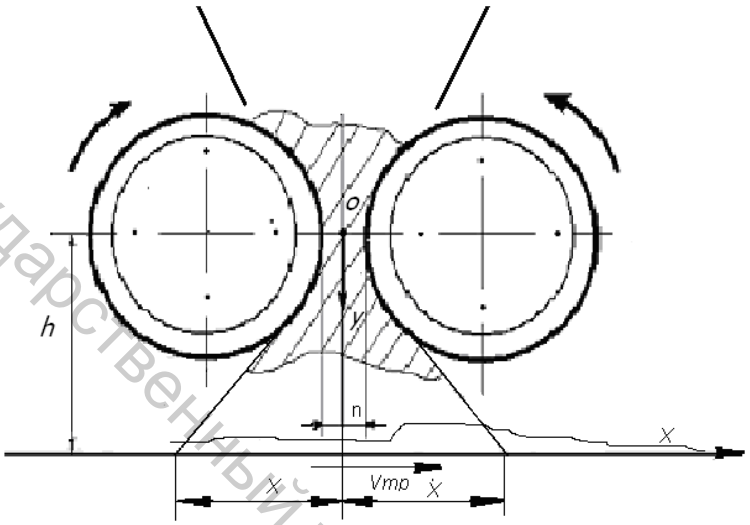


Рисунок 4.37 – Распределения материала на поверхности основы

Дифференциальное уравнение движения волокнистого материала имеет вид:

$$m_э \frac{dV}{dt} = -6\pi\mu \frac{d_э}{2} V, \qquad (4.108)$$

где $d_э$ – диаметр эквивалентный:

$$d_э = \frac{3}{16}\pi d_ч, \text{ м,}$$

где $d_ч$ – диаметр частицы, м;

$m_э$ – масса эквивалентная:

$$m_э = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{d_э}{2}\right)^3 \rho, \text{ кг;}$$

μ – динамическая вязкость ($\mu = 1 \cdot 10^{-5}$), Па·с;

ρ – плотность вещества, ($\rho = \frac{m}{V_м}$, $V_м$ – объем), кг/м^3;

t – время, с.

Для нахождения ширины нанесения продукта на поверхность основы за время t проинтегрируем уравнение (4.108) и получим

Витебский государственный технологический университет

зависимость скорости частицы на выходе, времени, динамической вязкости, диаметра и массы частицы:

$$V_y = V_0 e^{-\frac{3\pi\mu d_э t}{m_э}}, \text{ м/с.} \qquad (4.109)$$

Следовательно, ускорение равно

$$a_y = \frac{dV_y}{dt} = -\frac{3\pi\mu d_э}{m_э} V_0 e^{-\frac{3\pi\mu d_э t}{m_э}}, \text{ м/с}^2. \quad 4.110)$$

При неравноускоренном движении координата *y* определяется

$$y = V_0 t + \frac{at^2}{2} \qquad (4.111)$$

или

$$y = V_0 t - \frac{V_0 3\pi\mu d_э e^{-\frac{3\pi\mu d_э t}{m_э}} t^2}{2m_э}, \text{ м.} \qquad (4.112)$$

При плотности волокнистого материала 0,08 кг/м^3, радиусе распределяющих валиков 0,025 м, диаметре частицы 0,0005 м получим изменение положения частиц *y* при разных интервалах времени *t* при разной частоте вращения распределяющих валиков *n* (рисунок 4.38).

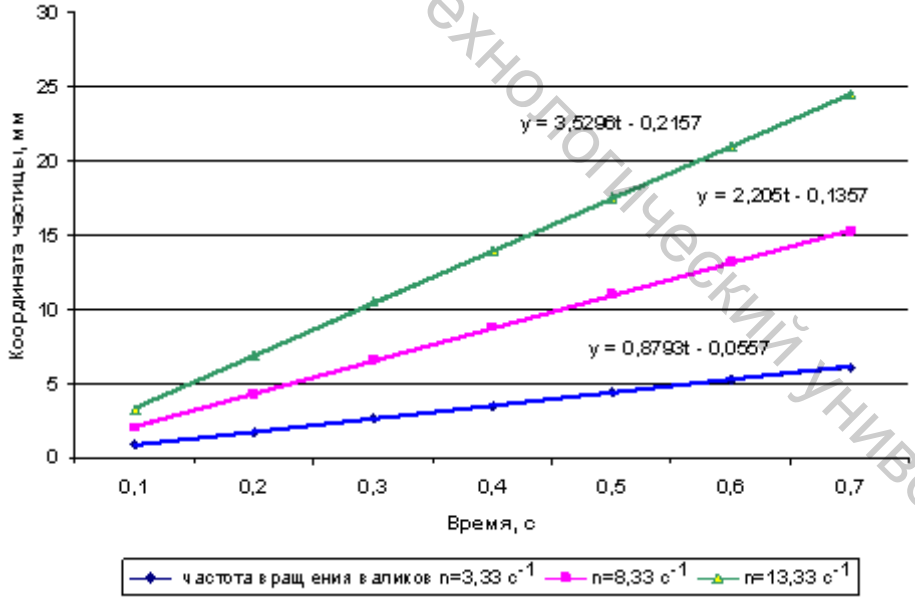


Рисунок 4.38 – Зависимость координаты волокнистой частицы от времени

За время падения частицы *t* по оси *y* перемещение любой точки полотна определяется из зависимости

Витебский государственный технологический университет

$$x = V_{mp} t \text{ , м,} \qquad (4.113)$$

где V_{mp} – скорость движения полотна, м/с;
t – время, с.
Тогда, решая систему уравнений

$$\begin{cases} y = V_o t - \dfrac{V_o 3\pi\mu d_э e^{-\frac{3\pi\mu d_э t}{m_э}} t^2}{2m_э} \\ x = V_{mp} \cdot t \end{cases} \qquad (4.114)$$

Например, при скорости движения полотна основы 50 м/мин и частоте вращения распределяющих валиков 3,33 $с^{-1}$ получим значения координаты x.

График зависимости размера наносимого волокнистого покрытия от времени представлен на рисунке 4.39.

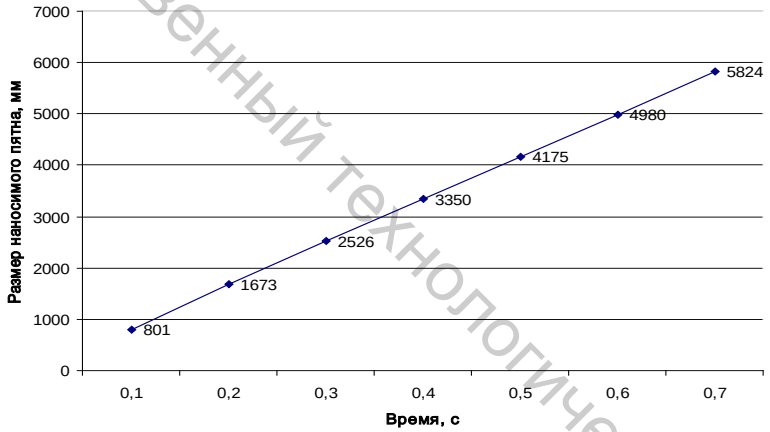


Рисунок 4.39 – Зависимость размера наносимого волокнистого покрытия от времени

Производительность устройства зависит от расстояния между распределяющими валиками n.

$$P = \frac{60}{1000} \rho S_щ V_{вал} \text{, кг/с,} \qquad (4.115)$$

где ρ – плотность продукта, $кг/м^3$;
$S_щ$ – площадь щели между распределяющими валиками, $м^2$;
$V_{вал}$ – скорость вращения распределяющих валиков, м/с.

$$S_щ = mn,$$

где m – длина распределительных валиков, м.

Витебский государственный технологический университет

Длина распределительных валиков m равна δ – длине пластин роторного дозатора.

Производительность устройства можно также определить из зависимости

$$P = \rho_{покр} в V_{тр}, \text{ кг/с}, \qquad (4.116)$$

где $\rho_{покр}$ – поверхностная плотность покрытия, кг/м^2;

$в$ – ширина полотна, м.

Следовательно, поверхностная плотность готового покрытия

$$\rho_{покр} = \frac{60\rho S_{щели} V_{вал}}{1000 в V_{тр}}, \text{ кг/м}^2. \qquad (4.117)$$

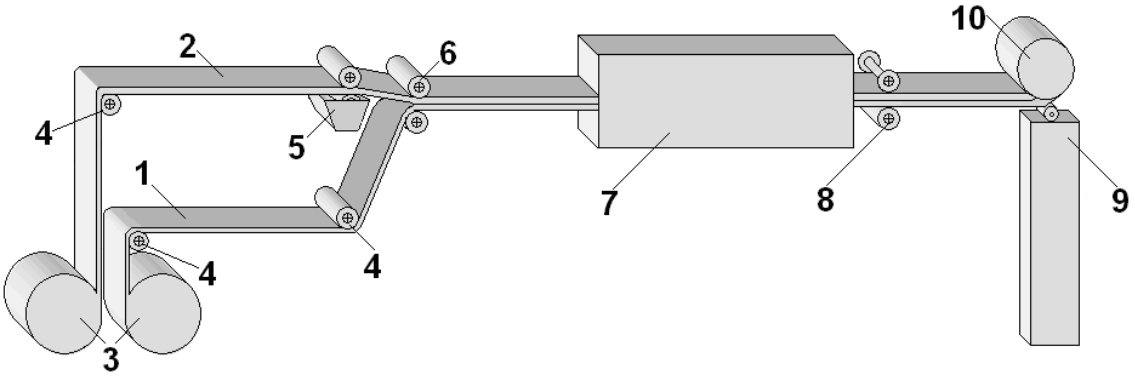
При увеличении скорости движения полотна основы регулирование количества наносимого продукта возможно за счет увеличения расстояния между распределяющими валиками и угла наклона питающей шахты [69].

4.3 Формирование композиционного дуплексного материала с тканым покрытием

Композиционные дуплексные материалы состоят из полотна основы, в качестве которой может использоваться нетканый материал (бумага, флизелин и др.), и полотна ткани. Нами разработан технологический процесс получения дуплексных материалов, используемых в качестве новых текстильных настенных покрытий. Сущность получения текстильных дуплексных материалов заключается в следующем (рисунок 4.40). Верхнее полотно (декоративная ткань из натуральных и химических волокон) *1* и нижний слой (основа – бумага или флизелин) *2* подаются в рулонную установку *3*, пройдя которую они движутся через направляющие валики *4* к узлу нанесения клея *5*. Клей наносится на полотно основы. По ходу полотна происходит склейка двух слоев системами прижимных валиков 6. Полотно дуплексного материала поступает в сушильную камеру 7 и проходит узел обрезки кромки 8. Затем готовое полотно подается на автомат 9 для размотки в потребительские рулончики 10.

При использовании разреженной ткани в качестве верхнего слоя текстильных настенных покрытий полотно основы предварительно может проходить процесс нанесения рисунка или фона на лакокрасочной секции.

Витебский государственный технологический университет



1 – полотно основы; 2 – тканое полотно; 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 – готовые текстильные дуплексные материалы в рулончиках

Рисунок 4.40 – Схема получения дуплексных текстильных материалов в лабораторных условиях

Технологический процесс получения дуплексных материалов был апробирован в производственных условиях ОАО «Белорусские обои» (г. Минск) на технологической линии "Ламипринт-5" фирмы "Нексус Технолоджи Корпорейшн" (Великобритания), созданной на базе узлов импортного оборудования и отдельных узлов склеивающих линий "Дуплекс", в том числе с использованием сушильных камер "Брэдбери".

В качестве материала, используемого как полотно основы (нижнего слоя) текстильных дуплексных материалов, используемых в качестве настенных покрытий, могут быть материалы, применяемые в обоепечатном производстве, в частности на ОАО «Белорусские обои», – бумажное и флизелиновое полотна (таблица 4.12).

При получении текстильных настенных покрытий в качестве верхнего слоя рекомендуется использовать ткани поверхностной плотности не более 110 г/м^2.

Для соединения текстильного полотна и полотна основы склеиванием изначально применялся клеевой состав, используемый для производства дуплексных обоев на ОАО «Белорусские обои»: клей упругоэластичный на основе поливинилового спирта (ПВС) фирмы “Клариант” (Швейцария) или на основе дисперсии ПВА.

Промышленное производство текстильных настенных покрытий осуществляется на технологической линии “Ламипринт-5” ОАО «Белорусские обои».

Витебский государственный технологический университет

Таблица 4.12 – Физико-механические свойства бумаги и флизелина для изготовления текстильных дуплексных материалов (текстильные обои)

Показатель	Фактические значения показателя		Научная документация на методы испытаний
	бумага	флизелин	
Масса бумаги площадью1 м^2, г	80,0	65,0±3,0	ГОСТ 13199-94
Толщина, мкм	172,0	-	ГОСТ 27015-86
Разрушающее усилие (в машинном направлении), Н, не менее	55	70-в машинном, 30-в поперечном	ГОСТ ИСО 1924-1-96
Относительное удлинение в машинном направлении, %, не менее	1,4	2,2	ГОСТ ИСО 1924-1-96
Разрушающее усилие во влажном состоянии (в машинном направлении), Н, не менее	6,0	-	ГОСТ 13525,7-68 ГОСТ 6749-86
Впитываемость при одностороннем смачивании, г/м^2	23,0	30,0	ГОСТ 12605-82 ГОСТ 6749-86
Белизна, %, не менее	60,0	80,0	ГОСТ 30113-94
Влажность, %	5,1	3,0-6,0	ГОСТ 13525.19-71
Колебания массы по ширине полотна, г/м^2, не более	2,0	-	ГОСТ 6749-86

В состав линии входят: два узла размотки (верхнего слоя – тканого полотна, и нижнего полотна – основы); два стола-накопителя тканого полотна и полотна основы; узел нанесения клея; узел склеивания; узел обрезки кромки; два стола-накопителя готового полотна настенных покрытий; сушильная камера для сушки настенных покрытий; автомат для раскатки текстильных настенных покрытий в потребительские рулончики.

Технологический процесс производства текстильных настенных покрытий включает следующие операции:

- подготовка машины "Ламипринт-5" к работе;
- установка используемых материалов на линию;
- склейка тканого полотна и полотна основы;
- раскат в рулоны готового настенного покрытия;
- упаковка и маркировка готового текстильного настенного покрытия.

Сущность производства текстильных настенных покрытий на линии «Ламипринт-5» заключается в следующем [70].

На линию для производства текстильных настенных покрытий в узел размотки поступают полотно основы и ткань на намоточных валиках, представляющих собой тонкостенную трубку с

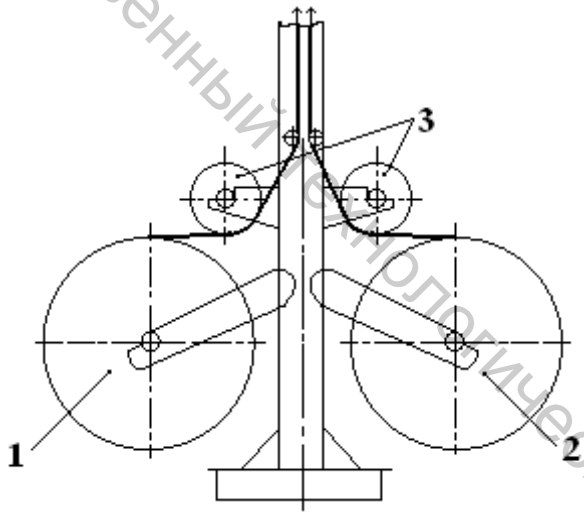
Витебский государственный технологический университет

запрессованными на концах шарикоподшипниками, в рулонах следующих габаритов:

- полотно флизелина и бумаги шириной 0,56 м (диаметр рулона – 1 м);
- полотно ткани шириной 0,53 – 0,55 м (диаметр рулона – 1 м).

Узел размотки служит для установки рулонов, которые надеваются на специальные оправки, снабженные тормозами для создания натяжения полотна при размотке.

Из узла размотки текстильное полотно *1* и полотно основы *2* направляются в устройство, регулирующее натяжение полотен *3* (рисунок 4.41). Полотно основы и ткани должны иметь определённые уровни натяжения, оптимальная величина которых находится между факторами стабильности проводки и опасностью разрыва. Натяжение бумажного (флизелинового) и текстильного полотен необходимо регулировать, поскольку, с одной стороны, их свойства могут меняться от рулона к рулону, а с другой стороны, на них оказывают возмущающее воздействие различные силы. Натяжение полотна бумаги составляет 50 Н/м, флизелина – 65 Н/м, разреженной декоративной ткани – 30 Н/м (по данным ОАО «Белорусские обои»).



1 – рулон с текстильным полотном; 2 – рулон с полотном основы; 3 - натяжное устройство

Рисунок 4.41 – Схема узла размотки

На линии «Ламипринт-5» используется способ натяжения полотен с применением бумаговедущего валика с системой электронного регулирования, который оснащен датчиками для измерения усилий и выполняет функции измерительного звена. Электронный регулятор преобразует отклонения полученного сигнала от заданного и вырабатывает сигнал управления. Регулирование посредством привода лентоведущих пар осуществляется серводвигателями с частотным управлением. Из рулонной установки через устройство натяжения тканое полотно и полотно основы поступают к системе столов-

Витебский государственный технологический университет

накопителей. Столы – накопители служат для обеспечения бесперебойной работы технологической линии.

На линии по производству текстильных настенных покрытий установлены три стола-накопителя: между узлом размотки и узлом нанесения клея, узлом обрезки кромки и сушильной камерой, сушильной камерой и автоматом размотки в потребительские рулончики.

Первая система столов-накопителей (подающие столы-накопители) предназначена для подачи в производственную зону полона ткани и основы, и для вылеживания полотен перед их склеиванием. Она представляет собой металлические столы длиной 2 м и шириной 0,7 м отдельно для текстильного полотна и полотна основы. Изображение стола-накопителя с полотном бумаги представлено на рисунке 4.42.

Рисунок 4.42 – Положение бумаги на столе-накопителе линии по производству дуплексных текстильных материалов

Второй стол-накопитель необходим для регулировки текстильного полотна на полотне основы перед их окончательным склеиванием – сушкой, а также обеспечивает равномерность подачи полотен ткани и основы между технологическими операциями склеивания и сушки.

Третий стол-накопитель находится за сушильной камерой и нужен для охлаждения настенных покрытий после прохождения сушильной камеры.

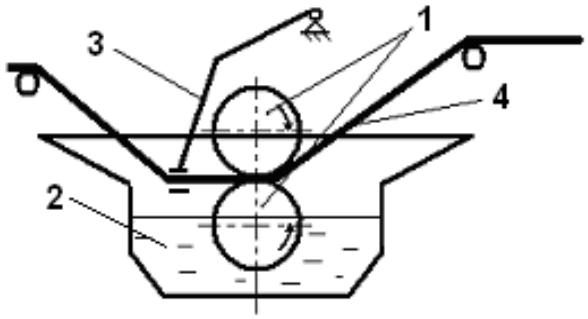
Пройдя первую систему столов-накопителей, ткань и полотно основы поступают в узел для нанесения клея на нижнее полотно (полотно основы).

Узел нанесения клея представляет собой систему, состоящую из корыта с клеящим составом и пары валиков диаметром 200 мм. Валики вращаются по направлению движения полотна со скоростью 30 м/мин.

Когда полотно основы *4* поступает в узел нанесения клея, бумага (флизелин) проходит между валиками *1* (рисунок 4.43). Нижний валик окунается в клей *2* и, вращаясь, наносит его на полотна основы.

Витебский государственный технологический университет

Излишки нанесенного клея снимаются раклей *3*. Толщина клеевого слоя не должна превышать 0,25 – 0,3 мм.



1 – валики для нанесения клея; 2 – клей; 3 – ракли; 4 – полотно основы

Рисунок 4.43 – Схема узла для нанесения клеевой массы на основу дуплексных текстильных материалов

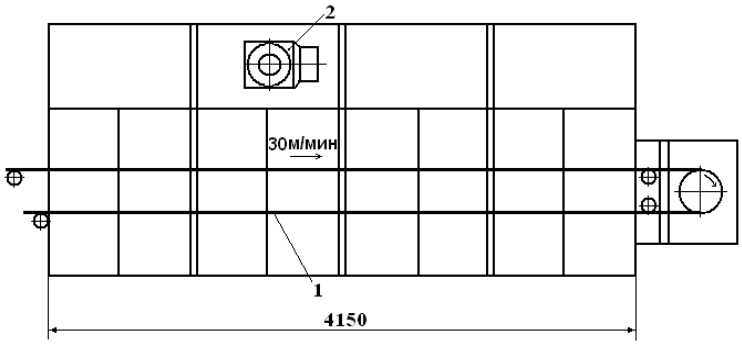
Далее, по ходу полотна, происходит соединение двух слоев текстильных настенных покрытий. Для соединения и фиксации ткани на поверхности полотна основы предназначена секция прижимных валиков. Соединение полотен происходит с помощью пары валиков. Верхний валик имеет эластичное покрытие из синтетического материала – нитрильного каучука с добавлением серы для снижения электризации и усиления электропроводности. Нижний валик изготовлен из стали с твердостью поверхности H_{R_c} 55. Дальнейшая фиксация тканого полотна на полотне основы осуществляется тремя системами прижимных валиков.

По бумагопроводящим валикам настенное покрытие подводится ко второму столу-накопителю, а затем поступает в сушильную камеру. Для сушки текстильных настенных покрытий применяется сушилка непрерывного действия. Она представляет собой длинную камеру, в которой движется склеенное полотно текстильных обоев, поступающее сюда с узла нанесения клея. В камеру калорифером подается подогретый воздух, который необходим для ускорения процесса полимеризации клея.

На линии для производства текстильных настенных покрытий используется сушильная камера фирмы “Нексус Технолоджи Корпорейшн”.

В данной сушильной камере нагрев воздуха производится калорифером 2 мощностью 23 кВт (рисунок 4.44). Температура в камере для осуществления процесса сушки может возрастать до 200 ^{0}С, при производстве текстильных покрытий она колеблется в пределах 70±10 ^{0}С. Скорость прохождения текстильных настенных покрытий 1 сушильной камеры – 30 м/мин.

Витебский государственный технологический университет



1 – текстильное настенное покрытие; 2 - калорифер

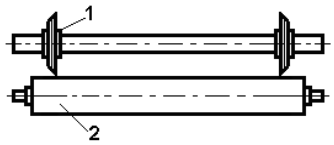
Рисунок 4.44 – Схема сушильной камеры “Брэдбери” фирмы “Нексус Технолоджи Корпорейшн”

Полотно текстильных настенных покрытий, выйдя из сушильной камеры, поступает в узел обрезки кромки, где ножи продольной резки обеспечивают обрезку кромок заданной ширины как с правой, так и с левой стороны полотна обоев.

Для обрезки кромки применяют два метода резки: по принципу ножниц и под давлением [71]. При резке по принципу ножниц полотно проходит между режущими кромками ножевого вала и дискового ножа. С использованием метода давления полотно охватывает ножевой вал. К нему сверху прижимается дисковый нож, осуществляющий резку полотна.

Узел обрезки кромки на технологической линии “Ламипринт-5” использует метод резки под давлением и представляет собой рабочую пару “ножевой вал – дисковый нож”.

Полотно текстильного настенного покрытия подается на вал 2 и попадает под действие дискового ножа *1* диаметром 110 мм, совершающего вращательное движение с постоянной окружной скоростью (рисунок 4.45). Дисковый нож вращается в направлении против часовой стрелки, что обеспечивает сжатие полотна текстильных настенных покрытий в процессе резания и препятствует его сдвигу.

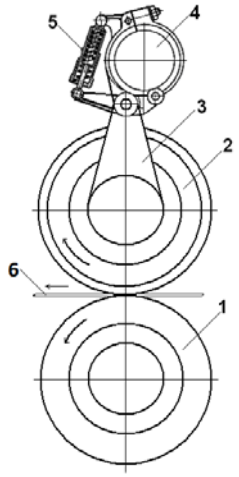


1 – нож; 2 – вал

Рисунок 4.45 - Схема узла обрезки кромки

Поскольку кромкоотделение осуществляется по методу давления, ножи 2 к поверхности настенных покрытий 6, проходящих вал 1, прижимаются с помощью устройства, состоящего из рычага 3 кронштейна 4 и пружины 5 для прижима ножа (рисунок 4.46).

Витебский государственный технологический университет



1 – вал; 2 – дисковый нож; 3 – рычаг ножа; 4 – кронштейн ножа; 5 – пружина для прижима ножа; 6 – полотно текстильных настенных покрытий

Рисунок 4.46 – Узел обрезки кромки, оснащенный прижимным устройством

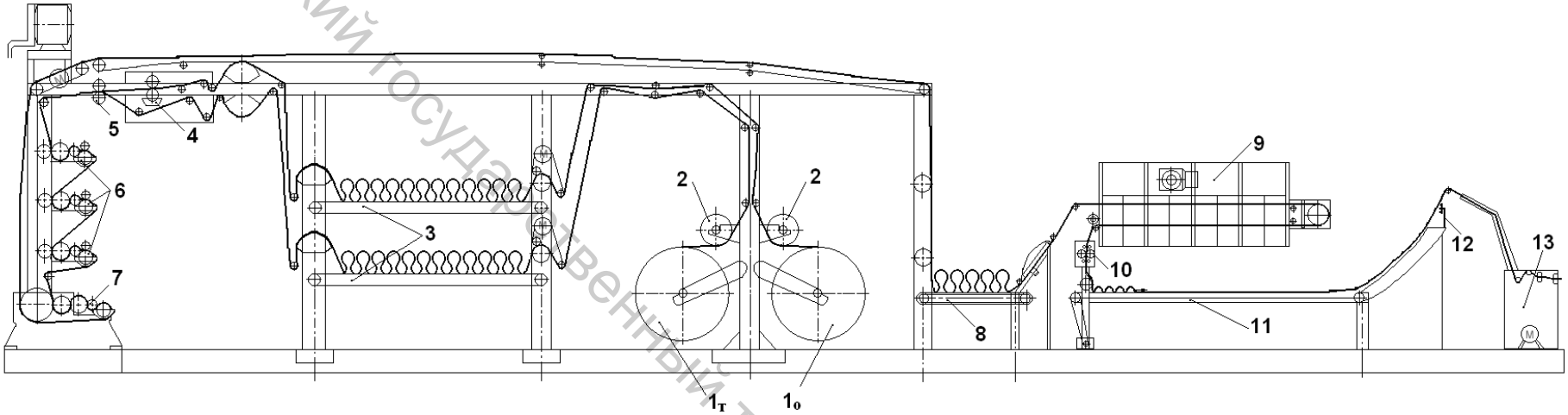
При данном методе обрезки кромки важно натяжение по ширине полотна настенных покрытий в месте их контакта с ножом. Натяжение в данной точке линии осуществляется с помощью двух пар натяжных валиков. Натяжение должно составлять порядка 25 – 30 Н/дм.

Узел обрезки кромки комплектуется системой пневмотранспортирования отрезанной кромки обоев, которая состоит из вентилятора, бункера-накопителя и воздуховодов и обеспечивает отбор и утилизацию отрезанных кромок.

Выйдя из сушильной камеры и пройдя узел обрезки кромки, полотно текстильных настенных покрытий охлаждается на третьем столе-накопителе и подается на автомат для размотки обоев в потребительские рулончики.

Технологическая схема производства текстильных настенных покрытий представлена на рисунке 4.47. Верхнее полотно (декоративная льняная ткань) 1_T и нижний слой (основа) 1_O подаются в рулонную установку, из которой они движутся через устройство натяжения *2* и систему столов-накопителей *3* к узлу нанесения клея *4*. Клей наносится на полотно основы. По ходу полотна происходит склейка двух слоев системами прижимных валиков *5* и их фиксация прижимными валиками *6* и *7*. Пройдя стол-накопитель *8*, полотно текстильных настенных покрытий поступает в сушильную камеру *9* и проходит узел обрезки кромки *10*. Затем полотно текстильных настенных покрытий со стола-накопителя *11* через устройство для снятия статического напряжения *12* подается на автомат для размотки обоев *13* в потребительские рулончики.

Витебский государственный технологический университет



$1_т$ – ткань; $1_о$ – основа; 2 – устройство натяжения; 3 – система столов-накопителей; 4 – узел нанесения клея; 5 – узел склеивания; 6, 7 – система прижимных валиков; 8, 11 – стол-накопитель; 9 – сушильная камера; 10 – узел обрезки кромки; 12 – устройство для нейтрализации зарядов статического электричества; 13 – автомат для размотки обоев в потребительские рулончики

Рисунок 4.47 – Технологическая схема производства текстильных настенных покрытий

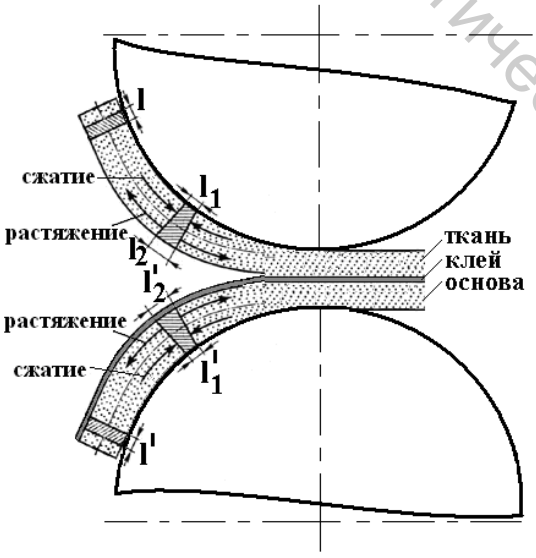
Витебский государственный технологический университет

4.3.1 Выбор угла подачи материалов в узел соединения слоев дуплексного текстильного материала

Для склеивания тканого полотна и материала основы (бумага, флизелин и другие нетканые полотна) на основу предварительно наносят клей, затем для соединения – текстильное полотно и основа проходят через систему валиков. В этом случае при склеивании происходит деформирование материалов, а не только их сжатие в плоском состоянии. При размотке материалов с определенной скоростью и их прохождении через рабочие органы оборудования неизбежны изгиб и растяжение обоих материалов. Такие виды деформаций приводят к возникновению дефектов, обусловленных напряженным состоянием материалов перед склеиванием.

При изгибе материала волокна, находящиеся на его внутренней поверхности, испытывают деформации растяжения, а волокна наружной поверхности — деформацию сжатия. При производстве опытной партии текстильных настенных покрытий возникла проблема различной релаксации волокон основы и текстильного материала, что привело к образованию складок на текстильном полотне. Данный дефект возник, потому что используемое оборудование, предназначено для производства дуплексных обоев, где происходит склеивание двух бумажных полотен с одинаковой релаксацией волокон при приложении нагрузки. Возникла необходимость определения деформаций материалов и, исходя из них, расчета оптимального угла подачи составляющих текстильного покрытия в узел склеивания.

На рисунке 4.48 показано действие сжимающих и растягивающих усилий на элемент полотна основы и текстильного материала толщины l и l' соответственно [72].



1 – тканое полотно; 2 – клей; 3 – полотно основы

Рисунок 4.48 – Деформация, возникающая в материалах в процессе склеивания

Витебский государственный технологический университет

Перед совмещением материалов (рисунок 4.48) внутри выделенного малого элемента l основы и текстильного полотна dl' возникают сжимающие и растягивающие напряжения. В результате их действия изменяются линейные размеры малого элемента l и l':

$$l_1 > l > l_2;$$
$$l_1' > l' > l_2'. \qquad (4.118)$$

На растянутой поверхности основы и текстильного материала происходит распрямление, растяжение и смещение волокон при их одновременном изгибе. Деформированные волокна на поверхности не успевают занять первоначальное положение перед контактом с адгезивом. Поэтому адгезив фиксирует деформированное состояние вытянутых волокон, которые затем, релаксируя, стягивают текстильный материал. После склеивания в результате различной релаксации волокон основы и текстильного материала на опорной поверхности из-за усадки образуются складки. Чем больше изогнуты оба материала и чем больше растянуты волокна внутренних слоев, тем больше стягивается материал при склеивании.

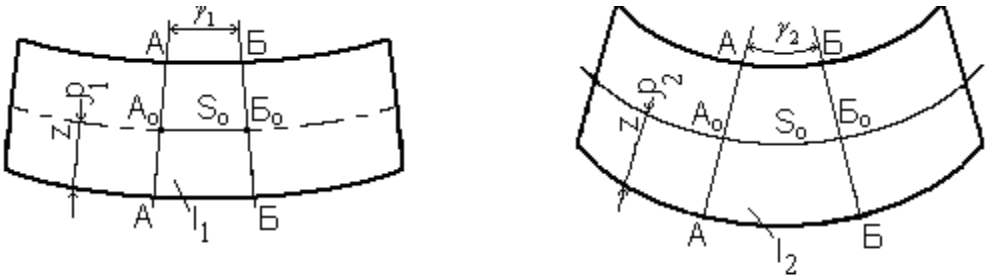
Стягиваемость материала зависит от его жесткости и поверхностной плотности: чем они меньше, тем больше проявляется стягиваемость. Чтобы устранить этот эффект, возникла необходимость в проведении дополнительных исследований по определению оптимального угла подачи материалов, обеспечивающего отсутствие эффекта стягиваемости текстильного полотна.

Для решения поставленной задачи необходимо:

- определить деформацию материалов (относительное удлинение) при подаче в узел склеивания технологической линии;
- рассчитать угол подачи материалов в узел склеивания;
- исходя из технических возможностей линии “Ламипринт - 5”, провести оптимизацию угла подачи материалов в узел склеивания, обеспечивающего отсутствие эффекта стягиваемости текстильного полотна.

Определим деформацию слоя материала при изгибе (рисунок 4.49), имеющего толщину z и ограниченного нормальными поперечными сечениями А – А и Б – Б, отстоящими по оси на расстоянии $A_0\acute{A}_0 = S_0$ [73].

Витебский государственный технологический университет



а **б**

а – материал в ненапряженном состоянии; б – материал в напряженном состоянии

Рисунок 4.49 – Деформация материалов при изгибе

Ось материала имеет радиус кривизны (мм/рад.):

- в ненапряженном состоянии (рисунок 4.49 а) [73]

$$\rho_1 = S_0 / \gamma_1; \tag{4.119}$$

- в напряженном состоянии (рисунок 4.49 б) [73]

$$\rho_2 = S_0 / \gamma_2, \tag{4.120}$$

где γ_1, γ_2 – углы кривизны оси материала в ненапряженном и напряженном состоянии соответственно, град.

Длина рассматриваемого слоя:

- в ненапряженном состоянии

$$l_1 = (\rho_1 + z)\gamma_1 = (1 + z/\rho_1) S_0; \tag{4.121}$$

- в напряженном состоянии

$$l_2 = (\rho_2 + z)\gamma_2 = (1 + z/\rho_2) S_0. \tag{4.122}$$

Учитывая выражения (4.119) – (4.122), относительное удлинение рассматриваемого слоя составит:

$$\varepsilon = \frac{l_2 - l_1}{l_1} = z\frac{1/\rho_2 - 1/\rho_1}{1 + z/\rho_1} = \frac{zK}{1 + z/\rho_2}, \tag{4.123}$$

где K – кривизна оси ткани (рад/мм).

Поскольку l_2 основы не равно l_2 текстильного материала, то величина ε этих материалов также различна, что подтверждает наличие данного дефекта.

Витебский государственный технологический университет

По формуле (4.123) рассчитаем относительное удлинение материалов:

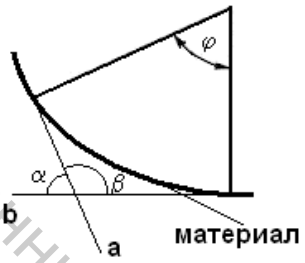
$\varepsilon = \frac{3,2-3,0}{3,0} = 0,067$ – для текстильного материала (декоративная льняная ткань);

$\varepsilon = \frac{3,1-3,0}{3,0} = 0,033$ – для текстильного материала (жаккардовая ткань);

$\varepsilon = \frac{3,01-3,0}{3,0} = 0,0033$ – для бумаги;

$\varepsilon = \frac{3,005-3,0}{3,0} = 0,017$ – для флизелина.

Определим угол подачи материала (рисунок 4.50).



α – угол подачи материала; φ – угол кривизны материала; a, b – касательные

Рисунок 4.50 – Определение угла подачи материала

Из рисунка 4.50 очевидно:

$$\beta = 360 - 90 - 90 - \varphi = 180 - \varphi, \quad (4.124)$$

$$\alpha = 180 - (180 - \varphi) = \varphi. \quad (4.125)$$

Таким образом, существует прямая зависимость между стягиваемостью материала и углом его изгибания. Чтобы устранить этот эффект, необходимо исключить всякий изгиб материалов перед их склеиванием ($\alpha = \varphi = 0$), но в силу конструкции линии по производству текстильных покрытий это невозможно. Поэтому необходимы исследования по оптимизации угла подачи материалов. Для технологической линии “Ламипринт - 5” угол подачи материалов равен 45 градусам.

Получим формулу для теоретического расчета угла подачи материалов.

Исходя из формул (4.121) – (4.123), проделав простейшие преобразования, получим

Витебский государственный технологический университет

$$\gamma = \frac{S_0 \cdot (z \cdot K - \varepsilon)}{z \cdot \varepsilon}, \quad (4.126)$$

где К – кривизна оси ткани, рад/мм:

$$K = \frac{1}{\rho}. \quad (4.127)$$

По формуле (4.126) произведем расчет угла подачи ткани (φ) по следующим данным:

- длина участка материала до изгиба, мм (S) 4,5 мм;
- относительное удлинение материала, при котором отсутствует эффект стягиваемости (ε) 0,003 или 0,3 %;
- кривизна оси ткани (K) – 0,02 град./мм;
- расстояние деформированного слоя ткани от нейтральной оси (z), 0,3 мм.

Таким образом, при производстве дуплексных текстильных материалов на технологической линии “Ламипринт - 5” рекомендуется уменьшить угол подачи материалов с 45 до 15 градусов, что позволит устранить дефект стягиваемости материалов, не прибегая к внесению конструктивных изменений в технологической линии.

4.3.2 Оптимальное давление при соединении текстильного полотна и полотна основы

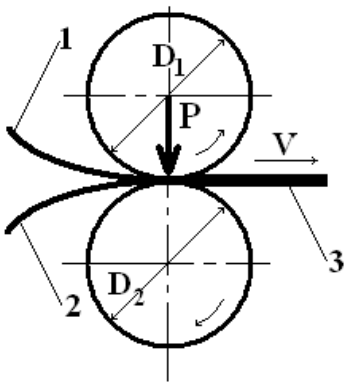
Создание контакта между склеиваемыми слоями дуплексных текстильных материалов − текстильным полотном и полотном основы и сохранение его в течение времени, необходимого для получения прочного клеевого соединения, обеспечивается внешним давлением. Это давление характеризуется силой, действующей на 1 см^2 поверхности дуплексного текстильного материала, и называется удельным давлением (Па). Удельное давление устанавливается в зависимости от применяемого клея, способа склеивания, вида склеиваемых материалов.

Для получения дуплексных текстильных материалов 3 при склеивании ткань 1 и основа 2 проходят между парой валиков (рисунок 4.51).

При поступлении склеиваемых поверхностей к паре валиков давление на склеиваемые поверхности отсутствует, следовательно, контакта между клеем и текстильным полотном нет.

Давление начинает возрастать с момента, когда расстояние между валиками становится меньше, чем общая толщина текстильных настенных покрытий (участок АВ диаграммы).

Витебский государственный технологический университет



1 – текстильное полотно; 2 – основа с клеем;
3 – дуплексный текстильный материал

Рисунок 4.51 – Узел склеивания слоев текстильных настенных покрытий

В момент, когда расстояние между валиками минимально – давление на склеиваемые материалы достигает величины давления, созданного верхним валиком (участок BC диаграммы). Затем происходит уменьшение давления (участок CD диаграммы). Диаграмма изменения удельного давления при склеивании слоев текстильных настенных покрытий представлена на рисунке 4.52.

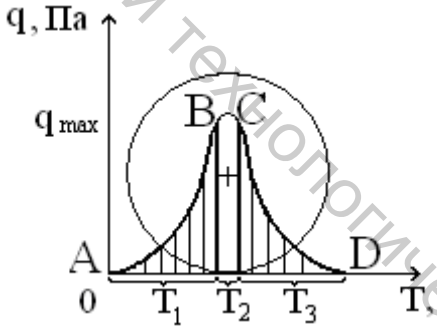


Рисунок 4.52 – Диаграмма изменения удельного давления при склеивании слоев дуплексных текстильных материалов

Рассчитаем давление при склеивании слоев дуплексных текстильных материалов.

Обозначим через давление ($P_д$, Па), которое возникает в валике. Тогда

$$P_в = Fq\,, \qquad (4.128)$$

где F – площадь склеивания, см^2;

q – удельное давление склеивания, Па/см^2.

Витебский государственный технологический университет

Поскольку для приклеивания ткани необходимо большее усилие, то величину удельного давления при склеивании текстильного полотна и основы необходимо выбирать по удельному давлению текстильного полотна из справочной литературы.

Удельное давление при склеивании (q) равно 630 – 945 Па/см^2 [74].

Определим площадь склеивания. Длина склеиваемого участка равна ширине дуплексного полотна и составляет 53 см.

Сила, с которой пара валиков действует на склеиваемые слои, распределена на отрезке, длина которого вычисляется по формуле

$$l_{ck} = \sqrt{R \times \left(\left(H_1 + H_2 \right) - H_3 \right)}, \qquad (4.129)$$

где l_{ck} – длина отрезка склеивания, м;

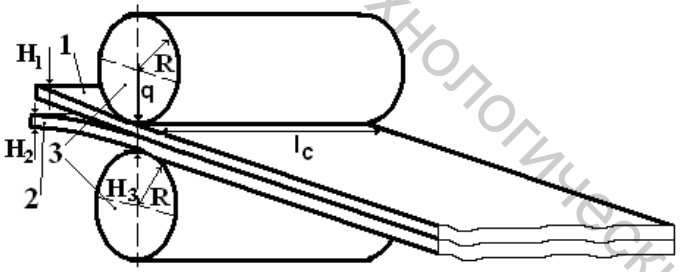
R – радиус валиков, м;

H_1 –толщина полотна основы с нанесенным на нее клеем, м;

H_2 – толщина текстильного полотна, м;

H_3 – толщина настенных покрытий в зажиме валиков, м.

Толщина основы (1) H_1, ткани (2) H_2 и обоев под валиками (3) H_3 определялись экспериментально (рисунок 4.53) и составили 0,135 см, 0,017 см, 0,140 см, соответственно. Радиус валиков в узле склеивания – 30 см.



1 – основа; 2 – текстильное полотно; 3 – пара валиков, создающих давление

Рисунок 4.53 – Определение толщины слоев дуплексных текстильных материалов в узле склеивания

Рассчитанная по формуле (4.129) ширина склеиваемого участка равна 0,6 см. Таким образом, площадь склеивания – 31,8 см^2.

Исходя из полученных данных, давление при склеивании выбирается в промежутке 20 – 30 кПа. Увеличение давления сверх данных норм ведет к развитию системы механического стеклования, затрудняющего процессы реологии при формировании контакта, способствует образованию «голодных спаек» (отсутствие клея между склеиваемыми материалами), приводит к изменению толщины

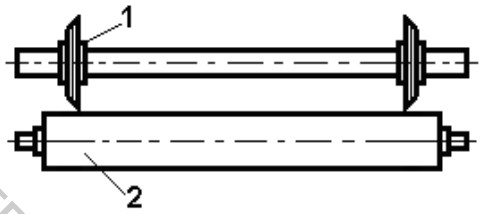
Витебский государственный технологический университет

дуплексных материалов, ухудшающей внешний вид готового продукта и способствующей проступанию клея на поверхность ткани, уменьшение давления – снижает прочность склеивания.

Давление 20 – 30 кПа соответствует давлению, прилагаемому к материалам при дублировании деталей швейных изделий [75]. Таким образом, в узле склеивания рекомендуется задавать давление 25 – 28 кПа, соответствующее давлению, при дублировании деталей швейных изделий из льняных тканей.

4.3.3 Узел обрезки кромки

Узел обрезки кромки представляет собой рабочую пару вал *2* – нож *1* (рисунок 4.54).



1 – нож; 2 – вал

Рисунок 4.54 – Схема узла обрезки кромки

Для бумажных дуплексных материалов для обрезки кромки используется нож из инструментальной стали «Standart» и имеет геометрию режущего клина, соответствующую физико-механическим свойствам бумаги. Но в результате изменения вида обрабатываемого материала и его структуры, оказывающих значительное влияние на ход технологического процесса, качество обрезки кромки этими ножами неудовлетворительно и сами ножи быстро затупляются.

Для устранения указанных недостатков необходимо решить задачу подбора материала для изготовления ножей и внести изменения в их конструкцию.

Долговечность ножей, характеризующая длительность сохранения требуемой остроты, определяется оптимальным соотношением следующих факторов: материала ножа, его геометрической формой, угла и качества заточки, свойствами разрезаемого материала. Выбор материала ножа производится исходя из следующих требований: высокая режущая способность и износостойкость изготовленного инструмента, технологичность изготовления, экономичность и отсутствие дефицитности материала [76].

Согласно проведенным исследованиям [76, 77], наилучшими материалами для изготовления дисковых ножей являются углеродистые

Витебский государственный технологический университет

инструментальные стали марки У8А и У10А, а также легированная сталь.

Для решения задачи по увеличению износостойкости ножей, для их изготовления применили материал – сталь марки У8А.

Анализ геометрических форм заточки ножей показывает, что развитие форм поперечных сечений идет в сторону плавного убывания угла заточки от кромки к телу ножа [77]. Углы заточки ножей выработаны практикой без достаточных теоретических оснований. Профессор Д.Н. Третьяков рекомендовал следующие углы заточки ножей: сапожные ножи – 20 – 25 градусов, медицинские ножи для нежных тканей – 10 градусов, резцы для мягкого дерева – 20 градусов, ножи по текстильным материалам – 15 – 20 градусов [78].

Нож с односторонней заточкой (рисунок 4.55), внедряясь под действием силы *P* в текстильное настенное покрытие, воздействует на него и отрезаемую кромку как клин, главным образом, своими гранями [78].

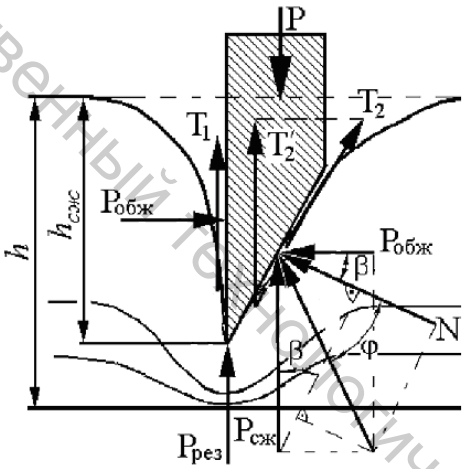


Рисунок 4.55 – Силовое взаимодействие ножа с односторонней заточкой с материалом

Нож с двусторонней заточкой (рисунок 4.56) при внедрении в дуплексный текстильный материал под действием силы *P* осуществляет резание, главным образом, режущей кромкой – вершиной двугранного угла, образованного гранями ножа [77].

Разделению материала на части под воздействием ножа предшествует процесс предварительного сжатия им материала до возникновения на его кромке разрушающего контактного напряжения σ_p, момент возникновения которого определяется значением усилия Р, прикладываемого к ножу.

Витебский государственный технологический университет

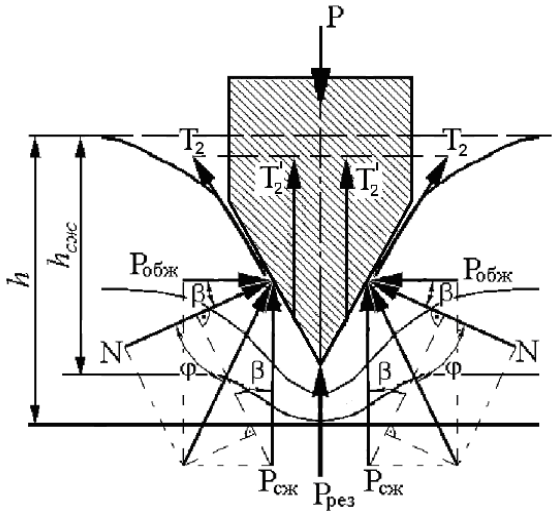


Рисунок 4.56 – Силовое взаимодействие ножа с двусторонней заточкой с материалом

При углублении лезвия в слой материала толщиной h (рисунки 4.55, 4.56) на величину $h_{сж}$, когда на его режущей кромке возникает разрушающее контактное напряжение, начинается процесс резания. На нож действуют следующие силы: $P_{рез}$ – сопротивление разрушению материала под кромкой ножа, направленное вверх; $P_{обж}$ – силы обжатия материалом, имеющие горизонтальное направление и действующие на боковые грани лезвия ножа; $P_{сж}$ – сопротивление слою сжатия фаской лезвия, направленное вверх [79].

Согласно исследованиям Борисенко А.А. и Бареяна А.Г. [79], результирующая сила при резании для ножа с односторонней заточкой равна:

$$P_1 = \delta \cdot \sigma_p + 0{,}5 \cdot \left(h_{сж}^2 / h\right)\left[f \cdot \sin^2 \beta + \mu\left(1 + \cos^2 \beta\right)\right], \qquad (4.130)$$

δ – толщина кромки лезвия, $(0{,}5\text{-}1{,}5)\cdot 10^{-3}$ м;

σ_p – разрушающее контактное напряжение Н/м,

E – модуль упругости нити, 6500 – 7000 Н/м^2;

$h_{сж}$ – величина сжатия материала, 0,3 – 0,5 толщины материала, м;

h – толщина текстильных настенных покрытий, м;

β – угол заточки, градус;

μ – коэффициент Пуассона, 0,6 – 0,7;

f – коэффициент трения текстильного полотна о нож, 0,20 – 0,21.

Сила резания для ножа с двусторонней заточкой

$$P_2 = \delta \cdot \sigma_p + tg\left(h_{сж}^2 / h\right)\left[f \cdot \beta + \mu\left(1 + \cos^2 \beta\right)\right]. \qquad (4.131)$$

Витебский государственный технологический университет

Данные формулы используются для описания статического взаимодействия лезвия с материалом.

Таким образом, определено, что при двусторонней заточке лезвия сила резания в 1,01 – 1,3 раза ниже, чем при односторонней, при равных прочих условиях (рисунок 4.57). Таким образом, рациональнее использовать нож с двусторонней заточкой лезвия.

Проанализировав полученные результаты, для выполнения операции отделения кромки текстильных настенных покрытий выбирается дисковый нож с двусторонней симметричной заточкой толщиной кромки лезвия 3 мм и углом заточки 18 градусов [80].

Рисунок 4.57 – Зависимость соотношений сил резания ножа с одно- и двусторонней заточкой от угла заточки ножа

С помощью динамометра УДМ-600 экспериментально определено, что сила резания для текстильных настенных покрытий, состоящих из бумаги и ткани из короткого льняного волокна, она составляет 6,58 Н/мм.

Исходя из современных способов повышения износостойкости и долговечности ножей, рекомендовалась лазерная упрочняющая обработка. При лазерной обработке стали марки У8А микротвердость повышается до 8,81 – 0,1 ГПа и более.

При установке ножей на линию «Ламипринт-5» по производству текстильных настенных покрытий важно точно выставить расстояние между валом и ножом. При расстоянии между валом и ножом, равным нулю, будут либо затупляться ножи, либо на валу будут образовываться риски. Если выставить расстояние выше допустимого – процесс кромкоотделения осуществляться не будет.

Витебский государственный технологический университет

Исследования [79] показали, что значения сил сопротивления материала резанию увеличиваются при погружении ножа в материал на 70 – 85% его толщины. При дальнейшем погружении резака в материал наступает момент, когда расклинивающая сила достаточно велика, чтобы разорвать неперерезанную часть материала. Исходя из данных исследований, зазор между валом и ножами должен составлять 30 – 15 % толщины полотна основы. Таким образом, расстояние между валом и ножом должно составлять 25 – 50 мкм.

В таблице 4.13 приведена сравнительная характеристика ножей, используемых для отделения кромки бумажных и текстильных обоев.

Таблица 4.13 – Сравнительная характеристика ножей

Наименование показателя	Значение показателя	
	нож для кромкоотделения дуплексных обоев	нож для кромкоотделения текстильных обоев
Заточка лезвия ножа	односторонняя	двусторонняя
Вид обработки	-	лазерная упрочняющая
Толщина кромки лезвия, мм	3,5	3
Угол заточки лезвия, градус	23	18
Сила резания статическая, Н/мм	8,90	6,64
Расстояние между валом и ножом, мкм	15-20	25-50

4.4 Основы склеивания при формировании слоистых композиционных текстильных материалов

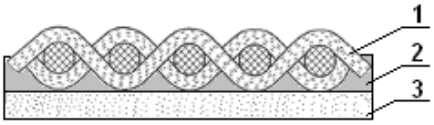
В основе процесса склеивания текстильных материалов лежат такие явления, как сорбция и диффузия, протекающие на границах раздела «текстильный материал – полимерный клей» и формирующие комплекс свойств и характеристик получаемых клеевых соединений. Совместное действие сорбции и диффузии обеспечивают проникновение клея в текстильный материал. Глубину диффузии выбирают в зависимости от назначения готового текстильного композита.

При склеивании слоев композиционных текстильных материалов используется одно из фундаментальных свойств – адгезия.

В технологии производства композиционных текстильных материалов адгезия – это получение неразъемного соединения текстильного полотна и полотна основы посредством установления между ними взаимодействия с помощью клея при нагревании, пластическом деформировании и последующем охлаждении всех компонентов.

Витебский государственный технологический университет

На рисунке 4.58 представлен вид соединения текстильного полотна (1) с полотном основы (3) с помощью клея (2).



1 – тканое полотно; 2 – клей; 3 – полотно основы

Рисунок 4.58 – Клеевое соединение составляющих композиционный текстильный материал

В настоящее время при изучении особенностей проявления адгезии используются разные теории, которые находятся в большой зависимости от области их применения. Наиболее распространенными являются следующие теории: механическая; адсорбционная теория высокополимерных материалов; электронная; реологическая (теория пограничных слоев и промежуточных фаз); поглощения (термодинамическая); диффузии; химических связей; склеивания текстильных материалов [81]. Только теория склеивания текстильных материалов, разработанная исходя из механической теории, в большей степени отражает особенности склеивания ткани и полотна основы [72].

Основными методами склеивания при получении композиционных текстильных материалов являются прилагаемое внешнее давление и нагревание, которые связаны с изменением физического состояния склеиваемых материалов и клея. При этом большое значение имеют способы нанесения клея, соединения склеиваемых слоев и подвода тепла в процессе сушки. Параметры, через которые в рамках технологического процесса можно целенаправленно воздействовать на свойства клеевого соединения, представлены на рисунке 4.59 .

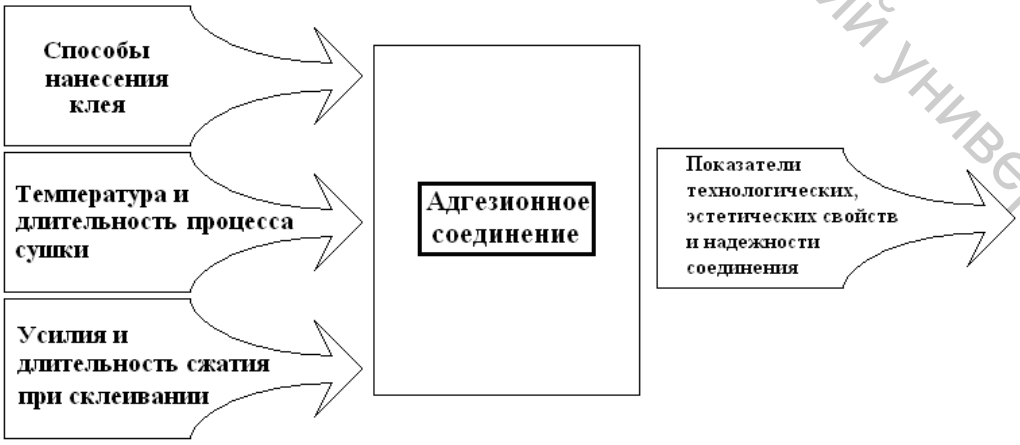


Рисунок 4.59 – Зависимость показателей свойств готового композиционного текстильного материала от параметров процесса склеивания

Витебский государственный технологический университет

4.4.1 Адгезионные процессы в текстильных материалах

Текстильные материалы (пряжа, ткань, нетканые и трикотажные полотна) – это сложные анизотропные материалы капиллярно-пористой структуры с развитой внутренней и внешней поверхностями. По сравнению с другими твердыми телами текстильные материалы имеют неоднородный химический состав как на уровне первичных элементов – волокон, так и на уровне комплексного продукта – тканого или нетканого полотна.

Химический состав ткани определяют следующие основные компоненты:

- нить или волокно, число которых может варьироваться в широких пределах;

- краситель и отделочный препарат, в совокупности могут составлять 12 % поверхностной плотности текстильного материала, нанесенные на поверхность текстильного материала блокируют активные центры волокнообразующих полимеров, из-за своей инертности снижают его химическую активность.

Содержащийся внутри текстильных материалов воздух соотносится с объемом волокнистой массы как 1:5…1:4. Поры внутри текстильного материала значительно увеличивают гипотетическую площадь адгезионного контакта между ним и адгезивом. Однако вследствие “захлопывания” пор жидким адгезивом возможность проникновения его внутрь текстильного материала может значительно уменьшаться.

Шероховатость поверхности текстильного материала очень значительна и затрудняет протекание реологических процессов при адгезионном контакте, делает невозможным применение реологической теории склеивания.

Особенностью клеев, применяемых для склеивания текстильных материалов, является их низкая адгезионная активность. Между функциональными группами основных видов клеев – полиэтиленового, полиамидного, акрилового – и функциональными группами волокнообразующих полимеров возможно возникновение различных межмолекулярных связей. Слабая энергия этих связей не позволяет рассматривать их как движущий фактор при установлении межфазного взаимодействия. Известно, что возникновение взаимодействия на границе “текстильный материал – адгезив возможно только при приложении к компонентам сжимающего давления 30 – 50 кПа.

4.4.2 Механизм разрушения адгезионного соединения в слоистых композиционных текстильных материалах

При исследовании прочности адгезионного соединения за показатель прочностных характеристик возможно использовать измеряемую величину: усилие при раздирании. Исследования

Витебский государственный технологический университет

механизма разрушения адгезионных соединений позволяют определить:

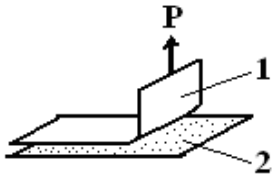
- причины ослабления соединения и оценить влияние каждого его компонента в ослаблении или укреплении разрушаемого соединения;
- возможности устранения факторов, ослабляющих прочность соединения.

Для определения причин, ослабляющих адгезионные соединения, были изучены результаты экспериментов и визуального обследования внешнего вида каждого компонента соединения после разрушения.

Процесс разрушения адгезионного соединения слоев композиционного дуплексного материала с тканым покрытием при прикладывании расслаивающей нагрузки представляет собой последовательное деформирование клея и выступающих волокон ткани и полотна основы, вплоть до их смещения, деформирования (вытягивания) или разрушения.

Прочность материала при раздирании относится к группе полуцикловых разрывных характеристик и характеризуется величиной усилия, необходимого для разрушения системы волокон, перпендикулярной направлению действующей силы. Так как разрушение по линии раздирания происходит последовательно, то в качестве характеристики было использовано максимальное усилие раздирания.

Для проведения исследований по определению прочности клеевого соединения дуплексных материалов с тканым покрытием при раздирании использовался метод определения прочности склеивания при отслаивании текстильного материала *1* от полотна основы *2* по ГОСТ 28832 – 90 (рисунок 4.60). Данный метод позволяет определить сопротивление расслаиванию в нормальных условиях.



1 – текстильный материал; 2 – полотно основы с нанесенным на него клеем

Рисунок 4.60 – Испытание прочности клеевого соединения образцов текстильных покрытий при раздирании

Для расчета теоретической прочности клеевого соединения многослойных материалов, в состав которых входит ткань, используется формула профессора В.Е. Кузьмичева и доцента Н.А. Герасимовой (Ивановская государственная текстильная академия) [72]:

Витебский государственный технологический университет

$$P_{теор} = \frac{0{,}25 \cdot \pi \cdot \mathrm{d}^2 \cdot B}{100 \cdot (d + b)} \sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} p_i \cdot П_{\mathrm{i}} \,, \qquad (4.132)$$

где d – диаметр частицы клея, см;

B – ворсистость текстильного материала по линии разрушения клеевого соединения, ворсинок на 1 см^2;

b – расстояние между частицами клея, см;

p_i – содержание i-го волокна в материале, %;

$П_i$ – разрывная нагрузка i-го волокна, сН;

n – число волокон или нитей, составляющих текстильный материал.

Если при производстве дуплексных текстильных материалов клей наносится на всю поверхность полотна основы и используется разреженная ткань, данную формулу необходимо скорректировать с учетом этих особенностей.

К основным свойствам ткани, влияющим на прочность клеевого соединения, относятся: диаметр используемой нити, количество волокон приповерхностного слоя текстильного материала (количество ворсинок), сырьевой состав текстильного материала, разреженность используемой ткани [72].

Для адгезионных соединений слоев дуплексного текстильного композита выделены следующие типы разрушений [82]:

- когезионный, при котором зона разрушения проходит по массе адгезива (на данный тип разрушений приходится около 5 % всех разрушений). При таком типе разрушения прочность адгезионного соединения равна когезионной прочности адгезива;
- адгезионный, при котором наблюдается полное отделение адгезива от ткани, при сохранении целостности адгезива и ткани (на данный тип разрушений приходится 70 % – 85 % всех разрушений);
- смешанный, сочетающий когезионный и адгезионный тип разрушений (на данный тип разрушений приходится 10 % – 30 % всех разрушений).

На основании механической теории адгезии и теории склеивания текстильных материалов вся адгезия (a) находится в функциональной зависимости от механической ($a_м$) и специфической адгезии (a_c) [72]:

$$\mathrm{a} = \mathrm{f}(\mathrm{a_m}, \mathrm{a_c}) \,. \qquad (4.133)$$

Таким образом, суммарная адгезия состоит из двух функций, одна из которых определяет механическую, а другая – специфическую адгезию:

$$\mathrm{a} = \mathrm{f_1}(\mathrm{a_m}) + \mathrm{f_2}(a_c) \,. \qquad (4.134)$$

Витебский государственный технологический университет

Установлено [81], что для тканей специфическая адгезия представляет собой малую величину и ею можно пренебречь:

$$a = f(a_m). \quad (4.135)$$

Согласно теории Гуля В.Е. [81] клей растекается по поверхности материала. Таким образом, при определении прочности адгезионного соединения необходимо учитывать площадь контакта адгезива и субстрата.

Прочность клеевого соединения (Р, Н/см) в общем виде можно записать следующим образом:

$$P = \frac{F_o}{l}, \quad (4.136)$$

где F_0 – сила отрыва субстрата от адгезива, Н;

l – ширина отрыва, см.

Сила отрыва субстрата от адгезива (F_0, Н) определится как

$$F_o = B \cdot R \cdot S_k, \quad (4.137)$$

где B – количество волокон приповерхностного слоя, 1/см^2;

R – разрывная нагрузка волокна, Н;

S_k – площадь контакта ткани с клеем, см^2.

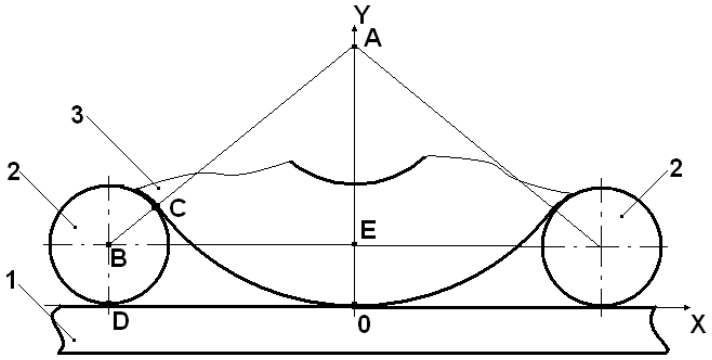
Теоретическая прочность адгезионного соединения композиционного дуплексного материала с тканым покрытием (P, Н/см) с нанесением клея по всей площади полотна основы и с использованием разреженной ткани определяется [83] так:

$$P = \frac{B \cdot R_n \cdot S_k}{l}. \quad (4.138)$$

Определим площадь контакта ткани с клеем (S_k, см^2) исходя из допущения, что сечение нити утка, представляющей собой часть тора, в любой точке х является окружностью. Данное допущение сделано исходя из того, что форма сечения поверхности тора, согласно уравнению овала Кассини, при условиях данной задачи стремится к окружности.

Изобразим разрез композиционного дуплексного материала, состоящего из бумаги *1* и ткани, вдоль нитей утка *3* и поперек нитей основы *2* (рисунок 4.61).

Витебский государственный технологический университет



1 – полотно бумаги; 2 – нить основы; 3 – нить утка

Рисунок 4.61 – Схема разреза текстильных настенных покрытий вдоль нитей утка

Найдем радиус кривизны нити утка (R, см):

$$(R+r)^2 = (R-r)^2 + l^2, \tag{4.139}$$

где R – радиус кривизны нити утка, см;

r – радиус нитей в ткани, см;

l – расстояние между нитями основы, лежащими в одной плоскости, см.

Получаем:

$$R = \frac{l^2}{4r} = \frac{l^2}{2d}, \tag{4.140}$$

где d – диаметр нити, см.

Примем центр системы координат в точке О, тогда уравнение окружности запишем в следующем виде:

$$y = -\sqrt{R^2 - x^2} + R. \tag{4.141}$$

Знак «-» в уравнении (4.141) показывает, что в расчете учитывается только та часть окружности с центром в точке А, которая лежит ниже оси абсцисс.

Поскольку при склеивании ткани с полотном основы высота клеевой пленки достигает ½ диаметра нити:

$$\frac{d}{2} = R - \sqrt{R^2 - x^2}, \tag{4.142}$$

получаем:

Витебский государственный технологический университет

$$x = \left| Rd - \frac{d^2}{4} \right|, \qquad \text{или} \qquad x = \left| \frac{2l^2 - d^2}{4} \right| \tag{4.143}$$

Запишем в общем виде уравнение высоты сегмента нити утка, помещенного в клей, в зависимости от координаты х (h_s):

$$h_s(x) = h - f(x), \tag{4.144}$$

где $f(x)$ – уравнение полученной окружности.

Тогда уравнение высоты сегмента нити утка, помещенного в клей, в зависимости от координаты х (h_s):

$$h_s(x) = \frac{d}{2} + \sqrt{R^2 - x^2} - R. \tag{4.145}$$

Рассмотрим сечение нити утка в произвольных точках, помещенное в клей (рисунок 4.62).

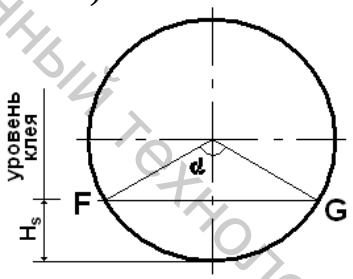


Рисунок 4.62 – Сечение нити утка в произвольной точке, помещенное в клей

Длина дуги FG сегмента нити утка, помещенного в клей (l_s, см),

$$l_s = \alpha \cdot r, \tag{4.146}$$

где α – центральный угол окружности, опирающийся на дугу FG.
Из уравнения

$$\cos\frac{\alpha}{2} = \frac{r - H_s}{r} \tag{4.147}$$

получаем:

$$\alpha = 2\arccos\frac{r - H_s}{r}. \tag{4.148}$$

Витебский государственный технологический университет

Поставив уравнение (4.148) в (4.146) получаем:

$$l_s = d \cdot \arccos \frac{\left(\frac{l^2}{d} - \sqrt{\left(\frac{l^2}{2d} \right)^2 - x^2} \right)}{d}. \qquad (4.149)$$

Находим площадь сегмента нити утка (S_y, см^2), помещенной в клей:

$$S_y = \int_{\frac{d^2-2l^2}{4}}^{\frac{2l^2-d^2}{4}} d \cdot \left(\arccos \frac{\left(\frac{l^2}{d} - \sqrt{\left(\frac{l^2}{2d} \right)^2 - x^2} \right)}{d} \right) \partial x. \qquad (4.150)$$

Запишем площадь сегмента основной нити (S_o, см^2), помещенного в клей:

$$S_o = \frac{\pi \cdot d^2}{2}. \qquad (4.151)$$

Таким образом, площадь контакта ткани с клеем (S_k) определяем как

$$S_k = \frac{\pi \cdot d^2}{2} + \int_{\frac{d^2-2l^2}{4}}^{\frac{2l^2-d^2}{4}} d \cdot \left(\arccos \frac{\left(\frac{l^2}{d} - \sqrt{\left(\frac{l^2}{2d} \right)^2 - x^2} \right)}{d} \right) \partial x. \qquad (4.152)$$

Учитывая площадь контакта ткани с клеем, определим теоретическую прочность адгезионного соединения композиционного дуплексного текстильного материала (P, Н/см):

$$P = \frac{B \cdot R_n}{l} \cdot \left(\frac{\pi \cdot d^2}{2} + \int_{\frac{d^2-2l^2}{4}}^{\frac{2l^2-d^2}{4}} \left(d \cdot \arccos \frac{\left(\frac{l^2}{d} - \sqrt{\left(\frac{l^2}{2d} \right)^2 - x^2} \right)}{d} \right) \partial x \right). \qquad (4.153)$$

Витебскийгосударственныйтехнологическийуниверситет

В качестве показателя ворсистости пряжи применяется число ворсинок на единицу длины ($n_в$, 1/м) [84]:

$$n_в = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot T_п}{T_в \cdot l_в}, \qquad (4.154)$$

где $T_п$ – средняя линейная плотность пряжи, текс;
$T_в$ – средняя линейная плотность волокон, текс;
$l_в$ – средняя длина волокон, м.

В случае определения ворсистости ткани данный показатель определяется на единицу площади (B, 1/м^2).

Экспериментальные и теоретические данные представлены в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Расчетные и экспериментальные данные расчета прочности
адгезионного соединения слоев текстильного композита

Параметр	Обозначение	Единицы измерения	Значение расчетное	Значение экспериментальное
Количество волокон приповерхностного слоя	B	1/см^2	97,4	98
Диаметр нитей в ткани	d	см	0,1352	0,2
Расстояние между нитями основы, находящимися в одной плоскости	l	см	0,2354	0,3
Разрывная нагрузка льняного волокна	Rn	Н	0,8	0,8
Прочность адгезионного соединения	P	Н/см	3,38	3,45

Отклонение экспериментальных и теоретических данных не превышает 5 %, таким образом, целесообразно использовать формулу 4.153 для расчета теоретической прочности композиционных дуплексных материалов с тканым покрытием.

Витебский государственный технологический университет

4.4.3 Способы нанесения связующего при формировании слоистых композиционных текстильных материалов

В зависимости от назначения материала и свойств связующей композиции нанесение клея производится следующими способами [28]:

Ракельный способ. Используется при поточном сплошном нанесении текстильного компонента на материал-основу. Клеевая композиция наносится на полотно основы раклей, установленной над валом. Ракля может подниматься в вертикальной плоскости и устанавливаться под определенным углом к горизонтальной поверхности.

Способ погружения. Применяется для нанесения клея на поверхность объемных материалов и изделий (например, при получении ворсового покрытия). Изделие погружают на определенную глубину и после извлечения выдерживают некоторое время для стекания клея.

Нанесение клея распылением. Клей наноситься в специальной камере, снабженной вентилятором для отсоса паров растворителя.

При производстве слоистых композиционных рулонных материалов непрерывным способом наиболее эффективным является нанесение связующего на поверхность основы валиками (*валичный способ*). На качество конечного продукта значительное влияние оказывает не только состав применяемого клея, но и режим работы клеевого узла, одной из характеристик которого является толщина клеевой пленки (количество наносимого клея).

При нанесении клеевого слоя валичным способом на толщину наносимого слоя h_1 (м) влияет диаметр D_1, D_2 (м) и материал валиков, скорость прохождения полотна, давление валиков, зазор между валиками, вязкость и концентрация клея, уровень клея в клеевой ванне, зазор между валиками, характер поверхности валика, характер поверхности обрабатываемого полотна.

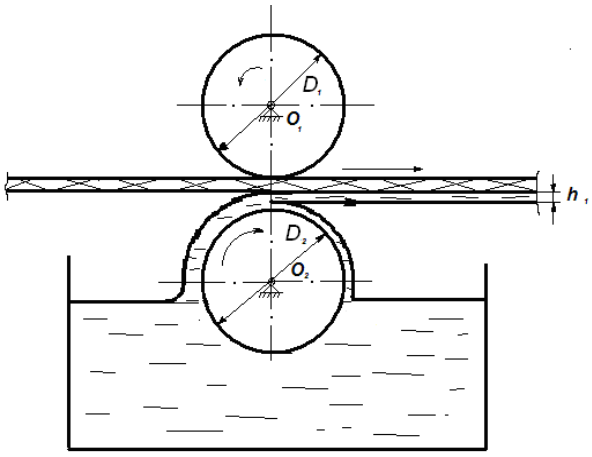


Рисунок 4.63 – Узел нанесения клея

На рисунке 4.63 схематично изображен узел нанесения клея на основу текстильного композита. Основными рабочими органами узла являются клеенаносной и прижимной валики. Под клеенаносным валиком установлена ванночка с клеем. Основа проходит между валиками и смачивается клеем.

Витебский государственный технологический университет

Экспериментально установлено, что при увеличении зазора между клеенаносным и прижимным валиками увеличивается и толщина клеевой пленки [85].

Этот процесс объясняется тем, что при увеличении зазора между валиками уменьшается сила давления прижимного валика на участок нанесения клея на основу, и в результате в зоне контакта выдавливается меньшее количество клея.

При увеличении глубины погружения клеенаносного валика в клеевую ванну увеличивается толщина клеевого слоя. Это объясняется тем, что увеличивается дуга, по которой идет перенос клея из клеевой ванны на основу. Клей по меньшей дуге за одно и то же время стекает обратно в ванну в меньшем количестве, чем с большей дуги.

С увеличением скорости вращения клеенаносного валика толщина клеевой пленки уменьшается. Это объясняется тем, что уменьшается время контакта основы с линией переноса клеенаносного валика, а это влечет за собой уменьшение времени адгезии, что приводит к уменьшению толщины покрытия основы клеем.

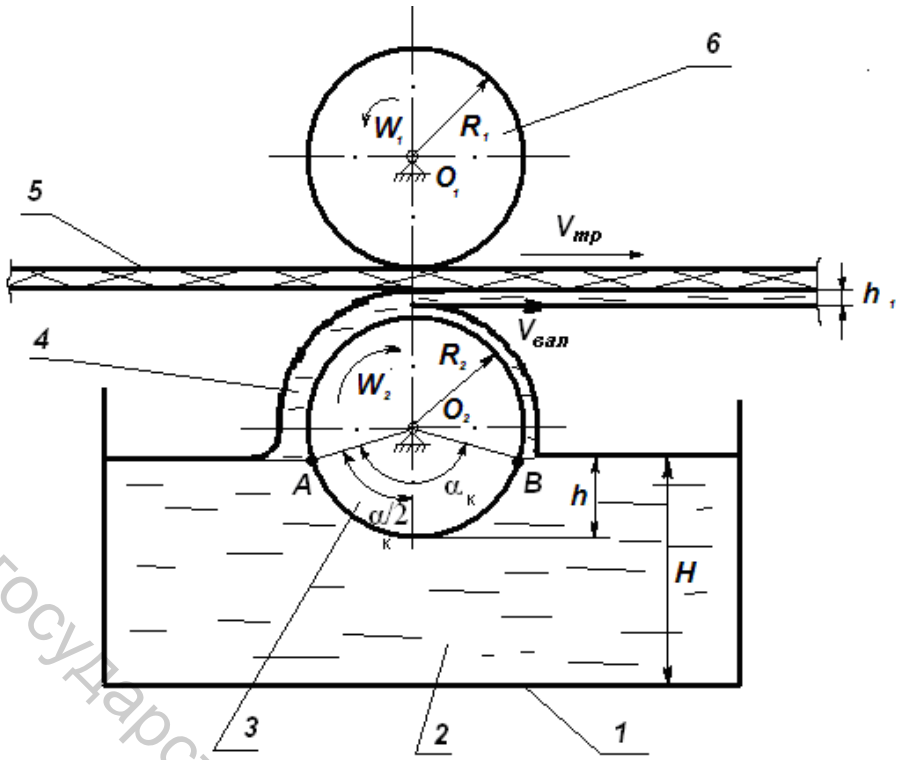
С увеличением вязкости толщина клеевой пленки увеличивается, так как увеличивается величина когезии самого клея.

Получение требуемой толщины клеевого слоя на основе может быть достигнуто соответствующими регулировками вязкости клея, величиной заполнения клеевой ванны, скоростью валиков и зазором между ними. Однако при производстве слоистых композиционных текстильных материалов при регламентированных показателях скорости движения полотна, характеристиках клея необходимо определить параметры валиков в клеенаносном узле, а именно радиус и скорость вращения клеенамазного валика, давление валика на клеевой слой в зоне контакта с основой.

Установлено, что при производстве композиционных текстильных материалов с волокнистым покрытием для прочного закрепления частиц на поверхности основы толщина клеевой пленки должна быть $0{,}5 \cdot 10^{-3}$ м. Получение требуемой толщины клеевого слоя на основе может быть достигнуто соответствующими регулировками вязкости клея, величиной заполнения клеевой ванны, скоростью вращения валиков и зазором между ними.

Рассмотрим схему нанесения клея на плоскую поверхность материала основы непрерывно вращающимися валиками (рисунок 4.64).

Витебский государственный технологический университет



1 – резервуар с клеем, 2 – клей, 3 – клеенамазной валик, 4 – слой наносимого клея, 5 – основа, 6 – верхний транспортирующий валик

Рисунок 4.64 – Схема нанесения клея валиками

Обозначим глубину погружения клеенамазного валика *3* в резервуар с клеем *1* h; уровень клея *2* в резервуаре H. Клеенамазной валик *3* и верхний транспортирующий валик *6* имеют одинаковые радиусы $R_1 = R_2 = R$, ширину $в_к$ и вращаются с одинаковыми угловыми скоростями $W_1 = W_2$.

При исследовании процесса нанесения клея приняты следующие допущения и условия:

- движение основы *5* и нанесенного клеевого слоя *4* является плоскопараллельным;
- движение основы *5*, валиков *3*, *6* и клеевого слоя *4* установившееся;
- клей рассматривается как вязкая ньютоновская жидкость;
- для предотвращения проскальзывания линейная скорость основы *5* $V_{тр}$ и валиков $V_{вал}$ равны между собой;
- уровень клея H и глубина погружения клеенамазного валика h не изменяются.

Исходя из принятых обозначений и расчетной схемы (рисунок 4.65), угол контакта клеенамазного валика с клеем равен:

$$\frac{\alpha_к}{2} = \arccos(1 - \frac{h}{R}). \qquad (4.155)$$

Витебский государственный технологический университет

Зависимость величины угла контакта клеенамазного валика с клеем от величины погружения представлена на рисунке 4.65.

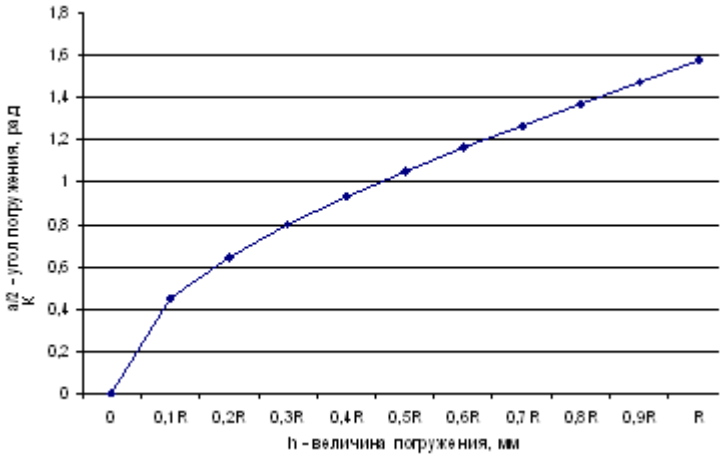


Рисунок 4.65 – Зависимость угла контакта от величины погружения

Длина дуги контакта валика с клеем определяется из отношения

$$l_{\cup AB} = 2R\arccos(1-\frac{h}{R}). \qquad (4.156)$$

Максимальное погружение валика в резервуар ($h = R$) соответствует углу $\frac{\alpha_к}{2} = 90^0$ или в радиальной мере $\frac{\alpha_к}{2} = \frac{\pi}{2}$, тогда максимальная длина дуги $l_{\cup AB}$ равна

$$l_{\cup AB\max} = \pi R, \text{ м.} \qquad (4.157)$$

Определим величину радиуса клеенамазного валика из условия ламинарного режима движения вязкой жидкости при условии, что критерий Рейнольдса – R_e для поверхностей, отличающихся от круглого сечения, равен *Re = 580* [86].

Критерий Рейнольдса определяется по известной в механике жидкости и газа формуле

$$\mathrm{Re} = \frac{Vd_э}{\nu}, \qquad (4.158)$$

где V – линейная скорость клеенамазного валика, м/с ($V = V_{вал} = V_{тр}$);

$d_э$ – эквивалентный диаметр, м:

$d_э = 4R_{гидр}$,

где $R_{гидр}$ – гидравлический радиус, м:

Витебский государственный технологический университет

$$R_{гидр} = \frac{f_к}{p},$$

где $f_к$ – площадь нанесения клея, м^2;
p – смоченный клеем периметр, м;
ν – кинематическая вязкость клея, м^2/с.
Для расчетной схемы, представленной на рисунке 4.64,

$$f_к = l_{\cup AB} в_к, \tag{4.159}$$

$$p = 2(l_{\cup AB} + в_к). \tag{4.160}$$

Гидравлический радиус $R_{гидр}$ равен

$$R_{гидр} = \frac{l_{\cup AB} в_к}{2(l_{\cup AB} + в_к)}. \tag{4.161}$$

Соответственно, эквивалентный диаметр равен:

$$d_э = \frac{2l_{\cup AB} в_к}{l_{\cup AB} + в_к}. \tag{4.162}$$

Тогда $$\mathrm{Re} = \frac{2Vl_{\cup AB} в_к}{(l_{\cup AB} + в_к)\nu}, \text{ м.} \tag{4.163}$$

Длина дуги контакта

$$l_{\cup AB} = \frac{\mathrm{Re}\nu\ в_к}{2V\ в_к - Re\nu}. \tag{4.164}$$

Учитывая соотношение (4.156), получим

$$2R\arccos(1-\frac{h}{R}) = \frac{\mathrm{Re}\nu\ в_к}{2Vв_к - Re\nu}. \tag{4.165}$$

При максимальном погружении валика в резервуар, то есть $h = R$, получим

$$\pi R = \frac{\mathrm{Re}\nu\ в_к}{2Vв_к - \mathrm{Re}\nu}. \tag{4.166}$$

Витебский государственный технологический университет

Тогда

$$R = \frac{\mathrm{Re}\,\nu\ в_к}{\pi(2V в_к - \mathrm{Re}\,\nu)}. \qquad (4.167)$$

Определим радиус клеенамазного валика R для реального технологического процесса изготовления композиционных материалов с использованием текстильных отходов. Принимаем (по данным предприятия-изготовителя) ширину полотна (равную ширине валика) $в_к$ = 0,5 м; скорость движения полотна V = 2 м/с; вязкость клея $\nu = 12 \cdot 10^{-4}$ м^2/с. Подставив численные значения, получим R = 0,0849 м.

Следовательно, диаметр клеенамазного валика $D = 2R \approx 0{,}17$ м. Угловая скорость клеенамазного валика W определяется из условия $V_{тр} = V_{вал}$:

$$W = \frac{2V_{тр}}{D} = 23{,}5,\ \text{с}^{-1}. \qquad (4.168)$$

Частота вращения клеенамазного валика $n_к$ определяется соотношением

$$n_к = \frac{30W}{\pi} = 225,\ \text{с}^{-1}. \qquad (4.169)$$

Движение клея в зазоре между клеенамазным валиком и основой имеет ламинарный характер для чисел Рейнольдса, определяемых неравенством [86]

$$\mathrm{Re} \le 30\sqrt{\frac{D}{h_1}}, \qquad (4.170)$$

где h_1 – толщина клеевой пленки, м.

$$h_1 \ge \frac{D \cdot 900}{\mathrm{Re}^2} \ge 0{,}46 \cdot 10^{-3},\ \text{м}. \qquad (4.171)$$

Для практических расчетов можно принять $h_1 = 0{,}5 \cdot 10^{-3}$ м или h_1 = 0,5 мм.

Клеенамазной валик, равномерно вращаясь в вязкой среде, испытывает сопротивление, обусловленное вязким жидкостным трением. Сила жидкостного трения T определяется по известной формуле [86]

$$T = -\mu^* S^* \frac{dV}{dh}, \qquad (4.172)$$

где μ^* – динамическая вязкость клея, Па·с, $\mu \approx 1{,}5$;

Витебским государственным технологическим университетом

S^* – площадь трущихся слоев жидкости, м^2;

dV/dh – градиент скорости, с$^{-1}$.

Для ламинарного режима движения жидкости градиент скорости dV/dh можно заменить отношением V/h_1, тогда

$$T = -\mu^* S^* \frac{V}{h_1}. \qquad (4.173)$$

Площадь трущихся слоев жидкости можно определить, зная длину дуги контакта $l_{\cup AB}$, определяемую по формуле (4.156) и известной ширине валика $в_к$:

$$S^* = l_{\cup AB} в_к = 2\arccos(1-\frac{h}{R}) в_к. \qquad (4.174)$$

При максимальной дуге контакта $l_{\cup AB} = \pi R$, площадь равна:

$$S^* = \pi R в_к. \qquad (4.175)$$

После подстановки в формулу (4.172) получим

$$T = -\mu^* \pi R в_к \frac{V}{h_1}. \qquad (4.176)$$

Момент силы жидкостного трения будет равен:

$$M_{тр} = -TR = -\mu^* \pi R^2 в_к \frac{V}{h_1}. \qquad (4.177)$$

Необходимый крутящий момент $M_{кр}$ должен быть $M_{кр} \geq M_{тр}$.

С учетом потерь на работу сил трения, фактический крутящий момент на клеенамазном валике $M_{кр\,ф}$ равен

$$M_{крф} \geq -\frac{\mu^* \pi R^2 в_к V}{h_1 \eta}, \qquad (4.178)$$

где η – к.п.д.

Необходимая мощность определяется $N_ф = M_{кр\,ф} W$, Вт.

Закон распределения давления валика на клеевой слой в зоне контакта с основой. Считаем, что вся масса жидкости движется с линейной скоростью, равной скорости транспортирования основы, и относительного сдвига частиц клея не происходит. Такое движение клея можно рассматривать как относительное равновесие, для которого справедливо уравнение равновесия капельной жидкости Эйлера [86]:

Витебский государственный технологический университет

$$dP = \rho^*(Xdx + Ydy + Zdz), \qquad (4.179)$$

где dP – дифференциал давления, Н/м^2;

ρ^* – плотность клея, кг/м^3;

X, Y, Z – единичные массовые силы в проекциях на координатные оси.

На рисунке 4.66 представлена расчетная схема процесса в плоской координатной системе.

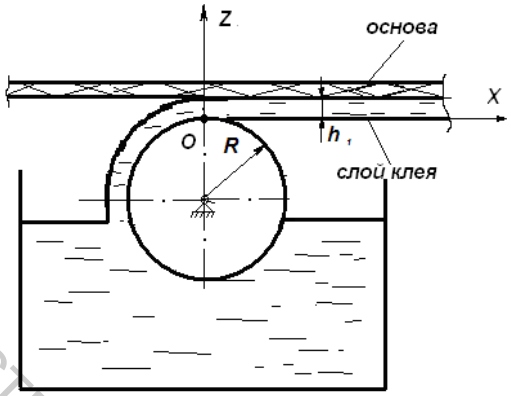


Рисунок 4.66 – Расчетная схема процесса нанесения клея

В проекции на координатные оси единичные массовые силы равны:

$$\begin{cases} Z = W^2R - g \\ X = -\mu^* \dfrac{dV}{dzh_1\rho^*} \\ Y = 0 \end{cases}. \qquad (4.180)$$

Тогда дифференциальное уравнение (4.180) примет вид:

$$dP = \rho^*\left[(W^2R - g)dz - \mu^* \frac{dV}{dzh_1\rho^*}dx\right]. \qquad (4.181)$$

Ввиду малой толщины клеевого слоя, градиент скорости по толщине dV/dz можно заменить отношением V/h_1, тогда

$$dP = \rho^*\left[(W^2R - g)dz - \mu^* \frac{V}{h_1\rho^*}dx\right]. \qquad (4.182)$$

Интегрируя выражение (4.182), получим

$$P = \rho^*W^2Rh_1 - \gamma^*h_1 - \mu^* \frac{V}{h_1^2}X \text{, Па}, \qquad (4.183)$$

где $\gamma^* = \rho g$ – удельный вес клея, Н/м^3.

Витебский государственный технологический университет

Максимальное давление (Н/м^2) на клеевой слой P_{max} будет в зоне контакта клеенамазного валика с клеем при $x = 0$. Тогда

$$P_{\max} = \rho^* W^2 R h_1 - \gamma^* h_1 . \qquad (4.184)$$

Минимальное давление $P_{min} = 0$ происходит на некотором расстоянии x_0, определяемом из условия

$$\rho^* W^2 R h_1 - \gamma^* h_1 - \mu^* \frac{V}{h_1^2} x_0 = 0 . \qquad (4.185)$$

Тогда

$$x_0 = \frac{(W^2 R \rho^* h_1 - \gamma^* h_1) h_1}{\mu^* V} = \frac{h_1 (W^2 R \rho^* - \gamma^*)}{\mu^* V} = 1{,}5 \cdot 10^{-6}, \text{ м.} \qquad (4.186)$$

Текущие значения давления на отрезке $0 \le x \le x_0$ определяются методом итераций, задавая значения Δx_i с определенным шагом:

$$P_i = \rho^* W^2 R h_1 - \gamma^* h_1 - \mu^* \frac{V}{h_1^2} \Delta x_i \ . \qquad (4.187)$$

Полученная теоретически зависимость давления валиков от координаты x представлена на рисунке 4.67. Она построена с помощью программы Maple 9.5 при заданных показателях: ρ^*=1000 кг/м^3, W= 23,5 с$^{-1}$, R=0,0849 м, h_1=0,0005 м, γ^*=9800 Н/м^3, μ^*=1,5Па·с, V=2м/с.

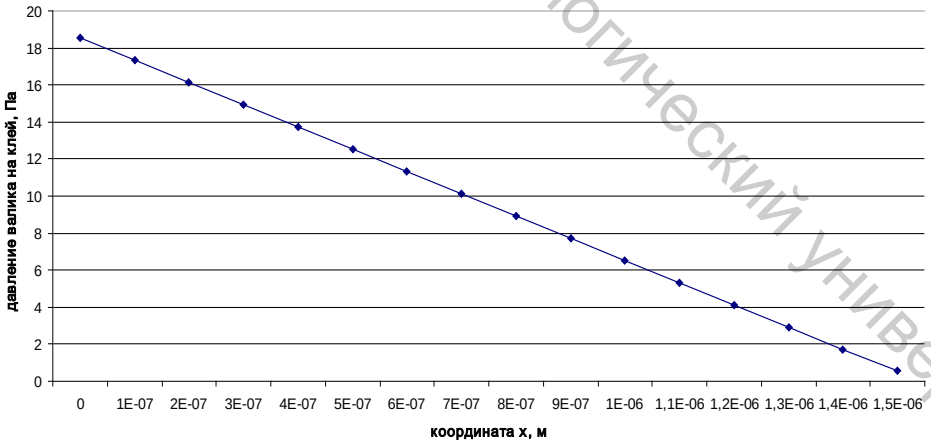


Рисунок 4.67 – Зависимость давления валиков от координаты x

Из графика видно, что при увеличении расстояния от точки соприкосновения клеенамазного валика с поверхностью основы давление на клеевой слой уменьшается.

Полученные на базе теоретических исследований результаты конструктивных и кинематических параметров клеенамазного узла

Витебский государственный технологический университет

хорошо согласуются с параметрами устройств для нанесения клея валичным способом, установленных на промышленных предприятиях [87, 88]. Рекомендуемые параметры клеевого узла и основные характеристики клея при формировании композиционных текстильных материалов с ворсовым покрытием представлены в таблице 4.15.

Таблица 4.15 – Рекомендуемые технологические параметры клеевого узла и характеристики клея

Наименование показателя	Величина
Диаметр клеенамазного валика, м	0,1700
Угловая скорость клеенамазного валика, $с^{-1}$	24
Частота вращения клеенамазного валика, $с^{-1}$	225
Толщина клеевой пленки, м	$0{,}5 \cdot 10^{-3}$
Динамическая вязкость клея, Па·с	1,5
Плотность клея, $кг/м^3$	1000
Удельный вес клея, $Н/м^3$	9800

От толщины клеевой пленки зависит качество волокнистого покрытия, а именно прочность закрепления волокнистых частиц на поверхности основы, ее величину регулируют разводкой между клеенамазным и транспортирующим валиками.

4.4.4 Количество связующего при формировании слоистых композиционных текстильных материалов

Количество связующего при формировании слоистых композиционных текстильных материалов влияет на прочность соединения слоев, а также качественные показатели готового материала, таких как жесткость и стойкость к истиранию в случае волокнистого покрытия.

Для определения количества клея, необходимого для прочного закрепления волокнистых частиц при формировании ворсового покрытия на поверхности основы, были проведены экспериментальные исследования с целью установления оптимальной массы клея, наносимой на 1 $м^2$ полотна основы текстильного композита с волокнистым покрытием.

В качестве входного параметра эксперимента выбрана масса клея m и количество волокнистого материла ν, нанесенные на 1 $м^2$ полотна бумаги. Выходными параметрами выбраны: стойкость покрытия к истиранию I, прочность закрепления частиц на поверхности основы P. Учитывался также внешний вид материалов после склеивания. Изменение массы наносимого клея осуществлялось путем изменения разводки между валиками для нанесения клея. Полученные результаты представлены на рисунках 4.68, 4.69.

Витебский государственный технологический университет

$I=8,5-3,7\cdot m+3,5\cdot \nu -3,4\cdot m^2-2,2\cdot m\cdot \nu$

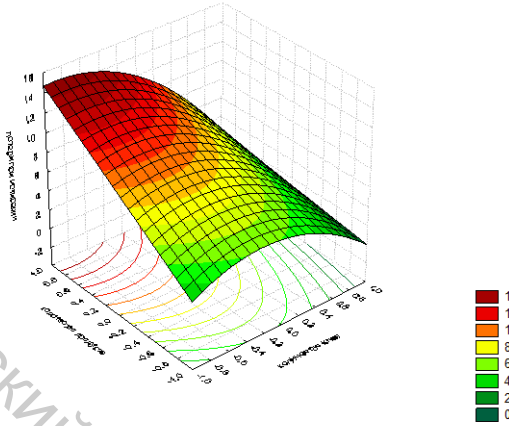


Рисунок 4.68 – Зависимость потерь покрытия при истирании от количества наносимого продукта и связующего

$P=123,33+37,50\cdot m-36,67\cdot \nu$

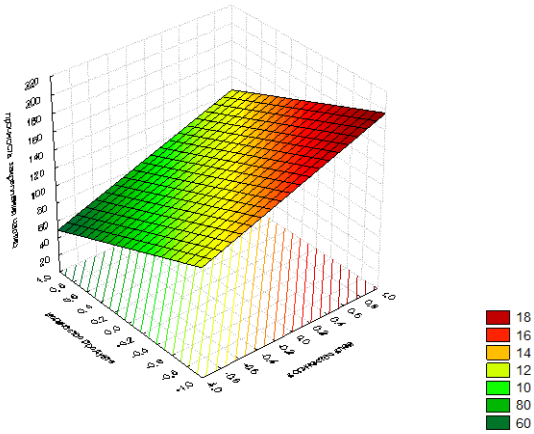


Рисунок 4.69 – Зависимость прочности закрепления частиц на поверхности основы от количества наносимого продукта и связующего

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что стойкость к истиранию поверхности композиционного материала с волокнистым покрытием и прочность закрепления частиц на поверхности основы зависят от количества наносимого продукта и количества клея. При увеличении количества продукта потери при истирании увеличиваются, а для отрыва частиц от поверхности основы необходимо незначительное усилие. При увеличении количества наносимого клея потери уменьшаются, сила необходимая для отрыва частиц увеличивается.

Исследования по выбранным факторам показали, что область оптимума бесконечна, то есть при уменьшении до бесконечности количества наносимого волокнистого материала и увеличении количества клея значения выходных параметров увеличиваются. Это недопустимо для реального технологического процесса, следовательно, необходимо ограничиться дополнительными факторами, например жесткостью готового материала, которая значительно увеличивается при чрезмерном нанесении связующего (рисунок 4.70).

Например, для композиционных текстильных материалов, используемых в качестве текстильных обоев значения жесткости при изгибе должны быть не более 18 – 27 сН. Следовательно, для получения полотна принятой жесткости количество клея не должно превышать 157 г/м^2.

Экспериментальные исследования зависимости жесткости дуплексного текстильного материала, состоящего из льняного тканого

Витебский государственный технологический университет

полотна и нетканой основы, а также прочности клеевого соединения представлены в таблице 4.16 и на рисунке 4.71.

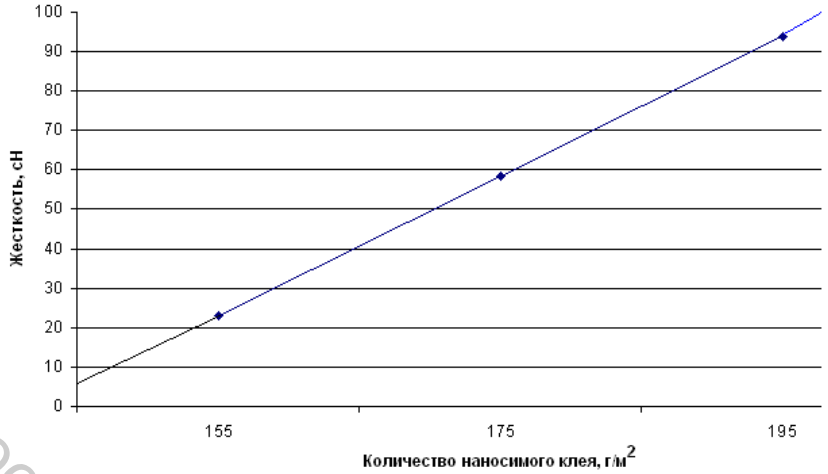


Рисунок 4.70 – Влияние количества наносимого клея на жесткость композиционного текстильного материала

Таблица 4.16 – Количества связующего, наносимого на полотно основы

Материал	Масса $1см^2$ материала, мг
Ткань льняная	28,1
Бумага	8,0
Клей:	
образец 1	2,0
образец 2	2,6
образец 3	3,2
образец 4	3,8
образец 5	4,4
образец 6	5,0

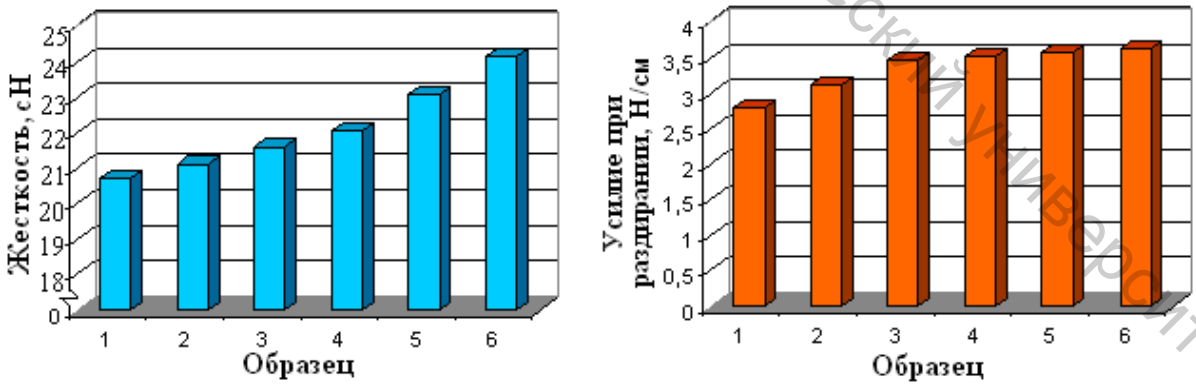


Рисунок 4.71 – Изменение жесткости и прочности дуплексного текстильного материала в зависимости от количества нанесенного клея

При анализе результатов исследований установлено оптимальное количество клея 3,2 – 3,8 мг на 1 $см^2$.

Витебский государственный технологический университет

4.5 Композиционный текстильный материал с волокнистым наполнителем, полученный способом прессования

Принципиальная схема технологического процесса изготовления композиционных текстильных материалов с волокнистым наполнителем технического назначения методом горячего прессования представлена на рисунке 4.72. На рисунке 4.73 представлена схема линии для производства синтетических волокнистых плит на ОАО «Витебскдрев».

В качестве волокнистого продукта для изготовления синтетических волокнистых плит горячего прессования используются отходы стрижки искусственного меха (кноп стригальный) с длиной волокон не более 25 мм, а также волокнистые отходы, образующиеся в результате стрижки ковровых изделий производства ОАО «Витебские ковры» (кноп стригальный) с длиной волокон не более 10 мм. В данную смесь отходов входят нитрон, полиэфир, а также шерстяные и капроновые волокна.

Поддоны перемещаются по кольцу в направлении, указанном стрелкой, в основном цепными транспортерами с упорами или крюками. Конвейер работает следующим образом. Поддоны подаются рольгангом 1 на формирующий транспортер 2, имеющий подвижные формы для насыпки волокнистого ковра. Ковер насыпается формирующими машинами 3, 4, 5 и 6. Просыпавшаяся между подвижными формами текстильные отходы возвращаются в соответствующие машины с помощью поперечных транспортеров и пневмоустановок. В конце формирующего транспортера поддон подхватывается на ходу крюком транспортера 7.

Этот транспортер подает поддон вперед примерно на 8 м, после чего он заталкивается транспортером 8 в холодный пресс 9. Из пресса поддон захватывается крюком транспортера 10, длина которого примерно такая же, как у транспортера 7. В загрузочную этажерку горячего пресса 12 поддон подается транспортером 11.

В период загрузки – выгрузки горячего пресса загрузочная этажерка не принимает поддоны со сформированным ковром, а формирующий транспортер 2 работает непрерывно. Поэтому поддоны последовательно заполняют все позиции между этажеркой и транспортером 2. С началом заполнения поддонами загрузочной этажерки происходит ускоренная подача их, несколько этажей этажерки быстро загружаются поддонами, а затем наступает ритмичная работа транспортеров на этом участке главного конвейера.

Из разгрузочной этажерки поддоны подаются транспортером 13 на транспортер 14, где верхним поперечным транспортером плита сталкивается на весы 15, рольганг которых после взвешивания подает плиту на подъемный стол 16.

Витебский государственный технологический университет

Рисунок 4.72 - Принципиальная схема технологического процесса формирования композиционных текстильных материалов технического назначения методом горячего прессования

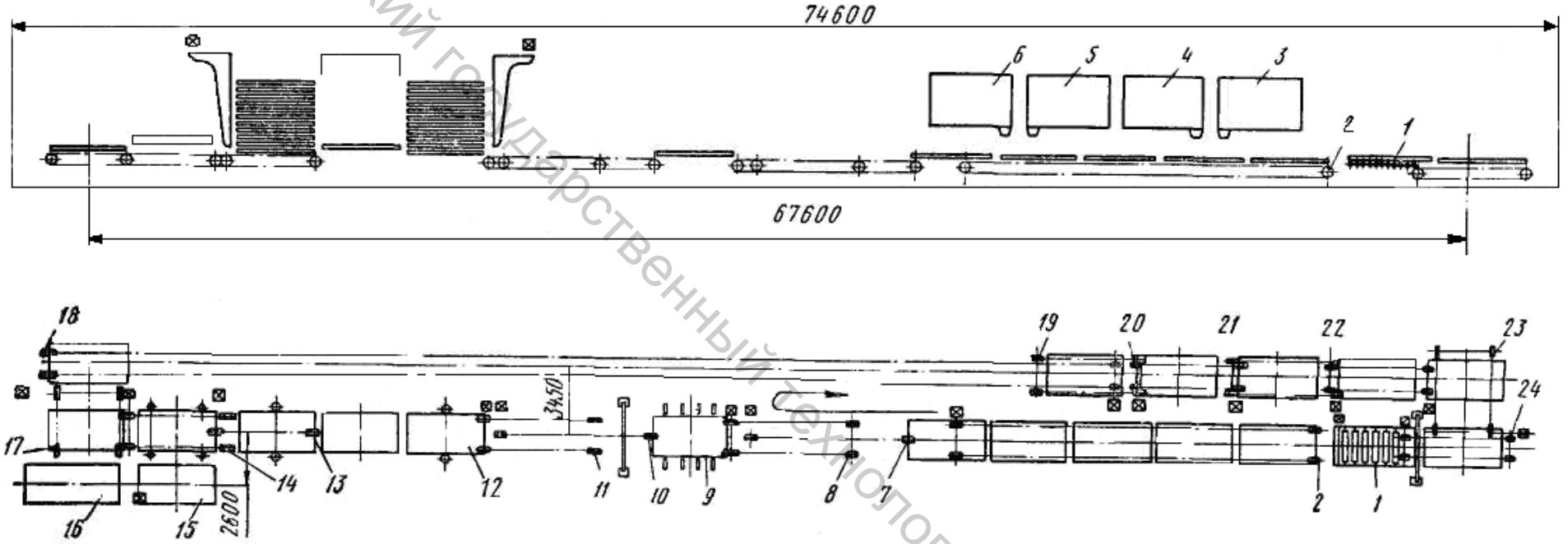
Свободный поддон транспортером 14 передается на поперечный транспортер 17, который, в свою очередь, подает его на возвратный транспортер 18.

Все десять поддонов, выгруженные из горячего пресса, ускоренно поступают на возвратный транспортер, после чего он без остановок движется до момента достижения первым поддоном транспортера 19; последний подает поддон на транспортер 20, расположенный в первой охладительной камере. Из первой охладительной камеры поддон подается во вторую транспортером 20, из второй — в третью транспортером 21, а оттуда на поперечный транспортер 23 с помощью транспортера 22. С поперечного транспортера поддоны подаются транспортером 24 на рольганг 1.

Нарушение ритмичной подачи поддонов из разгрузочной этажерки в период выгрузки пресса компенсируется за счет ускоренного прохода поддонов через охладительные камеры.

Налаживая главный конвейер на изготовление плиты определенной толщины, изменяют лишь время стоянки транспортеров, поэтому скорость перемещения поддонов определяется условиями получения плит минимальной толщины. В качестве связующего используется карбамидоформальдегидная смола марки КФ-НФП.

Витебский государственный технологический университет



1 – рольганг; 2 – формирующий транспортёр; 3, 4, 5, 6 – формирующие машины; 7, 8, 10, 11, 13, 14, 17 – 24, 9 – холодный пресс; 12 – горячий пресс; 15 – весы; 16 – подъёмный стол

Рисунок 4.73 – Схема линии для производства синтетических волокнистых плит по технологии ДСП на ОАО «Витебскдрев»

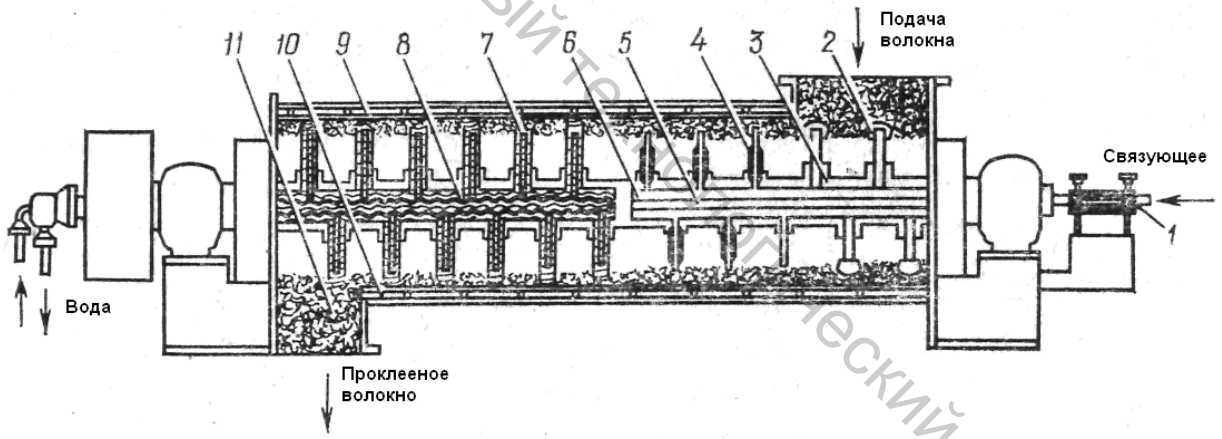
Витебский государственный технологический университет

Смешивание волокна со связующим. Смешивание проводят с целью равномерного покрытия поверхности волокон связующим. Достичь этого довольно затруднительно, так как объем связующего очень мал по сравнению с объемом и поверхностью волокна.

В связи с наличием большого числа трудно учитываемых факторов расход связующего устанавливают опытным путем в зависимости от требований, предъявляемых к прочности материала.

Для смешивания волокон со связующим применяется смеситель периодического действия (рисунок 4.74). Связующее наносится на волокно распылением посредством пневматических форсунок.

Волокно подается в смеситель через загрузочную воронку. Вследствие большой частоты вращения вала захватывающие лопасти 2, находящиеся под загрузочной воронкой, придают движение частицам кольцеобразное и далее аксиальное направление. Затем движущийся кольцеобразный слой волокнистых частиц проходит через зону осмоления, где связующее разбрызгивается из сопел (насадок) 4 или 12. Лопатки 7 продолжают перемешивать древесные частицы со связующим. Связующее по клееподводящей трубе 1 (рисунок 4.74) подается в полый вал смесителя 3.



1 – устройство для ввода связующего в полый вал; 2 – захватывающие лопасти; 3 – полый вал; 4 – насадки (сопла) для распыления связующего; 5 – трубопровод подачи связующего; 6 – полость для прохода связующего; 7 – перемешивающие лопасти; 8 – полость для прохода холодной воды; 9 – полости рубашек для воды; 10 – полости рубашек для воды; 11 – выгрузочное окно; 12 – сопла для подачи связующего; 13 – распределительная головка

Рисунок 4.74 – Схема высокооборотного смесителя для осмоления волокна связующим

Формирование плиты. Прессование синтетических волокнистых плит осуществляется с приложением прессующего усилия перпендикулярно плоскости плиты (рисунок 4.75). При таком способе

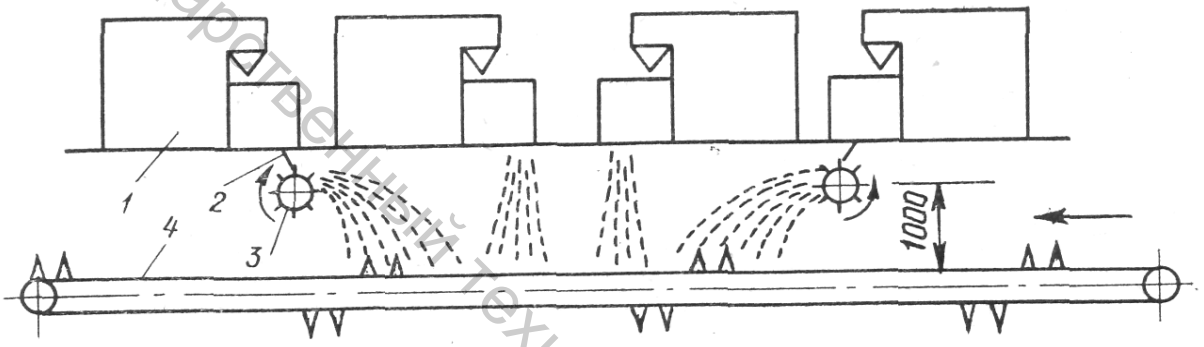
Витебский государственный технологический университет

изготовления плит объемистую волокнистую массу необходимо превратить в плоский пакет. Задачей формирования является дозирование и равномерное распределение сырья по площади ковра, что необходимо для получения одинаковых показателей толщины и прочности по всей площади плиты.

Дозирование проводится в целях получения постоянного количества ворса на один ковёр, а также на единицу поверхности ковра.

Формирование ковра заключается в равномерном распределении текстильных отходов по поддону.

Формирующие машины непрерывно дозируют и равномерно насыпают текстильные отходы на движущиеся внизу поддоны. Для образования ковра, состоящего из нескольких слоёв, отличающихся размерами насыпающихся частиц и содержанием связующего, в главном конвейере устанавливают 4 формирующие машины.



1 – формирующая машина; 2 – направляющий щиток;
3 – фракционирующий валик; 4 – формирующий конвейер

Рисунок 4.75 – Схема формирования органо-синтетических плит четырьмя формирующими машинами

В линии установлены четыре машины фирмы «Шенк». На рисунке 4.76 показаны две средние машины для подачи волокон внутреннего слоя.

Из распределительного устройства *1* текстильные отходы высыпаются внутрь машины на ленточный транспортер *2,* который непрерывно перемещает волокно в направлении, указанном стрелкой *Б.* Скребковый транспортер *3* с гребенчатыми планками непрерывно отгребает волокно назад, оставляя на транспортере *2* слой определенной толщины. Этот слой ковра дополнительно разравнивает валец *4,* а валец 5 (таблица 4.17) сбрасывает волокно с транспортера. На пути волокна установлен фракционирующий валец *6,* который вращается против часовой стрелки и отбрасывает волокно в горизонтальном направлении.

Витебский государственный технологический университет

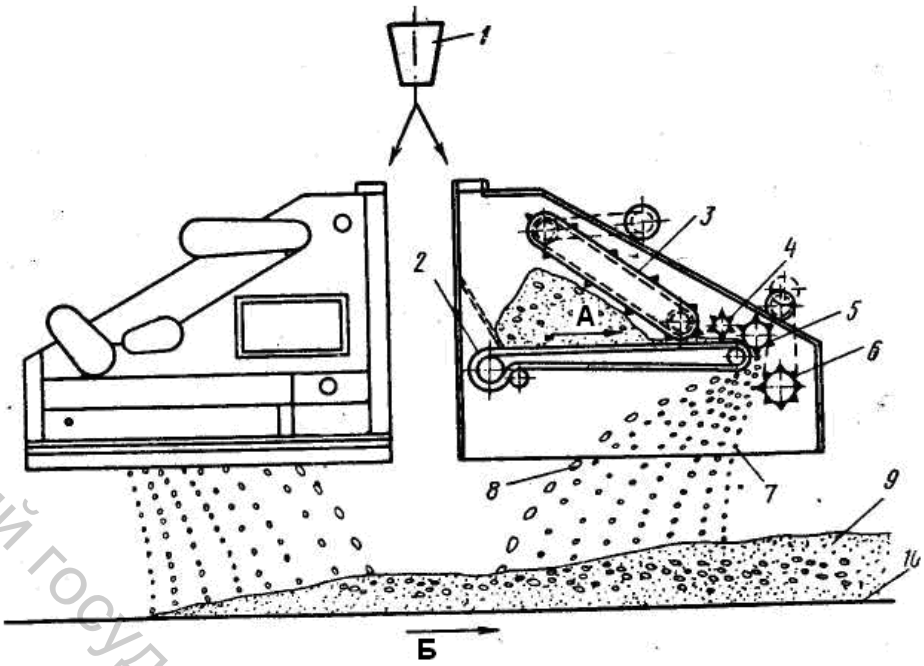


Рисунок 4.76 – Схема формирующей машины фирмы Шенк:
1 – распределительное устройство; 2 – ленточный транспортёр; 3 – скребковый транспортёр; 4 – разравнивающий валец; 5 – сбрасывающий валец, 6 – фракционирующий валец; 7 – лёгкие комки волокон; 8 – тяжёлые комки волокон; 9 – волокнистый ковёр; 10 – поддон; А, Б – направление движения

При одинаковой начальной скорости тяжелые комочки волокон 8 падают дальше, чем легкие *7*. В результате этого на поддоне *10*, движущемся в направлении стрелки *Б*, вначале образуется слой более легких, а затем более тяжелых частиц, сбрасываемых левой машиной.

На полученный волокнистый слой в зоне правой машины сбрасывается следующая порция волокна в обратной последовательности: вначале более тяжелая, затем более легкая. Полученный волокнистый ковер *9* имеет симметричную структуру. Таким образом, в машине валец *6* обеспечивает механическое фракционирование волокон в основном по массе в направлении, перпендикулярном пласту ковра. После средних машин устанавливают разравнивающий валец с пневмоотсосом. Это устройство срезает верхний слой волокон с полученного ковра, устраняя все погрешности работы трех первых машин.

Таблица 4.17 – Параметры сбрасывающего вальца

Внешний диаметр сбрасывающего вальца, м	Внутренний диаметр сбрасывающего вальца, м	Длина пласти-ны, м	Толщина пластины, м	Количест-во пластин, шт	Плотность материала, г/м^3
0,3	0,14	1,75	0,02	8	80

Для определения массового расхода материала сбрасывающего вальца при производстве волокнистых композиционных материалов,

Витебский государственный технологический университет

полученных прессованием, можно использовать формулу (4.85). Экспериментально определенный массовый расход материала при сбрасывании, а также теоретические значения представлены в таблице 4.18.

Таблица 4.18 – Значения расхода волокнистого материала

Частота вращения ротора, $с^{-1}$	Массовый расход ($Q_м^p$), кг/с		
	Расчетные значения	Экспериментальные значения	Расчетные значения с учетом коэффициента уплотнения
1	0,5603	0,4246	0,4248
3	0,7009	0,5819	0,5823
9	0,9025	0,7049	0,7053

Таблица 4.19 – Параметры работы формирующего оборудования

Плотность готового материала, $кг/м^3$	Поверхностная плотность покрытия, $кг/м^2$	Расчетные значения скорости транспортера ($V_{тр}$), м/мин
200	180	1,7
300	270	2,5
400	360	3,3
500	450	4,1
600	540	4,9
700	630	5,8

Предварительное уплотнение пакета. В процессе транспортирования края рыхлого ковра осыпаются, что увеличивает потери на обрезку готовых плит. Эти недостатки устраняются предварительным уплотнением ковра, когда после обжатия волокнистой массы для уменьшения пустот им придается транспортабельность. Предварительное уплотнение осуществляется в холодном прессе.

Величина давления оказывает значительное влияние на степень уплотнения ковра. Установлено, что прочность ковров (для плит объемной массы не менее 0,6 $кгс/см^3$), спрессованных при давлении 40 $кгс/см^2$, достаточна для того, чтобы такой ковёр можно было переместить без разрушения с одной плоскости на другую.

Установка для предварительной подпрессовки, называемая также форпресс, представлена на рисунке 4.77.

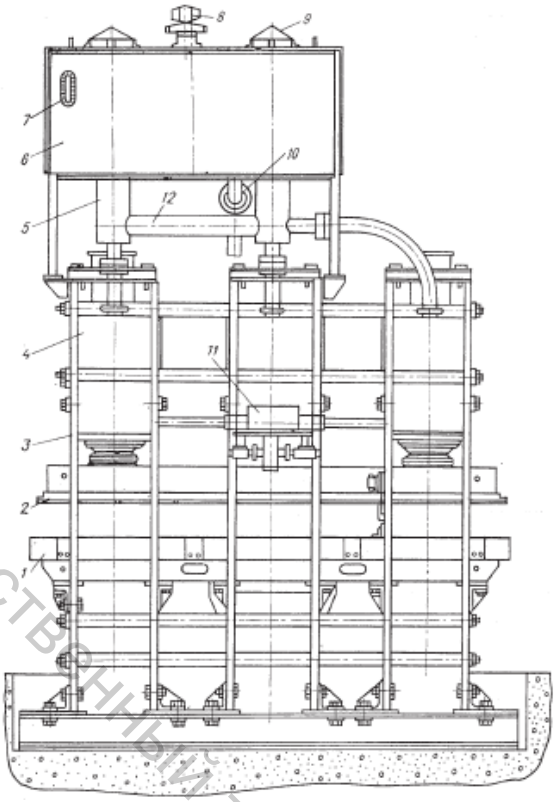
В позиционном форпрессе с верхним расположением цилиндров верхняя рабочая плита облицована фторопластом, который препятствует выдуванию волокон в течение тех секунд, когда эта плита опускается на ковёр.

Рабочий цикл такой установки состоит из следующих операций:

- разгрузка и загрузка пресса – 10 с;
- опускание плиты пресса – 3 с;

Витебский государственный технологический университет

- набор необходимого давления – 3 с;
- выдерживание ковра под давлением 4 – 5 с;
- сброс давления и отведение плиты пресса – 3 с.



1 – нижний стол, 2 – верхняя плита, 3 – стальная рама, 4 – рабочий цилиндр, 5 – патрубок клапана наполнения, 6 – напорный бак, 7 – указатель уровня масла, 8 – распределитель клапанов наполнения, 9 – воздушный фильтр напорного бака, 10 – переливной патрубок, 11 – регулятор скорости холостого хода верхней плиты, 12 – коллектор наполнения

Рисунок 4.77 – Одноэтажный позиционный форпресс

Прессование синтетических волокнистых плит. Наиболее ответственная операция технологического процессе производства синтетических волокнистых плит мягких — прессование. Эта операция в большой степени определяет качество плит и производительность всей установки.

Процесс плоского прессования осуществляется периодически. При прессовании один или несколько пакетов загружаются в горячий пресс, прессуются по заданному режиму, образуя плиты, и затем выгружаются из пресса.

Режимы прессования при периодическом способе определяются в зависимости от типа выпускаемых плит (объемная масса, толщины, содержания связующего и т. п.), а также от вида применяемых материалов. Проведенные исследования позволяют рекомендовать режимы прессования, представленные в таблице 4.20.

Витебский государственный технологический университет

Таблица 4.20 – Режимы прессования синтетических волокнистых плит 16 мм

Давление в прессе, МПа					
Время выдержки	46	40	20	10	0
7 мин	2,5 мин	2 мин	1 мин	0,5	1 мин

Время цикла прессования состоит из времени выдержки пакетов в прессе и вспомогательного времени. Время выдержки, охватывающее период от смыкания до размыкания обогреваемых плит, задается с учетом температуры плит пресса, типа связующего, влажности частиц и т. п. Вспомогательное время складывается из времени загрузки пакетов в пресс, подъема плит пресса до их смыкания, достижения высокого давления, снижения давления по окончании выдержки до нуля, размыкания плит пресса и выгрузки из пресса готовых плит. В цехах производительностью 25 тыс. $м^3$ в год применяют прессы ПР-6.

Общая продолжительность загрузки пресса и достижения заданного высокого давления не должна превышать одной минуты. Рекомендуется нагревать плиты пресса до температуры 150 ± 2°С и выше. При температуре 150 °С и при увлажнении поверхности волокнистого ковра на каждый миллиметр толщины прессуемой плиты берут время прессования (отсчитываемое от момента достижения максимального давления в прессе), равное 0,55 – 0,60 мин.

Во время прессования максимальное давление должно поддерживаться 30 % времени прессования, при этом плиты полностью смыкаются с дистанционными планками. Затем удельное давление на изделии снижается до 6 – 8 $кгс/см^2$, при этом давлении надо работать также 30 % времени прессования, включая и время снижения давления. В оставшиеся 40 % времени прессования давление снижают до 3 – 4 $кгс/см^2$.

Обработка плит. Горячие прессы для производства синтетических волокнистых плит работают без охлаждения. Причиной этого является то, что охлаждение плит в прессе не улучшает качество плит и вызывает значительное снижение производительности пресса и повышение расхода тепла. Поэтому плиты выгружают из пресса горячими.

Выдержка плит осуществляется в плотных стопах в отапливаемом помещении в течение 5 – 8 суток, что обеспечивает их постепенное равномерное охлаждение и окончательное отверждение связующего.

Витебский государственный технологический университет

4.5.1 Формирование синтетических мягких волокнистых плит (СВП-М)

Синтетические мягкие плиты (рисунок 4.78) изготавливаются методом горячего плоского прессования по сухому способу производства (рисунок 4.79).

Рисунок 4.78 – Изоляционный нетканый материал (СВП-М)

Состав СВП-М № 1:
100 % текстильные отходы (кноп стригальный – нитрон), толщина 12 мм.
Предел прочности при изгибе, МПа – 0,8.
Плотность образца, кг/м^3 – 200.
Разбухание по толщине, % – 34.

Состав СВП-М № 2:
100 % текстильные отходы (кноп стригальный – нитрон), толщина 18 мм.
Предел прочности при изгибе, МПа – 1,1.
Плотность образца, кг/м^3 – 400.
Разбухание по толщине, % – 34.

Для изготовления СВП-М в качестве основного сырьевого компонента используются отходы стрижки искусственного меха (кноп стригальный) с длиной волокон не более 25 мм. Кроме того, для расширения сырьевой базы возможно использовать коротковолокнистые отходы коврового производства.

В результате анализа свойств коротковолокнистых отходов, образующихся на этапе предварительной, основной и окончательной стрижки искусственного меха, установлено, что по своей длине коротковолокнистые отходы значительно отличаются. Технология и качество изделий существенно зависят от равномерности волокон по длине, соотношения длины и толщины волокон. Поэтому одним из необходимых переходов технологии является специальная подготовка волокон.

Подготовка сырья к производству. Для подготовки ворса коротковолокнистые химические отходы необходимо подвергнуть процессу измельчения способом резания.

Данный способ позволяет полностью управлять процессом и получать волокна заданной длины в зависимости от выбранных технологических и конструктивных параметров. Для измельчения неоднородной волокнистой массы используется дробилка роторная ДР-185.

Витебский государственный технологический университет

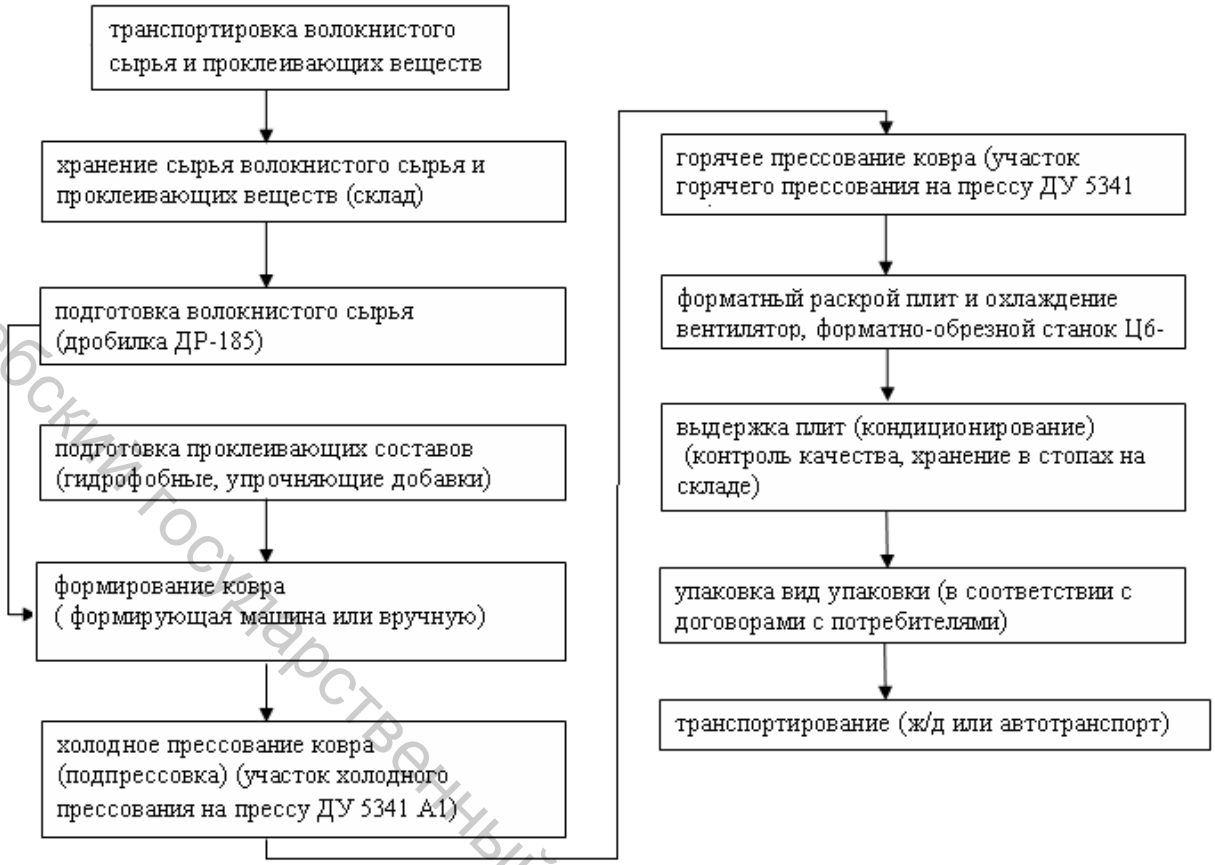


Рисунок 4.79 – Технологическая схема изготовления мягких синтетических волокнистых плит

Приготовление проклеивающих составов. Для повышения механической прочности плит в массу вводят проклеивающее вещество (раствор смолы) методом распыления. В качестве связующего применяются: парафиновая эмульсия и фенолформальдегидная смола.

Проклейка волокнистой массы. Нанесение проклеивающих составов производят методом распыления, вручную, тщательно перемешивают полученную массу. Обязательным условием проклейки является первоначальное введение в массу парафиновой эмульсии, затем раствора смолы и после перемешивания раствора осадителя. Такая схема обеспечивает качественное осаждение проклеивающих веществ на волокна.

Расход связующего определяется по отношению к массе абсолютно сухого вещества и составляет:

- парафина – 8 – 10 %;
- смолы – 1 %.

Формирование ковра. На поддоны отходы волокна подаются вручную, предварительно подготовленные и обработанные проклеивающим составом.

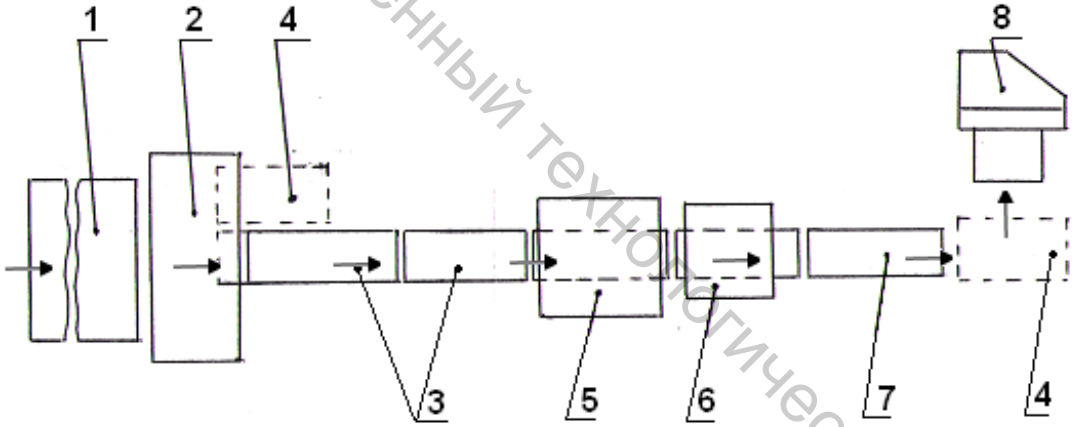
Витебский государственный технологический университет

Волокнистая масса укладывается на столе загрузки 1 (рисунок 4.80) с рамкой на транспортный поддон. Высота рамки выбирается с учетом равномерной загрузки по всему пакету. Внутренний размер рамки составляет 900х1900 мм. Перед установкой рамки на транспортный поддон укладывается прокладочный лист из нержавеющей стали и алюминиевые прокладки, которые обеспечивают необходимую толщину получаемых плит. Волокнистый ковер формируют на поддонах вручную. Загружаемая волокнистая масса соответствует толщине получаемой плиты. Норма расхода волокна представлена в таблице 4.21.

Таблица 4.21 – Зависимость массы волокна от толщины плиты

Толщина плиты, мм	12	16	18	22	30	40	50
Расход волокна, кг /м^2	9,6	12,8	14,4	17,6	24	32	40

Холодное прессование плит (подпрессовка). Прессование плит производится на линии ДУ 5341 А1 (рисунок 4.80) (в ручном или полуавтоматическом режиме).



1 – площадка загрузочная;
2 – автопитатель;
3 – транспортер;
4 – тележка для транспортировки поддонов;
5 – пресс гидравлический холодного прессования;
6 – пресс гидравлический горячего прессования;
7 – стол-транспортер;
8 – форматно -обрезной станок.

Рисунок 4.80 – Линия ДУ 5341 А1 для получения СВП-М

С загрузочного стола 1 сформированный ковер на поддоне 2 подается транспортером 3 в пресс холодного прессования 5, в котором он подпрессовывается в течение 1 – 0,5 мин при давлении 2 МПа.

Горячее прессование плит. Участок 6 технологический линии ДУ 5341 А1 предназначен для горячего прессования отходов волокон искусственного меха (стригального кнопа) и производства на его основе СВП-М. Основные технические параметры пресса даны в таблице 4.22.

Витебский государственный технологический университет

Таблица 4.22 – Основные технические параметры пресса

Наименование параметра	Значения	
	пресс горячего прессования	пресс холодного прессования
Размеры греющих плит, мм длина ширина	 2000 1000	 2000 1000
Температура греющих плит, °С, не более	200	30
Число этажей, шт	1	1
Удельное давление прессования, МПа	2-6	0,3-1
Продолжительность прессования, мин, не более	30	30
Давление рабочей жидкости, Мпа, не более	32	
Производительность пресса, кг/ч	48	

Из пресса холодного прессования 5 ковер подается транспортером 3 в пресс горячего прессования 6, в котором постоянно поддерживается заданная технологией температура прессования 150 – 160°С, и давление 1 МПа.

Послепрессовая обработка. Упаковка плит. Отпрессованное изделие транспортером выгружается на разгрузочный стол 7. Прессованную плиту укладывают горизонтально на отлежку не менее чем на 12 часов, для того чтобы завершился процесс стабилизации в листе.

Для получения плиты необходимых линейных размеров она передается на форматно-обрезной станок Ц6-4 для обрезания кромок 8. Толщина плиты в готовом виде должна быть 12 – 50 ± (0,3 – 0,6) мм.

Для определения оптимальных режимов работы прессовального оборудования проведены экспериментальные исследования зависимости физико-механических показателей материала (плотность материала, предел прочности при изгибе, разбухание) от массы текстильных отходов в пакете и температуры прессования. Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что при увеличении массы волокна в пресс-форме и температуры прессования приводит к повышению плотности готовой плиты. Это объясняется тем, что элементарные волокна в процессе прессования контактируют друг с другом и, при увеличении температуры, увеличивается площадь поверхности сплавления. Прочность при изгибе повышается с увеличением массы волокна, но до определенного предела, так как при слишком большой массе процесс теплопередачи между волокнами в середине плиты идет медленнее и не обеспечивает их соединения. Повышение температуры прессования в данном случае позволяет

Витебский государственный технологический университет

увеличить прочность готового материала. При увеличении массы волокна до определённого предела разбухание снижается, что объясняется уменьшением объема пор для проникновения влаги в готовом продукте.

Для расширения сырьевой базы, а также исследования возможности использования коротковолокнистых отходов коврового производства в процессе производства мягких плит был проведен эксперимент и оптимизация состава СВП-М из смеси волокон. В смесь отходов входят нитроновые, полиэфирные, а также шерстяные и капроновые волокна, образующиеся в ковровом производстве. Исследовалась зависимость основных свойств плит, используемых в качестве теплоизоляционного материала (предел прочности при изгибе, коэффициент теплопроводности) от плотности материала и состава волокнистой смеси (рисунок 4.81, 4.82).

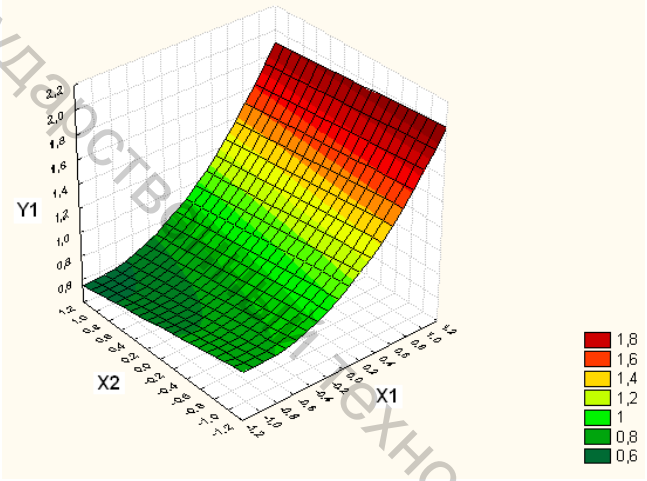


Рисунок 4.81 – Зависимость прочности при изгибе У1 от плотности материала Х1 и от содержания ПЭ волокна Х2

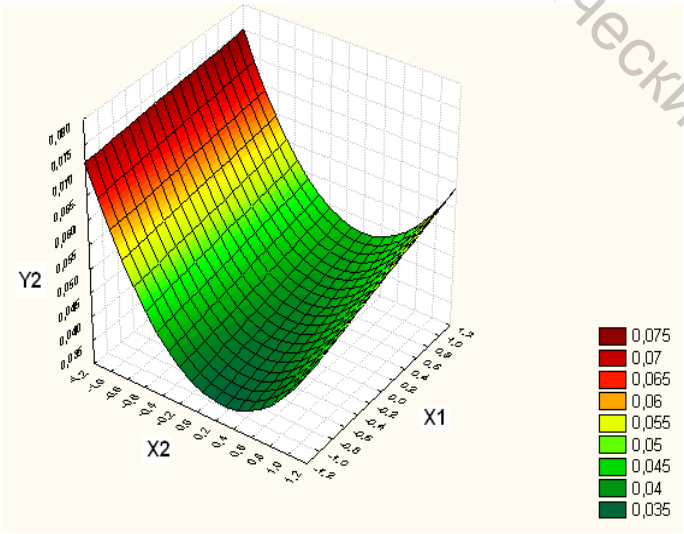


Рисунок 4.82 – Зависимость коэффициента теплопроводности У2 от плотности материала Х1 и от содержания ПЭ волокна Х2

Витебский государственный технологический университет

Исследование предела прочности при изгибе (Y1), показывает, что при увеличении плотности исходной смеси (X1) предел прочности при изгибе повышается. Однако, когда плотность достигает значительной величины, предел прочности при изгибе будет уменьшаться, так как в течение заданного технологического времени высокая плотность исходной смеси не позволяет завершиться процессам структурирования в готовом продукте. Содержание ПЭ волокна (X2) в незначительной степени влияет на предел прочности при изгибе. При увеличении доли ПЭ волокна в смеси с полиакрилонитрильным волокном предел прочности при изгибе уменьшается, при увеличении доли ПЭ волокна в смеси с шерстяным волокном предел прочности при изгибе увеличивается.

Исследование коэффициента теплопроводности (Y2) показывает, что при увеличении плотности исходной смеси (X1) коэффициент теплопроводности увеличивается, это обусловлено тем, что увеличение плотности слоя приводит к сокращению воздушных промежутков между волокнами. При увеличении содержания ПЭ волокна (X2) в двух вариантах теплоизоляционных плит коэффициент теплопроводности увеличивается, это связано с теплофизическими свойствами исходных волокон.

Значение показателей физико-механических свойств плит должны соответствовать указанным в таблице 4.23.

Таблица 4.23 – Показатели физико-механических свойств мягких плит

Наименование показателя	Показатели плит для марок		
	ПСВ-М1	ПСВ-М2	ПСВ-М3
Плотность, кг/м^3	200-400	400-500	500-600
Предел прочности при изгибе, МПа, не менее	0,4	1,1	1,8
Влажность, %:	2-12		
Разбухание за 24 часа, %, не более	34		
Теплопроводность, Вт/(м • К), не более	0,045-0,050	0,040-0,055	0,055-0,060

Для получения теплоизоляционных плит с заданными свойствами процесс получения необходимо проводить при следующих технологических параметрах: плотность исходной волокнистой смеси – от 240 до 260 кг/м^3; содержание ПЭ волокна – от 30 до 40 %.

Витебский государственный технологический университет

4.6 Композиционный текстильный материал, полученный способом импрегнирования тканого полотна

Как правило, получение армирующей основы и формирование готового композиционного текстильного материала способом импрегнирования осуществляется на разных технологических участках предприятия, а порой и на абсолютно независимых друг от друга производствах.

Для получения композиционного текстильного материала способом импрегнирования на поточной линии в производственных условиях ОАО «ВКШТ» разработана схема технологического процесса, представленная на рисунке 4.83.

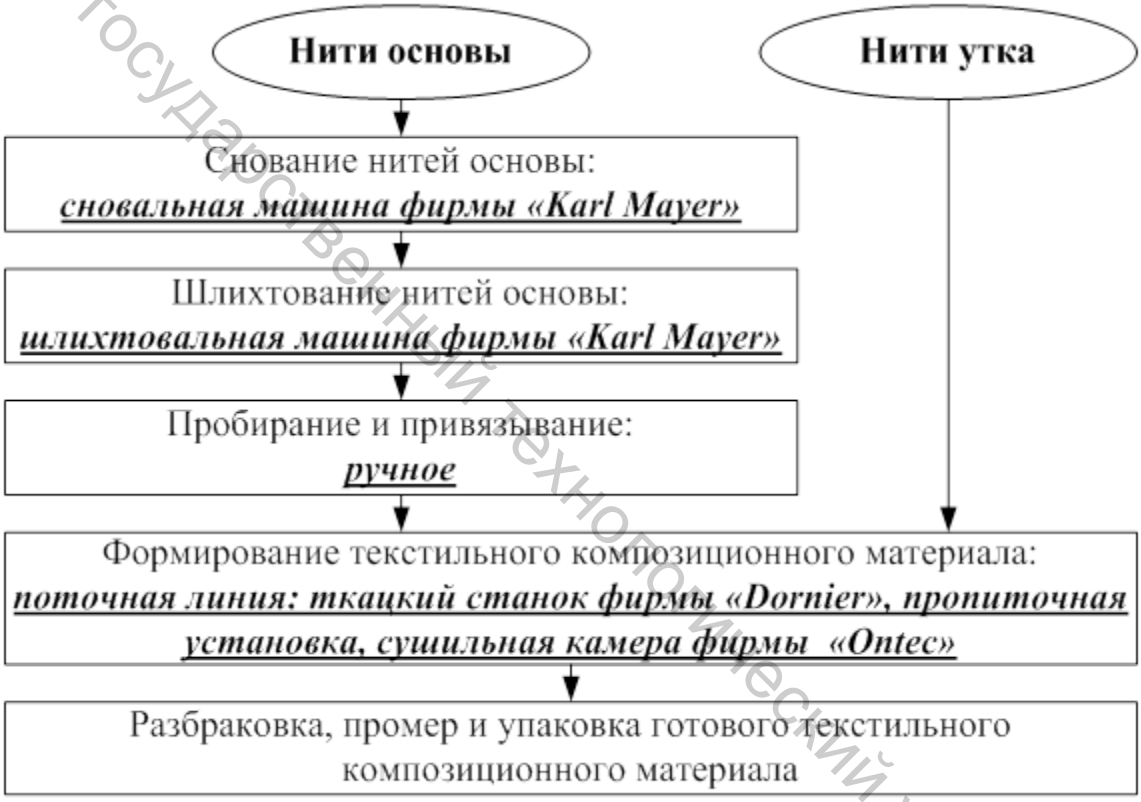
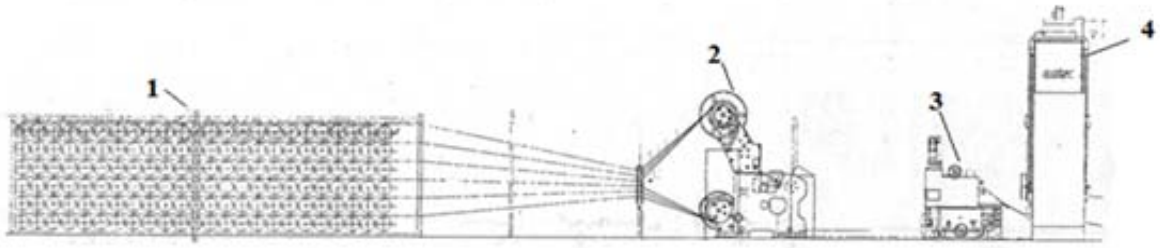


Рисунок 4.83 – Схема технологического процесса получения композиционного текстильного материала в производственных условиях ОАО «ВКШТ»

Отличительной особенностью технологии является то, что выработка армирующей основы композита – тканого полотна – и последующее формирование готового композиционного материала способом импрегнирования предлагается осуществлять на высокопроизводительной поточной линии. Технологическая схема линии представлена на рисунке 4.84.

Витебский государственный технологический университет



1 – шпулярник; 2 – ткацкий станок; 3 – пропиточная ванна; 4 – сушильная камера

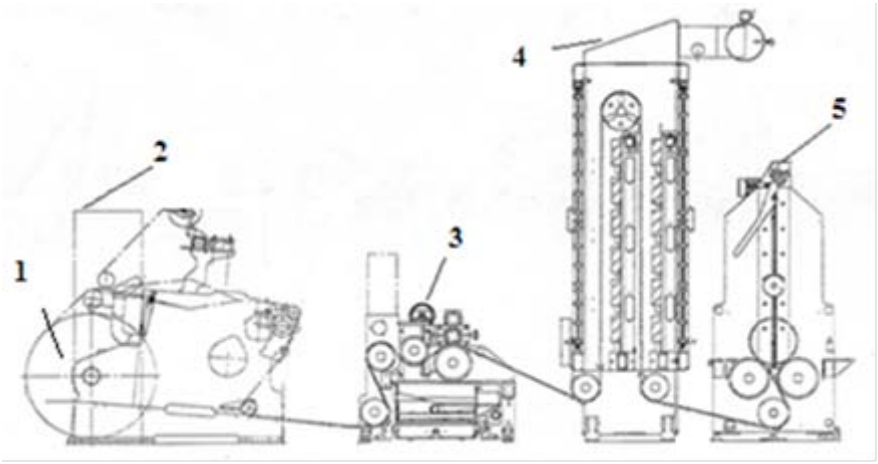
Рисунок 4.84 – Линия для производства композиционных текстильных материалов

Нити основы сматываются со шпулярника 1 непосредственно на рапирный ткацкий станок 2, где происходит формирование разряженного тканого полотна (сетки). С ткацкого станка сетка поступает в пропиточную ванну 3, где пропитывается связующим и отжимается на отжимных валах. Для фиксации связующего на поверхности сетки и закрепления ее структуры готовая сетка подается в инфракрасную сушильную камеру 4.

Для получения нового ассортимента текстильных композитов, где в качестве армирующей основы используется тканое полотно, произведена частичная модернизация представленной на рисунке 4.84 линии: из технологической цепочки исключен секционный шпулярник на 930 бобин, нити основы с которого заправляются непосредственно в ламели и галева ремиз, что дает возможность получать сетку с величиной ячейки ×1 см, но не позволяет вырабатывать тканую армирующую основу на возможную ширину ткацкого станка – 300 см; 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 модернизированной линии для выработки текстильных композиционных материалов способом импрегнирования представлена на рисунке 4.85.

Нити основы поступают на ткацком навое 1 и крепятся на рапирный станок 2, где нарабатывается тканая основа. С ткацкого станка наработанная основа подается в пропиточную ванну 3, где пропитывается полимерной композицией определенного состава и отжимается при помощи отжимных валов. Пропитанная тканая основа высушивается и термофиксируется в инфракрасной сушильной камере 4. Готовый композиционный текстильный материал наматывается на накатное устройство 5.

Витебский государственный технологический университет



1 – ткацкий навой; 2 – ткацкий станок; 3 – пропиточная ванна; 4 – инфракрасная сушильная камера; 5 – накатное устройство

Рисунок 4.85 – Модернизированная линия для производства композиционных текстильных материалов

Технологический процесс производства композиционного текстильного материала на данной линии состоит из нескольких стадий:

– наработка тканой армирующей основы на рапирном ткацком станке;

– формирование композита:

а) импрегнирование тканой основы в пропиточной ванне способом «в окунку»;

б) сушка и термофиксация материала в сушильной инфракрасной камере;

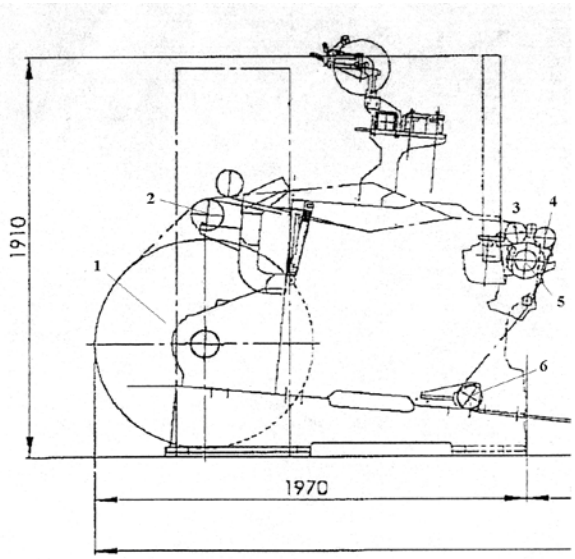
– намотка готового композиционного текстильного материала.

Использование для формирования композиционного текстильного материала высокопроизводительной линии позволит сократить технологический процесс формирования композиционного материала, значительно снизить энергозатраты.

Процесс производства тканой основы композиционного текстильного материала осуществляется на высокопроизводительном рапирном ткацком станке PTS 4/S16 фирмы «Dornier». Технологическая схема данного ткацкого станка представлена на рисунке 4.86.

Химические нити основы сматываются с ткацкого навоя 1, огибают направляющий валик 2, проходят через отверстия ламелей и глазки галев ремизок, образуя зев. Жесткими рапирами в открытый зев прокладывается нить утка, затем она прибивается бердом к опушке, где, переплетаясь с нитями основы, образует элемент тканого полотна. Тканая основа огибает грудницу 3, вальян 4, направляющий валик 5 и навивается на товарный валик 6.

Витебский государственный технологический университет



1 – ткацкий навой; 2 – направляющий валик; 3 – грудница; 4 – вальян; 5 – направляющий валик; 6 – товарный валик

Рисунок 4.86 – Технологическая схема рапирного ткацкого станка

Технические характеристики ткацкого станка представлены в таблице 4.24.

Таблица 4.24 – Технические характеристики рапирного ткацкого станка PTS 4/S16 фирмы «Dornier»

Наименование параметра	**Значение параметра**
1	**2**
Система прокладывания утка	жесткая рапира
Рабочая ширина станка, см	320,00
Максимальная проборка в бердо, см	311,00
Рабочая частота вращения главного вала, мин$^{-1}$	400,00
Скорость ввода утка, м/мин	1200,00
Механизм отпуска основы	электронный
Механизм установки плотности ткани по утку/диапазон, нит/см	электронный/0,50–7,70
Отклонение плотности ткани по утку, нит/см	±0,01
Отвод ткани на станке	периодический
Зевообразовательный механизм	электронная каретка фирмы «STAUBLI»
Кромка ткани	отрезная
Устройство отрезания кромки	механическое (ножницами)
Длина уточной нити в отрезной кромке, мм	30,00
Потребление сжатого воздуха для автоматической смазки рапир, м^3/час, не более	13,00
Установленная мощность, кВт, не более	6,20
Уровень шума, дБ, не более	80,00

Витебский государственный технологический университет

Процесс образования тканой основы на ткацком станке имеет циклический характер. Наработанная тканая основа постепенно отводится из рабочей зоны и наматывается на товарный валик, а новые участки основных нитей сматываются с навоя и вводятся в рабочую зону.

Для формирования композиционного текстильного материала из химических комплексных нитей используется линия пропитки и сушки «Ontec» (рисунок 4.85). Тканая основа поступает на плюсовку, состоящую из винтовых ширителей, пропиточной ванны, имеющей верхний и нижний валы опережения. На узле пропитки установлено устройство, обеспечивающее равномерную толщину покрытия по всей ширине. Далее тканая основа поступает в сушильную камеру инфракрасной сушки, где происходит сушка тканой основы и термофиксация на ее поверхности связующего до образования устойчивой равномерной пленки – процесс формирования композиционного текстильного материала. Максимальная температура сушки – 230 ^{0}С, потребляемая мощность сушильных зон – не более 120 кВт.

После сушильной камеры композиционный текстильный материал из химических нитей поступает на накатное устройство, где формируется рулон готового композита.

Сушка и термофиксация – заключительные операции при формировании композиционных текстильных материалов, получаемых способом импрегнирования. Цель сушки – удаление влаги из материала при формировании композита, термофиксации – закрепление связующего на поверхности тканой основы, образование несмываемой защитной пленки, фиксация устойчивого каркаса готового текстильного композита. Для процесса сушки и термофиксации на поточной линии (рисунок 4.85) используется инфракрасная сушильная камера.

Инфракрасная система излучает различные типы волн: длинные, средние и короткие (рисунок 4.87). Главная разница между тремя типами волн лежит в глубине проникания в наносимое покрытие. Излучение от коротких волн уменьшает время сушки и потребляемую электрическую мощность. Инфракрасная сушка более эффективна из-за прямого нагрева обрабатываемой поверхности.

Принцип действия инфракрасной сушки: нагрев поверхности происходит излучением, которое нагревает саму поверхность аппретируемого материала. Растворитель выходит на поверхность от внутренних к наружным слоям, обеспечивая равномерное высыхание, увеличивая износостойкость покрытия.

Витебский государственный технологический университет

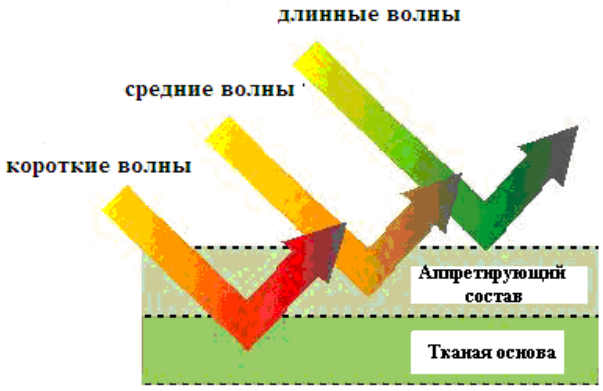


Рисунок 4.87 – Процесс инфракрасной сушки композиционных текстильных материалов

Инфракрасный нагрев – нагрев материалов электромагнитным излучением с длиной волны 1,3 – 4 мкм (инфракрасное излучение). Инфракрасный нагрев основан на свойстве материалов поглощать определённую часть спектра этого излучения. Источником энергии служит инфракрасный излучатель, состоящий из собственно источника энергии (нагретого тела) и отражателя. Излучатели укрепляют на внутренней стороне установки, расстояние между ними и поверхностью нагреваемых предметов обычно составляет 15 – 45 см [89].

Инфракрасная сушка имеет существенные преимущества перед традиционным, конвекционным методом:

– экономический эффект (скорость и затрачиваемая энергия при инфракрасной сушке в разы меньше тех же показателей, затрачиваемых при традиционных методах);

– инфракрасное излучение проникает вглубь аппретируемой поверхности, превращаясь в тепло непосредственно внутри нее, в отличие от конвекционного способа;

– инфракрасная сушка происходит без участия в ней воздуха, следовательно, пыль не оседает на поверхности, а качество импрегнирования улучшается [90].

После прогрева волокнистого слоя влага через его поверхность перемещается в окружающий воздух, который является теплоносителем и одновременно сорбентом влаги.

На рисунке 4.88 представлена принципиальная схема инфракрасной сушильной установки, установленной на линии для пропитки, сушки и термофиксации композиционного материала.

Тканая основа композиционного материала 1, попадая в сушильную камеру с некоторой скоростью $V_П$, подвергается воздействию электромагнитного излучения, создаваемого сушильными секциями 1 – 12. При воздействии на материал электромагнитных волн жидкость на поверхности испаряется и путем диффузии покидает поверхность материала, переходя в окружающую среду.

Витебский государственный технологический университет

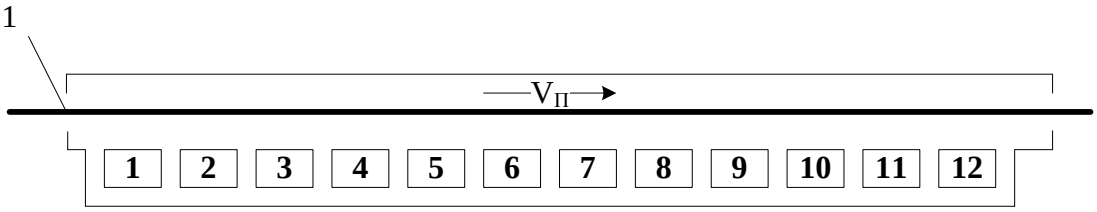


Рисунок 4.88 – Принципиальная схема инфракрасной сушильной камеры фирмы «Ontec»

В таблице 4.25 представлены основные технологические параметры инфракрасной сушки, рекомендованные для композиционных текстильных материалов из натуральных и химических волокон и нитей.

Таблица 4.25 – Режимы сушки

Материал тканой основы	**Температура, °С**	**Влажность, %**
Целлюлозные волокна и нити	100–140	7,0–11,7
Гидратцеллюлозные волокна и нити	100–140	11,9–13,9
Полиамидные волокна и нити	70–80	3,5–4,5

В технологическом процессе формирования композиционных текстильных материалов полотно проходит через сушильную установку в течение заданного времени. Длительность процесса сушки зависит от температуры. При недостаточном температурном воздействии материал останется влажным, что недопустимо в данном технологическом процессе. При слишком интенсивном тепловом воздействии может произойти изменение цвета материала, подплавление самих волокон основы или наносимого аппрета. В таблице 4.26 представлены тепловые свойства полотен различных сырьевых составов [92].

Инфракрасная сушильная камера фирмы «Ontec», используемая при формировании текстильного композиционного материала, имеет 12 сушильных секций (рисунок 4.88).

Таблица 4.26 – Показатели теплостойкости

Вид тканой основы	**Температура, ˚С**			
	размягчения	**плавления**	**начала снижения прочности**	**воспламенения**
Целлюлозные волокна и нити	–	–	150	390
Гидратцеллюлозные волокна и нити	–	–	150	400–475
Полиамидные волокна и нити	170–200	214–218	90–100	500

Витебский государственный технологический университет

Скорость движения композиционного текстильного материала в сушильной камере, м/мин:

$$V = V^{c} = V^{Ф} = \frac{l \times n^{Ф}}{t^{Ф}} = \frac{l \times n^{c}}{t^{c}}, \quad (4.188)$$

где V^{c}, $V^{Ф}$ – скорость сушки и термофиксации, соответственно, м/мин;

l – длина сушильной секции (согласно паспортным данным $l = 0{,}285$ м);

$n^{Ф}$, n^{c} – число секций термофиксации (сушки);

$t^{Ф}$, t^{c} – время термофиксации (сушки), с.

Было установлено оптимальное соотношение секций сушки к секциям термофиксации, составляющее 11/1. При данном соотношении скорость материала составляет 0,61 м/мин, время сушки составляет 306,3 секунда, а время термофиксации – 27,9 секунды (9,1 % времени сушки).

Расчетные и экспериментальные данные процесса сушки и термофиксации представлены в таблице 4.27.

Таблица 4.27 – Расчетные и экспериментальные данные процессов сушки и термофиксации композиционного текстильного материала

Параметр	**Обозначение**	**Единица измерения**	**Значение расчетное**	**Значение экспериментальное**
Начальное влагосодержание	W_0	%	–	60,0
Первое критическое влагосодержание	W_{K1}	%	–	58,3
Второе критическое влагосодержание	W_{K2}	%	–	24,1
Равновесное влагосодержание	W_P	%	–	2,3
Относительный коэффициент сушки	χ	–	0,046	–
Продолжительность сушки в первом периоде (период прогрева материала)	$\tau 1$	с	3,1	3,1
Продолжительность сушки во втором периоде (период постоянной скорости сушки)	$\tau 2$	с	68,4	68,4

Витебский государственный технологический университет

Продолжительность третьего периода сушки (период падающей скорости сушки)	τЗ	с	234,8	234,8
Продолжительность сушки	τ	с	303,6	303,6
Скорость сушки	N	%/с	0,5	0,5

4.6.1 Физико-химические явления и процессы, протекающие при импрегнировании волокнистых систем

Одной из основных технологических операций, связанных с производством композиционных текстильных материалов, является пропитка армирующей структуры полимерным связующим. Особенно важен этот аспект при использовании в качестве основы композитов готовых волокнистых полотен или изделий, к которым в первую очередь следует отнести нетканые полотна, ткани и плетеные каркасы, имеющие заданную потребителем форму.

Проблема пропитки заключается в полном насыщении капиллярно-пористого пространства волокнистого каркаса специальными подобранными полимерными композициями. Учитывая, что при поступлении в пропиточный агрегат в порах основы находится воздух, задача сводится к максимально возможному его удалению в момент контакта со связующим.

Способ решения поставленной задачи во многом определяется технологическим процессом изготовления композита и последующего назначения изделия. Следует отметить, что независимо от способа формирования, строго контролируются вязкость и количество наносимого связующего, сила натяжения полотна, температура и продолжительность термообработки и сушки, количество летучих веществ и другие параметры.

Для достижения высоких прочностных свойств текстильных композитов возможно производить пропитку армирующей основы следующими методами:

- протягиванием через ванну со связующим;
- окунанием волокнистого материала;
- просасыванием связующего через слой волокнистого материала под действием разности давлений;
- методом капиллярного насыщения;
- комбинированными методами.

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

Витебский государственный технологический университет

пористости армирующей основы, способа ее изготовления и темпов впитывания связующего. Однако, учитывая ограниченное время, на протяжении которого связующее находится в жидком состоянии (до начала полимеризации), целесообразно провести экспериментальное изучение процесса капиллярной пропитки.

Таким образом, основными физико-химическими процессами, происходящими в процессе формирования композиционных текстильных материалов способом импрегнирования волокнистой основы, являются:

– смачивание волокнистого материала жидкой системой на основе полимерной композиции;

– капиллярные явления, то есть особенности движения пропитывающей жидкости в структуре тканого полотна;

– выделение и закрепление полимера на поверхности волокон путем образования адгезионных контактов.

Основными факторами, влияющими на процесс формирования готового текстильного композита и его свойства, являются: качественный и количественный состав полимерной композиции, температура и продолжительность импрегнирования, сушки и термофиксации, при которых происходит формирование, и не происходит пересыхание поверхности материала, разрушение его волокон и нитей, растрескивание структуры и ухудшение физико-механических свойств.

В процессе импрегнирования текстильной основы композита в пропиточной ванне в результате гидростатического давления и под действием капиллярных сил начинается проникновение дисперсии в текстильную основу. Сначала полимерное связующее поступает в наиболее широкие капилляры, затем – в более узкие, а ее частицы проникают не только в промежутки между отдельными волокнами и нитями, но и в глубь них. После импрегнирования при высушивании происходит отложение данных частиц на волокнах и нитях материала.

Пропитывающая способность текстильного полотна зависит от свойств самого волокнистого материала (природа волокна, общая пористость тканой основы), а также свойств аппретирующей композиции (вязкость, поверхностное натяжение, краевой угол смачивания).

По мере снижения способности смачиваться водой волокна можно расположить в такой последовательности: вискозное > хлопковое > поливинилспиртовое > полиамидное > полиэфирное > полипропиленовое, что согласуется с уменьшением гидрофильности волокон.

Эффективность и качество пропитки текстильной основы оценивается следующими параметрами:

– скоростью импрегнирования (пропитывания);

Витебский государственный технологический университет

– равномерностью распределения связующего по объему текстильной основы композиционного материала. Следует также учитывать, что при импрегнировании дисперсией ее частицы могут отфильтровываться частично или полностью и оставаться на поверхности материала [18].

Скорость импрегнирования – скорость продвижения жидкости в глубь волокнистого материала. Она может быть охарактеризована временем, необходимым для поглощения материалом определенного количества жидкости и зависит от свойств жидкости: капиллярное поднятие жидкости у дисперсии с малым поверхностным натяжением меньше, чем у дисперсии с большим поверхностным натяжением; от свойств пропитываемого материала: например, вискозное волокно по своей природе является гидрофильным, независимо от наличия на нем шлихты, так как в молекулах волокна имеется достаточное количество полярных групп, чтобы обеспечить взаимодействие поверхности волокна со смачивающей жидкостью.

Проникновение жидкости в пористые системы интерпретируется классическими законами капиллярности, согласно которым скорость поднятия жидкости определяется уравнением Уошборна [18]:

$$\frac{dh}{dt} = \left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos\theta}{r} - \rho \cdot g \cdot h \right) \cdot \frac{r^2}{8 \cdot \eta \cdot h}, \qquad (4.189)$$

где h – высота поднятия жидкости, м;

t – время, с;

σ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м;

θ – краевой угол натекания, образованный жидкостью со стенкой капилляра, град;

ρ – плотность жидкости, кг/м^3;

g – ускорение свободного падения, м/с^2;

r – радиус капилляра, м;

η – вязкость жидкости, Па·с.

Если пренебречь силой тяжести ввиду её малости по сравнению с капиллярной силой, уравнение (4.189) примет вид:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot r \cdot \cos\theta}{8 \cdot \eta \cdot h}. \qquad (4.190)$$

Для пористых тел, к которым относится текстильная основа композита, наибольшее распространение получило уравнение Волковой – Госкинса – Уошбурна [16]:

Витебский государственный технологический университет

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\sigma \cdot R \cdot \cos\theta}{4 \cdot \eta \cdot h}, \qquad (4.191)$$

интегрируя которое, получим

$$\frac{h^2}{t} = \frac{\sigma \cdot \cos\theta}{2 \cdot \eta} \cdot R + const, \qquad (4.192)$$

где R – радиус капилляра, м;

const – постоянная интегрирования.

В процессе формирования текстильного композита происходит механическое воздействие на волокна и нити, вследствие чего размеры поперечного сечения нити расплющиваются, изменяются размеры и форма пор – принимают форму щели из-за того, что некоторые элементарные нити занимают свободное пространство.

Следовательно, скорость импрегнирования текстильного композита способом импрегнирования описывается математической моделью:

$$\frac{h^2}{t} = \frac{\sigma \cdot \cos\theta}{2 \cdot \eta} \cdot \frac{2 \cdot S}{P} = \frac{\sigma \cdot \cos\theta}{\eta} \cdot \frac{S}{P}, \qquad (4.193)$$

где S – площадь капилляра (поры), $м^2$;

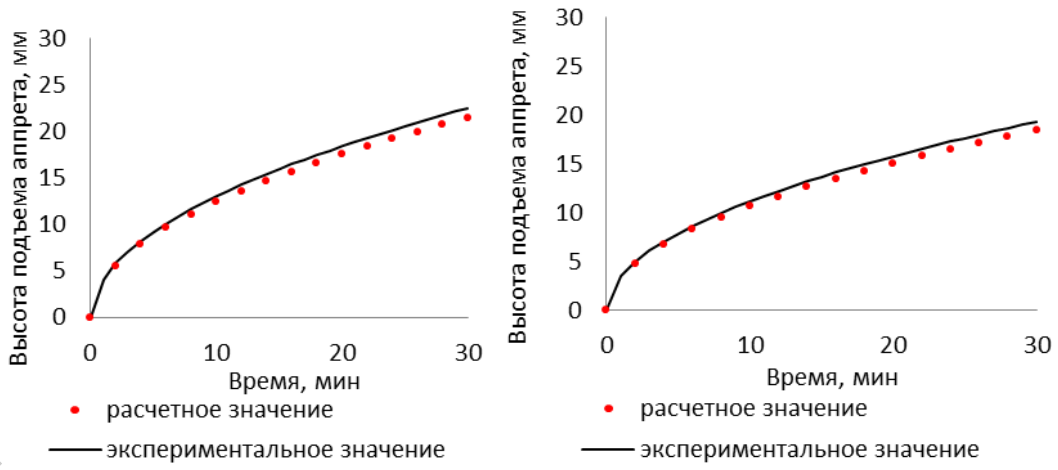
P – периметр капилляра (поры), м.

Как видно из уравнения (4.193), скорость пропитки текстильной основы композита зависит от свойств полимерной композиции: поверхностного натяжения, краевого угла и вязкости, которые зависят от концентрации и температуры процесса импрегнирования.

Нами были проведены экспериментальные исследования зависимости скорости пропитки тканой основы из вискозных нитей водной дисперсией стирол-акрилата от концентрации связующего и температуры импрегнирования. Концентрация стирол-акрилата – 100 и 500 г/л (выбор концентрации зависит от назначения получаемого материала), температура – 20 °С (температура в производственном помещении, не требует дополнительного подогрева пропиточной ванны, следовательно, позволяет экономить энергетические ресурсы), время импрегнирования – 30 минут. Путем расчетов получен ряд чисел, соответствующий значениям высоты подъема и скорости поднятия дисперсии стирол-акрилата в капиллярной структуре текстильного композита в определенный момент времени.

На рисунках 4.89 и 4.90 представлены графические зависимости изменения высоты подъема и скорости подъема полимерной композиции.

ВитебскийГосударственныйТехнологическийУниверситет

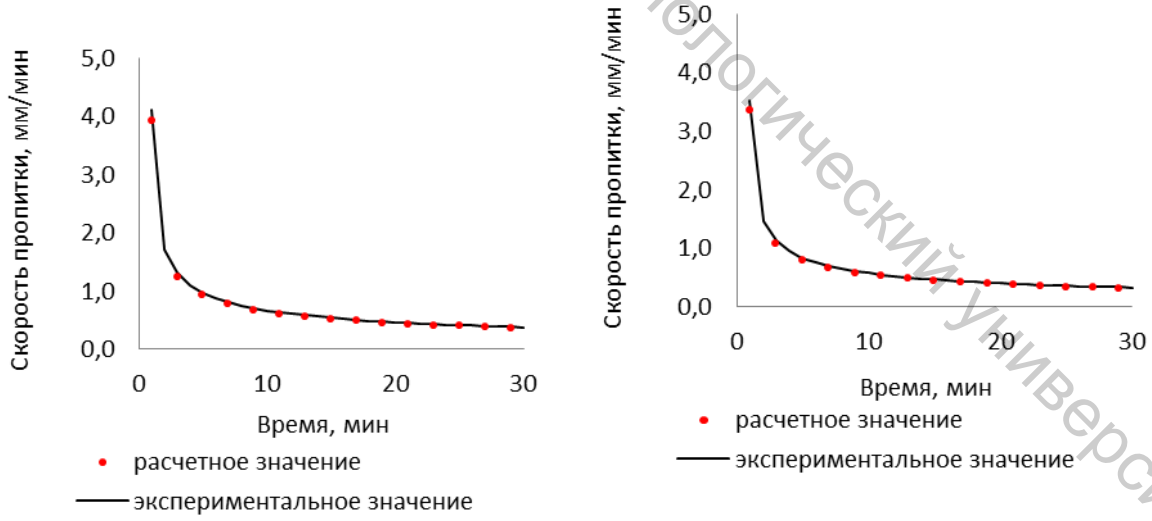


а б

Рисунок 4.89 – Изменение высоты подъёма аппрета при концентрациях 100 г/л (а) и 500 г/л (б), температура импрегнирования – 20 °С

Высота подъема дисперсии стирол-акрилата значительно уменьшается с увеличением ее концентрации. Следовательно, при увеличении концентрации стирол-акрилата для интенсификации процесса импрегнирования рекомендуется увеличивать температуру плюсовочной ванны, но не выше 50 – 60 °С, что связано с возможностью астабилизации и коагуляции дисперсии.

Путем дифференцирования полученных экспериментальных данных построены графические зависимости скорости пропитки полимерной композиции.



а б

Рисунок 4.90 – Изменение скорости пропитки тканой основы при концентрации 100 г/л (а) и 500 г/л (б), температура импрегнирования – 20 °С

Витебский государственный технологический университет

С увеличением температуры поверхностное натяжение и вязкость водной низковязкой дисперсии стирол-акрилата значительно снижаются. Причем, в данном случае уменьшение поверхностного натяжения незначительно мало по сравнению с абсолютным уменьшением вязкости и так низковязкой дисперсии, а, следовательно, это не приводит к ухудшению пропитывания и снижению скорости пропитки тканой основы.

При исследовании пропитки нетканых полотен [93] установлено, что высота и скорость капиллярного подъема возрастают с увеличением поверхностной (объемной) плотности полотен. Кроме того, капиллярность как по длине, так и по ширине образцов имеет приблизительно одинаковые значения. Учитывая то, что на протяжении первых 10 – 12 мин смачивающая образец жидкость поднималась на высоту 60 – 80 мм в зависимости от поверхностной плотности нетканого полотна, то есть время, когда связующее еще находится в жидком состоянии, проведены исследования образцов № 1, 2, 3, 4 (таблица 4.28), изготовленные разными способами и имеющие различные показатели.

Таблица 4.28 – Свойства образцов нетканых материалов

Номер образца	Состав сырья и способ формирования холста	Толщина, при удельном давлении 2,0 кПа, мм.	Поверхностная плотность, г/м^2	Пористость, %	Максимальный диаметр пор, мкм
1	ПП - 100 %, спанбонд иглопробивной термостаб.	2,30	437,4	79,1	107
2	ПП - 100 %, спанбонд иглопробивной термостаб.	2,50	469,7	79,3	94
3	Штапельное, ПЭ (20 %) + ПП (80 %), суровое, иглопробивное, «Геоком Д», «Комитекс»	6,72	780,1	88,7	40
4	Штапельное, ПЭ(20%) + ПП(80%), иглопробивное	6,77	868,2	87,5	45

Витебский государственный технологический университет

В результате проведения исследований установлено, что все испытуемые образцы в течение 6 – 8 минут полностью впитывают в себя связующее до начала его полимеризации в количестве, равном объему порового пространства основы, за счет капиллярного подъема. При этом структура нетканого полотна не претерпевала никаких изменений. Однако наблюдается неравномерность количества связующего по толщине образца: в нижней части образуется отвердевшая подложка, а на внешней (верхней) поверхности над слоем матрицы выступают кончики волокон.

Отдельного внимания заслуживает образец № 3, который пропитался приблизительно на 50 % по толщине в связи с недостатком связующего по отношению к пористости образца. Не пропитанная верхняя часть основы твердая, что объясняется более высокой скоростью подъема по капиллярам, имеющим наименьшие размеры.

При изучении торцевых срезов под микроскопом в структуре образцов не обнаружены пузырьки воздуха, что указывает достаточно высокое качество пропитки методом капиллярного подъема. Следует также отметить отсутствие воздушных включений, трещин, изломов на границе раздела волокно-связующее. Это позволяет судить о хорошем взаимодействии отвержденной матрицы и синтетических структурных элементов нетканой основы.

Резюмируя изложенное, можно сделать вывод о нецелесообразности использования метода капиллярного подъема связующего при пропитке нетканой основы без дополнительного уплотняющего устройства, например, валика, для отжима излишков связующего и удаления воздуха из пор волокнистого материала.

Процентное содержание адсорбированной дисперсии стирол-акрилата в объеме тканой основы для предельных значений ее концентрации в полимерной композиции (100 и 500 г/л) при температуре процесса импрегнирования 20, 40 и 60 °С определяли «методом сухого привеса» – наиболее распространенный метод (рисунки 4.91 и 4.92). Взвешенный образец тканой основы 10×10 см подвергают в определенных условиях пропитыванию полимерной композицией, затем высушивают и снова взвешивают. Привес (величина адсорбции), выраженный в процентах от массы исходного материала, служит количественной характеристикой пропитывающих свойств полимерной композиции.

Анализ представленных графических зависимостей показывает, что повышение концентрации дисперсии стирол-акрилата в полимерной композиции увеличивает эффективность пропитывания. Процесс адсорбции протекает с высокой скоростью в начальный период импрегнирования материала (в течение 1 – 2 минут).

Витебский государственный технологический университет

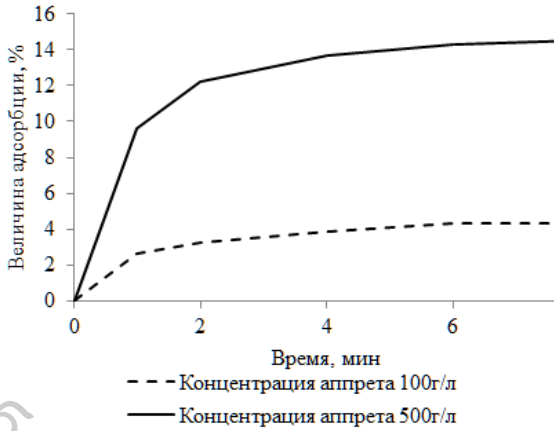


Рисунок 4.91 – Кинетические кривые адсорбции стирол-акрилата на тканой основе композиционного материала

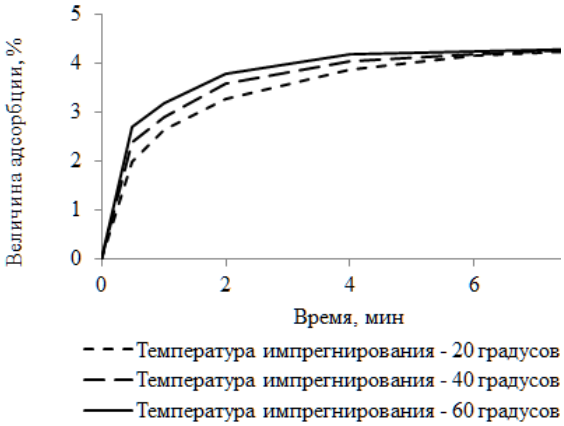


Рисунок 4.92 – Кинетические кривые адсорбции стирол-акрилата на тканой основе композиционного материала

Далее механизм и скорость переноса сорбата зависят от концентрации стирол-акрилата и температуры импрегнирования: величина адсорбции тем выше, чем выше концентрация и температура.

Равномерность и скорость адсорбции также зависит от структуры тканой основы: чем больше плотность тканой основы, тем быстрее наступает адсорбционное равновесие. Увеличение сквозной пористости тканой основы приводит к замедлению процесса адсорбции.

Однако тканая основа композита является гетеропористой системой с сообщающимися капиллярами, следовательно, размер частиц дисперсии стирол-акрилата, вязкость, сорбционная устойчивость малозначительно влияют на процесс пропитывания.

При повышении температуры в пропиточной ванне улучшается доступность макропор волокнистого материала для проникновения макромолекул связующего. Следовательно, повышение температуры пропитывания значительно улучшает проникновение полимерной композиции в поры тканой основы композиционного материала, однако чрезмерный и длительный нагрев пропитывающей дисперсии связующего может привести к ее астабилизации и коагуляции.

Для определения процентного содержания адсорбированной дисперсии связующего в объеме тканой основы композита можно использовать формулу

$$N_{адс.} = \frac{C \cdot \left[k_0 \cdot \gamma_0 \left(\gamma_в \cdot в - m_Н\right) + 640 \cdot \gamma_в \sqrt{\gamma_0 \cdot \eta \cdot v}\right]}{C \cdot \left[k_0 \cdot \gamma_0 \left(\gamma_в \cdot в - m_Н\right) + 640 \cdot \gamma_в \sqrt{\gamma_0 \cdot \eta \cdot v}\right] + \gamma_в \cdot m_Н} \cdot 100, \quad (4.194)$$

Витебский государственный технологический университет

где С – концентрация дисперсии в полимерной композиции, г/л;

k_0 – коэффициент пропитывания, учитывающий степень заполнения пор полимерной композицией;

γ_0 – плотность полимерной композиции, кг/м^3;

$\gamma_в$ – плотность волокна, кг/м^3;

в – толщина тканой основы, м;

$m_Н$ – масса 1 м^2 тканой основы, кг;

v – скорость движения тканой основы на поточной линии, м/с;

η – вязкость, Па·с.

Известно, что при условии, что все поры тканой основы композиционного материала при пропитке полимерной композицией заполнены, то масса связующего m_1, поглощенная порами тканой основы на 1 м^2, кг:

$$m_1 = \omega \cdot \gamma_0 \cdot в, \qquad (4.195)$$

где ω – относительная объемная пористость тканой основы (общая пористость).

Толщина тканой основы, м:

$$в = h_о + \eta_{ов}, \qquad (4.196)$$

где $\eta_{ов}$ – коэффициент смятия нитей основы для сечения эллипс по вертикальной оси;

$h_о$ – высота волны изгиба нитей основы, м.

Если часть объема пор не будет заполнена связующим или в нем окажутся пузырьки воздуха, то масса связующего, кг:

$$m_1 = k_0 \cdot \omega \cdot \gamma_0 \cdot в. \qquad (4.197)$$

Коэффициент пропитывания определяется следующим образом:

$$k_0 = \frac{w_a}{P_R}, \qquad (4.198)$$

где w_a – массовая доля аппрета (полимерной композиции) после пропитывания, %;

P_R – общая пористость материала, %.

Общая пористость материала состоит из микроструктуры волокон, макроструктуры всего материала и сквозной пористости между нитями в переплетении

Витебский государственный технологический университет

В свою очередь массовая доля полимерной композиции, %:

$$w_a = \frac{P_2 - P_1}{V_1 \cdot \gamma_o} \cdot 100, \qquad (4.199)$$

где P_2 – масса образца после пребывания в аппретирующем растворе, кг;

P_1 – масса сухого образца, кг;

V_1 – объем образца, $м^3$.

Общая пористость материала, %:

$$P_R = \frac{V_P}{V_1} \cdot 100, \qquad (4.200)$$

где V_P – объем пор, $м^3$:

$$V_P = V_1 - \frac{P_1}{\gamma_в}. \qquad (4.201)$$

В свою очередь относительная объемная пористость тканой основы может быть выражена уравнением

$$\omega = \frac{\gamma_в \cdot в - m_н}{\gamma_в \cdot в}. \qquad (4.202)$$

Подставляя значение ω в уравнение (3.18), получим выражение для m_1, кг:

$$m_1 = \frac{k_0 \cdot \gamma_0 \cdot (\gamma_в \cdot в - m_Н)}{\gamma_в}. \qquad (4.203)$$

Однако при выходе тканой основы из пропиточной ванны вследствие смачивания на обеих поверхностях будут образовываться тонкие слои полимерной композиции с толщинами h_1.

Если исходить из уравнения, связывающего динамическую вязкость пропиточного состава η со скоростью движения тканой основы v при выходе ее из пропиточной ванны, то толщина слоя h_1, м:

$$h_1 = \sqrt{\frac{v \cdot \eta}{\gamma_0 \cdot g}}. \qquad (4.204)$$

Витебский государственный технологический университет

Тогда количество связующего, наносимое на обе стороны тканой основы на 1 м^2 m_2, кг:

$$m_2 = 2 \cdot h_1 \cdot \gamma_0. \quad (4.205)$$

Или с учетом уравнения (4.204) с некоторым округлением количество связующего, кг:

$$m_2 = 0{,}64 \cdot \sqrt{\gamma_0 \cdot \eta \cdot v}. \quad (4.206)$$

Из анализа формулы (4.194) при рассмотрении механизма процесса пропитки следует, что при прочих равных условиях:

– с увеличением плотности пропитывающей полимерной композиции γ_0 увеличивается относительное содержание полимерной композиции в пропитанном тканом полотне, приближаясь постепенно к постоянной величине (так как с увеличением плотности вязкость раствора увеличивается быстрее);

– с увеличением скорости v выхода тканого полотна из пропиточной ванны или с увеличением вязкости η пропитывающей дисперсии также увеличивается относительное содержание полимерной композиции (за счет увеличения толщины) с той же тенденцией, что и при увеличении плотности;

– с увеличением плотности волокон тканой основы относительное количество полимерной композиции в пропитанном тканом полотне незначительно уменьшается, так же как и с увеличением толщины наполнителя.

Полученные расчетные и экспериментальные данные представлены в таблице 4.29.

Установлено, что отклонение теоретических значений от экспериментальных составляет 1,58 %, что подтверждает адекватность формулы (4.204), следовательно, она может быть использована для определения процентного содержания адсорбированной дисперсии в объеме тканой основы композиционного материала в процессе импрегнирования.

Недостаток метода сухого привеса заключается в том, что он не учитывает отфильтровывание частиц дисперсии связующего. Рассмотрен специальный метод, учитывающий способность полимерной композиции равномерно пропитывать тканую основу [18].

Витебский государственный технологический университет

Таблица 4.29 – Расчетные и экспериментальные данные

Показатель	Обозначение	Расчетные значения		Экспериментальные значения	
		Концентрация 100 г/л	Концентрация 500 г/л	Концентрация 100 г/л	Концентрация 500 г/л
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Масса образца, г	P_1	–		4,9	
Масса образца после аппретирования, г	P_2	–		5,5	6,0
Плотность вискозного волокна, г/см^3	$\gamma_в$	1,5		–	
Длина образца, см	l	10,0		–	
Ширина образца, см	b	10,0		–	
Толщина (высота), см	в	0,1		–	
Объем образца, см^3	V_1	12,0		–	
Объем пор, см^3	V_P	8,8		–	
Общая пористость материала, %.	P_R	73,3		–	
Массовая доля аппрета (полимерной композиции) после пропитывания, %	w_a	5,0	9,2	–	
Коэффициент пропитывания	k	0,1	0,1	–	
Относительная объемная пористость	ω	0,7		–	
Масса связующего, поглощенная порами тканой основы на 1 м^2, кг	m_1	0,1	0,1	–	
Толщина слоя, м	h_1	0,0002900	0,0000957	–	
Количество связующего, наносимое на обе стороны тканой основы на 1 м^2, кг	m_2	0,608	0,201	–	
Процентное содержание адсорбированной дисперсии стирол-акрилата, %	$N_{адс.}$	4,23	14,50	4,30	14,60

Согласно данному методу, количество пропитывающего вещества определяется путем взвешивания нитей утка длиной 10 см и вычитания

Витебский государственный технологический университет

из найденного значения веса таких же нитей, взятых из непропитанной тканой основы композиционного материала. Продолжительность обработки – 15 минут, концентрация дисперсии стирол-акрилата – 100 и 500 г/л, температура обработки – 20 °С.

Результаты проведенных экспериментов представлены графически на рисунках 4.93 и 4.94.

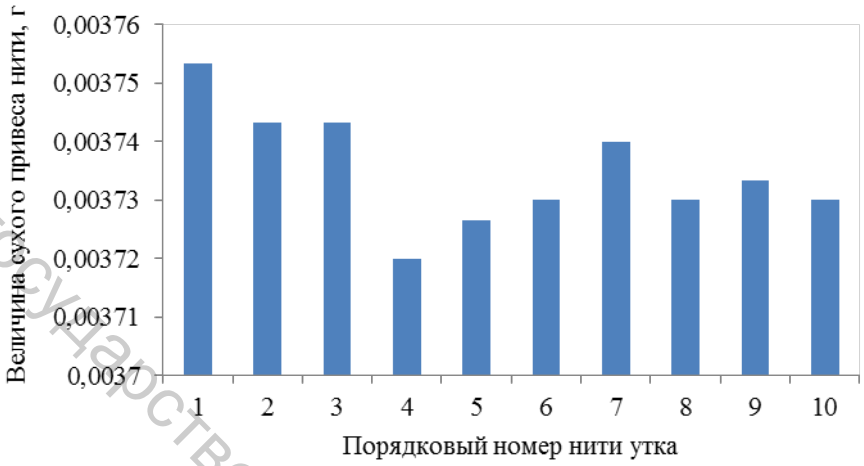


Рисунок 4.93 – Величина сухого привеса различных нитей утка тканой основы композиционного материала при концентрации стирол-акрилата – 100 г/л

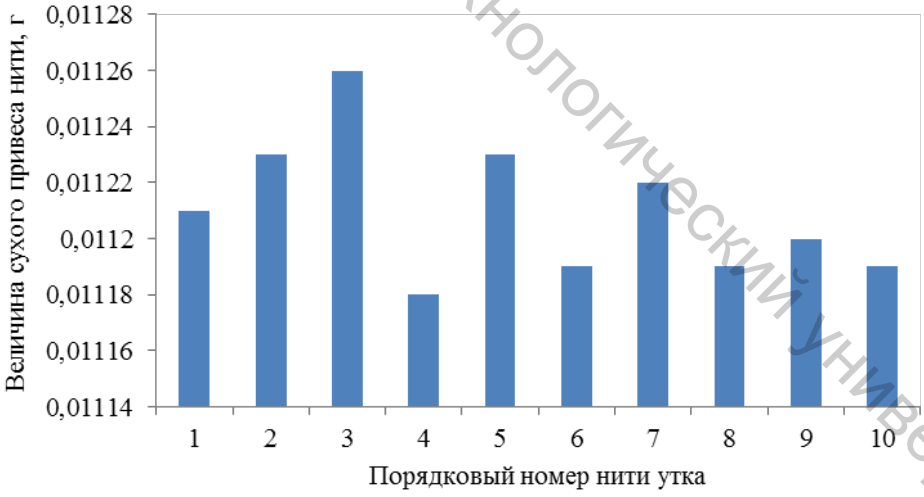


Рисунок 4.94 – Величина сухого привеса различных нитей утка тканой основы композиционного материала при концентрации стирол-акрилата – 500 г/л

Анализируя представленные графические зависимости, можно сделать вывод, что количество дисперсной фазы, отложившейся на различных нитях утка, практически одинаково. Коэффициенты

Витебский государственный технологический университет

вариации полученных данных равны 0,25 % и 0,21 %, соответственно. Такие значения данного показателя обусловлены удачно выбранным переплетением тканой основы, а также видом используемого сырья – рыхлой, гидрофильной, комплексной вискозной нитью. В свою очередь следует заметить, что концентрация стирол-акрилата играет незначительную роль при выбранных режимах обработки и параметрах строения тканой основы.

Среднее количество отложившейся дисперсной фазы на тканой основе текстильного композита при предельных значениях концентрации стирол-акрилата составляет 9,5 % и 28,7 %, соответственно.

Таким образом, на скорость и качество пропитки текстильной основы при формировании композита влияет ряд взаимосвязанных между собой факторов: концентрация выбранной полимерной композиции, температура и время процесса импрегнирования.

Следует также учитывать влияние факторов, имеющих практическое значение:

– геометрические размеры сквозных пор, входящих в переплетение тканой основы и обусловленных видом и линейной плотностью используемого сырья, структурой и переплетением тканой основы;

– перемешивание пропиточной жидкости и отжим тканой основы в процессе пропитывания (при перемешивании аппретирующего препарата и с отжимом на плюсовочной ванне эффективность пропитки увеличивается в 1,5 – 2 раза);

– изгиб тканой основы (при изгибе тканой основы на направляющих роликах пропиточной ванны происходит расширение пор и, как следствие, улучшение пропитки) [94].

Витебский государственный технологический университет

5 ТЕРМООБРАБОТКА И СУШКА КОМПОЗИЦИОННЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

5.1 Термообработка слоистых композиционных материалов с тканым покрытием для придания специальных эффектов

Для придания дуплексным композиционным материалам с тканым покрытием специфических эффектов (водоотталкивающих свойств, шелковистой отделки, отделка типа "лаке", "вощеной" или металлизированной поверхности) используются разные методы их отделки, одним из которых является каландрирование.

Придание тканям различных эффектов достигается путём использования специального оборудования – каландров [95]. Они представляют собой валковые машины, в состав которых входят вертикально расположенные стальные валы. Каландры состоят из ведущего вала, имеющего привод, и ведомого вала, вращающегося вследствие сил трения.

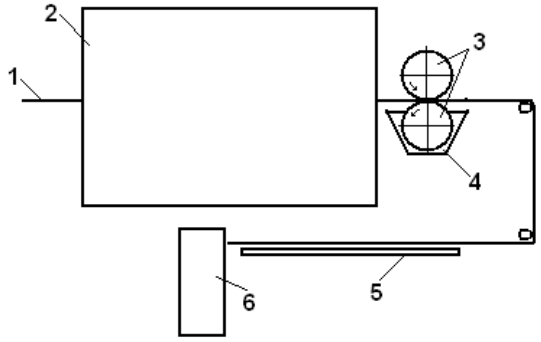
В соответствии с видом воспроизводимого на ткани эффекта используются каландры следующих типов:

1. предназначеные для разглаживания ткани, улучшения грифа и придания умеренного блеска. При прохождении полотна через каландры нити в ткани несколько расплющиваются, ткань становится более наполненной и добротной на ощупь.

2. сообщающие тканям шелковистый блеск, то есть обеспечивают получение шелковистой отделки. Один из валов этих каландров имеет гравюру в виде наклонных параллельных штрихов, которые, отпечатываясь на ткани, изменяют светопреломление от ее поверхности. Для получения максимального эффекта необходимо, чтобы число и наклон штрихов перекрывали структуру переплетения ткани.

Нанесение водонепроницаемой пленки на дуплексные композиционные материалы тканым покрытием осуществляется следующим образом (рисунок 5.1). Дуплексный композиционный материал *1* проходит сушильную камеру *2* на линии по производству дуплексных материалов. По выходу из сушильной камеры на лицевую сторону дуплексного материала – ткань – из корыта *4* с помощью нагретого каландра *3* наносится восковый состав. Температура поверхности каландров составляет 60 – 65 ^{0}С (температура плавления воска). Затем дуплексный материал с нанесенным покрытием охлаждается на столе-накопителе *5* и поступает на автомат для размотки в потребительские рулончики *6*.

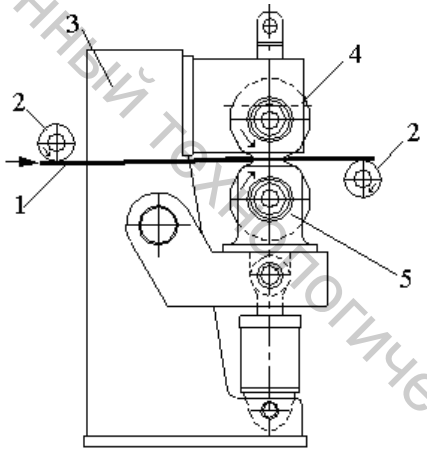
Витебский государственный технологический университет



1 – дуплексный материал с тканым покрытием; 2 – сушильная камера;
3 – нагретые каландры; 4 – корыто с воском;
5 – стол-накопитель; 6 – автомат для размотки в рулончики

Рисунок 5.1 – Схема нанесения водоотталкивающей пленки на поверхность дуплексных материалов с тканым покрытием

Для придания шелковистой отделки дуплексные материалы с тканым покрытием *1* проходят направляющие ролики *2* и каландры *4* и *5*, закрепленные на станине *3* (рисунок 5.2). Каландр *5* имеет на поверхности гравюру.



1 – дуплексные материалы с тканым покрытием; 2 – направляющий ролик; 3 – станина; 4 – верхний каландр; 5 – нижний каландр с гравюрой

Рисунок 5.2 – Каландры для осуществления шелковистой отделки

В состав каландра входят:

- обогреваемые валы (термовалы), твердость наружной поверхности которых составляет 51-54 HRC;
- приводные направляющие ролики, изготовленные из углеродистой стали;
- станина из углеродистой стали. Механизм подъема и прижима валов – гидравлический.

При прохождении дуплексных материалов с тканым покрытием через нагретые валы ткань соприкасается с каландром, имеющим гравюру в виде наклонных параллельных штрихов, которые

Витебский государственный технологический университет

отпечатываются на ткани и придают эффект серебрения, изменяя светопреломление от ее поверхности.

Эффект каландрирования определяется не только типом каландра, но и температурным режимом обработки.

Максимальные температуры обработки материалов, составляющих дуплексные материалы с тканым покрытием, различны (например, для бумаги 170 – 230 ^{0}C, для льняной ткани 200 – 250 ^{0}C) важно выбирать оптимальную температуру, каландров [96]. Также необходимо знать температуру, при которой произойдет усадка ткани и в результате этого ухудшение внешнего вида готовых дуплексных материалов. Клеевая пленка между тканью и бумажным полотном также может потрескаться и пожелтеть при контакте с нагретой поверхностью каландров. С другой стороны шелковистая отделка осуществляется при температуре поверхности каландров не ниже 110 градусов. Температура поверхности каландров устанавливается исходя из термических характеристик ткани, основы и связующего.

Для протекания процесса отделки необходимо определить длительность прогрева материала до заданной температуры, в результате чего возможно подобрать каландры необходимого диаметра.

Для определения длительности процесса отделки дуплексных материалов с тканым покрытием рассмотрим закон распределения температуры по толщине материала. Задача о распространении тепла в твердом теле была рассмотрена во многих теоретических и экспериментальных исследованиях при изучении процессов, протекающих во время сушки и отделки различных материалов, применяемых в легкой промышленности [97]. Однако процесс каландрирования дуплексных материалов с тканым покрытием имеет ряд особенностей.

В процессе отделки дуплексных материалов важными параметрами являются: температура материала, скорость его нагревания и длительность контакта с каландрами. Проходя через каландры, дуплексный материал нагревается, а на выходе из них – охлаждается, при этом температурное поле дуплексного материала изменяется во времени, то есть является нестационарным.

Полотно дуплексного материала представляет собой систему, состоящую из двух слоев (ткань и бумага), отличающихся друг от друга теплопроводностью и толщиной. Температурный анализ процесса отделки проведен как анализ теплообмена в системе двух неограниченных пластин при нестационарных условиях [97].

В непрерывном технологическом процессе получения материал проходит через каландры. Необходимо определить оптимальную длительность каландрирования при заданной температуре и скорости вращения каландров.

Витебский государственный технологический университет

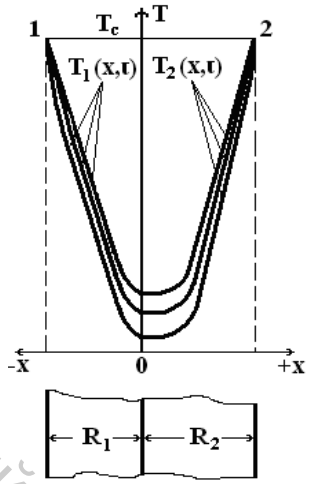


Рисунок 5.3 – Температурное поле системы двух неограниченных пластин

Для решения поставленной задачи исследована система двух пластин толщиной R_1 и R_2, находящихся в тепловом поле с начальной температурой T_C (рисунок 5.3). Так как ширина и длина пластин бесконечно велики, по сравнению с толщиной, то система была рассмотрена как система неограниченных пластин. Поскольку теплообмен между поверхностью дуплексного материала и тепловым потоком происходит по всей поверхности, температура зависит только от времени и толщины пластин (симметричная задача) [97].

Две неограниченные пластины толщиной R_1 (полотно основы) и R_2 (ткань) с разными теплофизическими коэффициентами соединены между собой. Начальная температура одинакова. В начальный момент времени поверхности мгновенно нагреваются до температуры T_c, которая поддерживается постоянной на протяжении всего процесса. Требуется найти распределение температуры по толщине системы из двух пластин.

Поскольку начало координат выбрано в плоскости склеивания, краевые условия имеют следующий вид [97]:

$$T_1(x,0) = T_2(x,0) = 0; \tag{5.1}$$

$$T_1(-R_1,\tau) = T_2(R_2,\tau) = T_c; \tag{5.2}$$

$$T_1(0,\tau) = T_2(0,\tau); \tag{5.3}$$

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\cdot\frac{\partial T_1(0,\tau)}{\partial x} = \frac{\partial T_2(0,\tau)}{\partial x}, \tag{5.4}$$

где λ_1 и λ_2 – коэффициенты теплопроводности основы и ткани соответственно (Вт/м·^{0}С).

Данные краевые условия соответствуют краевым условиям четвертого рода.

Решения находим операционным методом преобразования Лапласа.

Витебский государственный технологический университет

Дифференциальные уравнения теплопроводности для одномерного потока тепла в двухслойной пластине имеют вид [97]:

$$\frac{\partial T_1(x,\tau)}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 T_1(x,\tau)}{\partial x^2}; \tag{5.5}$$

$$\frac{\partial T_2(x,\tau)}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 T_2(x,\tau)}{\partial x^2}, \tag{5.6}$$

где $\frac{\partial T}{\partial \tau}$ – температурное поле;

a_1 и a_2 – коэффициенты температуропроводности основы и клеевой пленки соответственно ($м^2/с$).

В результате решения системы дифференциальных уравнений получим формулу для расчета длительности прогрева материала до заданной температуры (5.7):

$$T_ц = T_c - \left(T_c \times \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\left(\frac{-e^{\sqrt{\mu_i/a_1}R_1}\lambda_1}{\sqrt{a_1}} + \frac{e^{\sqrt{\mu_i/a_1}R_1+2\sqrt{\mu_i/a_2}R_2}\lambda_1}{\sqrt{a_1}} - \frac{e^{\sqrt{\mu_i/a_2}R_2}\lambda_2}{\sqrt{a_2}} + \frac{e^{2\sqrt{\mu_i/a_1}R_1+\sqrt{\mu_i/a_2}R_2}\lambda_2}{\sqrt{a_2}} \right)}{\mu_i \left(\left(\frac{R_1}{\sqrt{\mu_i a_1}} + \frac{R_2}{\sqrt{\mu_i a_2}} \right) \left(\frac{\lambda_1}{\sqrt{a_1}} + \frac{\lambda_2}{\sqrt{a_2}} \right) \left(e^{2\sqrt{\mu_i/a_1}R_1+2\sqrt{\mu_i/a_2}R_2} - 1 \right) + \frac{R_2}{\sqrt{\mu_i a_2}} \left(\frac{\lambda_1}{\sqrt{a_1}} - \frac{\lambda_2}{\sqrt{a_2}} \right) \left(e^{2\sqrt{\mu_i/a_2}R_2} - 1 \right) \right)} \right) \tag{5.7}$$

где μ_n – корни характеристического уравнения.

5.1.1 Расчет изменения температуры дуплексных текстильных материалов

Для расчета изменения температуры дуплексных текстильных материалов в качестве образцов используем материалы с различными видами полотен основы:

образец А – дуплексный материал, состоящий из льняной декоративной ткани и бумажной основы;

образец В – дуплексный материал, состоящий из льняной декоративной ткани и флизелиновой основы.

Термические коэффициенты льняной ткани, бумаги и флизелина [91, 92].

• Коэффициент теплопроводности (λ):

- для бумаги – 0,14 Вт/м·^{0}С;
- для флизелина – 0,13 Вт/м·^{0}С;

Витебский государственный технологический университет

- для ткани – 0,04 Вт/м·^{0}С.

• Теплоемкость (C):

- для бумаги – 1,34 КДж/кг·^{0}С;
- для флизелина – 1,42 КДж/кг·^{0}С;
- для ткани – 1,63 КДж/кг·^{0}С.

Коэффициент температуропроводности (a) определяется по формуле

$$a = \frac{\lambda}{C\gamma}, \tag{5.8}$$

где λ – коэффициент теплопроводности слоя дуплексного материала, Вт/м·^{0}С;

C – теплоемкость слоя дуплексного материала, Дж/кг·^{0}С;

γ – плотность слоя дуплексного материала, кг/м^3.

Плотность и толщина слоев образцов дуплексного материала определялись экспериментально и составили:

• Плотность (γ):

- для бумаги – 0,465·10^3 кг/м^3;
- для флизелина – 0,378·10^3 кг/м^3;
- для ткани – 1,05·10^3 кг/м^3.

• Толщина (R):

- для бумаги – 172×10^{-6} *м*;
- для флизелина – 172×10^{-6} *м*;
- для ткани – 140×10^{-5} *м*.

Таким образом, рассчитанные по формуле (5.8) значения коэффициента температуропроводности (a) следующие:

- для бумаги – 0,225·м^2/с;
- для флизелина – 0,242·м^2/с;
- для ткани – 0,185·м^2/с.

Так как теплообмен между слоями текстильных настенных покрытий происходит по закону Ньютона, то температура на границе соприкосновений ткани и основы $\frac{x}{R_1} = 0$ определялась как [97]

$$\mu_n = n + (n+1)/Bi, \tag{5.9}$$

где $Bi = \frac{\alpha R_1}{\lambda_1}$ – критерий Био, характеризующий связь между полем температур в слоях дуплексного материала и условиями теплоотдачи на поверхности [97];

λ_1 – коэффициент теплоотдачи волокна, Вт/м·^{0}С;

Витебский государственный технологический университет

$n = \frac{\gamma_ь \cdot c_ь \cdot R_ь}{\gamma_T \cdot c_T \cdot R_T}$ – коэффициент, характеризующий отношения теплофизических свойств слоев дуплексного материала [97].

Уравнение (5.9) позволяет определить значение корня μ_n, предварительно рассчитав значение критерия Био. Но вычислить критерий Био по классическому уравнению сложно, поэтому корень μ_n уравнения (5.7) был установлен с помощью графической зависимости , приведенной в [97, табл. 6.1].

При отделке дуплексных материалов с тканым покрытием с помощью каландров происходит очень интенсивное наружное нагревание, поэтому температура поверхности слоев дуплексного материала, соприкасаемого с каландрами, мгновенно становится равной температуре отделки.

Таким образом, распределение температур в слоях зависит от их теплопроводности и геометрических размеров, то есть от условий внутри слоев (внутренняя задача). Исходя их этого $\frac{1}{\alpha} \to 0$, $\alpha \to \infty$ и $Bi = \frac{\alpha R}{\lambda} \to \infty$ [98].

В соответствии с данными [97, с. 193, табл. 6.1], при $Bi \to \infty$ корень μ_n характеристического уравнения (5.7) равен 1,5708.

Для расчета изменения температуры в зависимости от длительности каландрирования была использована формула 5.7. В результате определена длительность прогревания дуплексных материалов с тканым покрытием до 120 ^oC, температуры, необходимой для придания дуплексным материалам специфических свойств. Графики изменения температуры представлены на рисунках 5.4 – 5.5.

При анализе графических зависимостей длительности отделки дуплексных материалов от температуры каландров установлено, что нагрев до 120 ^oC происходит за 0,051 с – 0,054 с.

У каландров различного диаметра длительность контакта с дуплексным материалом различна (рисунок 5.6).

Исходя из определенной длительности контакта дуплексных материалов с поверхностью каландров, составляющей 0,051 с – 0,054 с, температуры нагревающей поверхности 120 ^oC, скорости вращения каландров 30 м/мин установлено, что для процесса отделки дуплексных материалов с тканым покрытием необходимы каландры диаметром 450 мм.

Витебский государственный технологический университет

Рисунок 5.4 – График изменения температуры дуплексного материала, состоящего из льняной ткани и бумажной основы

Рисунок 5.5 – График изменения температуры дуплексного материала, состоящего из льняной ткани и флизелиновой основы.

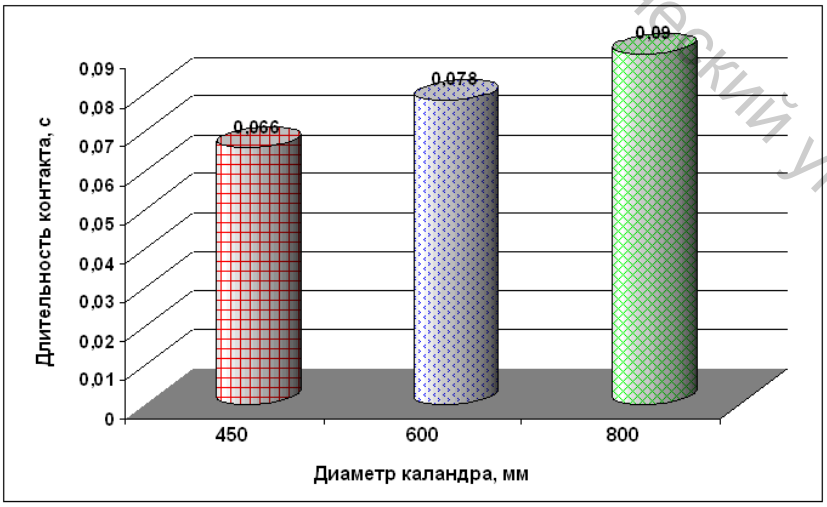


Рисунок 5.6 – Зависимость длительности контакта дуплексных материалов с каландрами от диаметра каландров

Витебский государственный технологический университет

5.2 Термообработка композиционных текстильных материалов с волокнистым наполнителем, полученных способом горячего прессования

Обязательным технологическим этапом при производстве синтетических волокнистых плит мягких является их формирование методом горячего прессования.

Условия проведения процесса термообработки (продолжительность, температура) влияют на структуру и свойства композиционных текстильных материалов с волокнистым наполнителем (синтетических волокнистых плит). Потому для выработки практических рекомендаций по определению рациональных режимов работы прессовального оборудования и возможности интенсификации режимов его работы необходимо установить зависимость между свойствами волокнистых плит и условиями проведения процесса (количественный и качественный состав, теплофизические и физико-механические свойства).

Исследование нестационарной теплопроводности проводились на примере однородных синтетических волокнистых плит, отличающихся по составу.

Синтетическая волокнистая плита, проходя через пресс горячего прессования, нагревается, а выйдя из пресса – охлаждается, при этом температурное поле плиты меняется во времени, то есть нестационарные тепловые процессы. Теплообмен между поверхностями пластины и окружающей средой происходит по закону Ньютона.

В непрерывном технологическом процессе волокнистая плита проходит через пресс горячего прессования в течение заданного времени. Возникает необходимость определить зависимость между температурой и временем термообработки, необходимого для прогревания плиты до определенной температуры и завершения процессов структурообразования полимерной композиции.

Рассмотрим участок волокнистой плиты длиной L и толщиной 2R, который находится в тепловом поле с начальной температурой Tc (рисунок 5.7).

Так как длина плиты L значительно больше ее толщины 2R, то есть $L/2R >> 1$, то ее можно рассматривать как неограниченную пластину, у которой длина бесконечно велика по сравнению с толщиной.

Теплообмен между поверхностями и окружающей средой происходит со всех сторон одинаково, следовательно, температура зависит только от времени τ и толщины 2R (симметричная задача).

Витебский государственный технологический университет

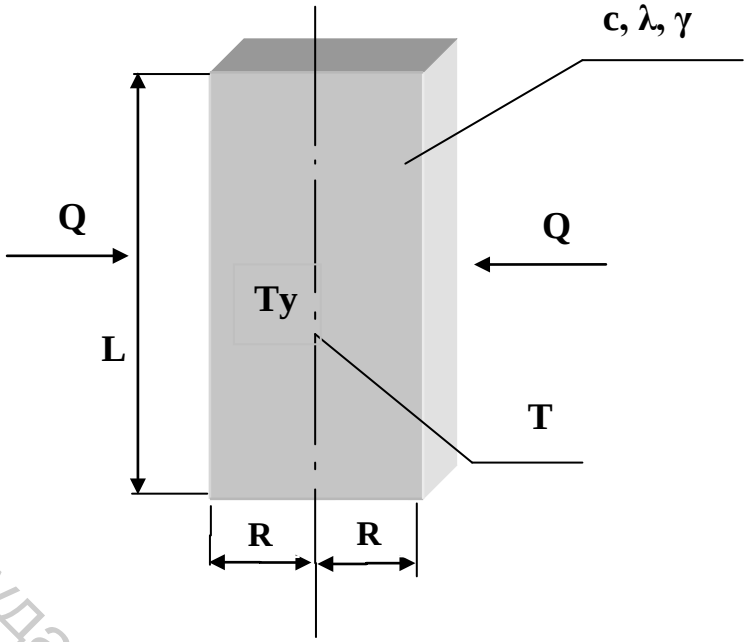


Рисунок 5.7 – Параметры участка синтетической волокнистой плиты

Сформулируем постановку задачи по нагреву пластины в общем виде.

Дана неограниченная пластина, толщина которой 2R при некотором заданном распределении температуры T (x,0) = f(x). В начальный момент времени пластина мгновенно нагревается до некоторой температуры Tc, которая поддерживается постоянной на протяжении всего процесса нагревания. Необходимо найти распределение температуры по толщине пластины.

Дифференциальное уравнение теплопроводности запишется в виде:

$$\frac{\partial T(x,\tau)}{\partial \tau} = a\frac{\partial^2 T(x,\tau)}{\partial x^2}(\tau > 0; -R < x < +R), \qquad (5.10)$$

где $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$ – коэффициент температуропроводности (м^2/с),

$\frac{\partial T}{\partial \tau}$ – температурное поля,

λ – коэффициент теплопроводности (Вт/м*град),

c – удельная теплоемкость (Дж/кг*град),

γ – плотность (кг/м^3).

Краевые условия запишутся в виде:

Витебский государственный технологический университет

$$T(x,0) = f(x) \quad , \tag{5.11}$$

$$T\left(+R,\tau\right) = T_C = const\,, \tag{5.12}$$

$$T\left(-R,\tau\right) = T_C = const\,, \tag{5.13}$$

Поставленную задачу решим операционным методом. Применим преобразование Лапласа к дифференциальному уравнению теплопроводности [97].

В результате решения получим удобную для практических расчетов формулу

$$T\left(0,\tau\right) = T_0 + \left(T_C - T_0\right)1,27\,e^{-1,57\frac{a\tau}{R^2}}\,, \tag{5.14}$$

где $T(0,\tau)$ – температура в центре синтетической волокнистой плиты в момент времени τ, ^{0}C;

T_c – температура пресса, ^{0}C;

T_o – исходная температура плиты, ^{0}C;

a – коэффициент температуропроводности, м^2/с;

R – ½ толщины плиты, м;

τ – продолжительность термообработки, с.

Уравнение (5.14) позволяет для любых композиционных текстильных материалов с волокнистым наполнителем (любого сырьевого состава и толщины) определять:

- продолжительность процесса прессования для завершения процессов структурообразования при заданной температуре пресса;
- температуру прессования, необходимую для полного прогревания плиты и завершения процессов структурообразования.

5.2.1 Расчет изменения температуры при формировании композиционных текстильных материалов с волокнистым наполнителем

В качестве примера проанализируем процесс прогревания синтетической волокнистой плиты плотностью 280 кг/м^3 с различным химическим составом. Термические коэффициенты для синтетической волокнистой плиты представлены ниже.

- Коэффициент теплопроводности:

Нитроновое волокно – 100 % – λ = 0,035 Вт/м*К;

Полиэфирное волокно – 100 % – λ = 0,039 Вт/м*К;

Ковровый кноп (смесь шерстяного, нитронового и капронового волокон) 100 % – λ = 0,037 Вт/м*^{0}С.

- Теплоемкость:

Витебский государственный технологический университет

Нитроновое волокно – С = 1,8 *10^3 Дж/кг*К;

Полиэфирное волокно – С = 1,11 *10^3 Дж/кг*К;

Ковровый кноп (смесь шерстяного, нитронового и капронового волокон) – С = 1,4*10^3 Дж/кг*^{0}С.

Задачу решим для различных двух вариантов синтетических волокнистых плит:

Вариант 1 – Нитроновое волокно – 100 %;

Вариант 2 – Полиэфирное волокно – 100 %.

Таким образом, рассчитанные по формуле (5.8) значения коэффициента температуропроводности следующие:

вариант 1– нитроновое волокно – 100 %: $a = 6{,}9*10^{-8}$ $м^2$/с;

вариант 2 – полиэфирное волокно – 100 %: $a = 1{,}2*10^{-7}$ $м^2$/с.

Графическая интерпретация распределения температуры по толщине плиты в течение 2000 с представлена на рисунке 5.8. Результаты распределения температуры плиты представлены в таблице 5.1 – 5.2.

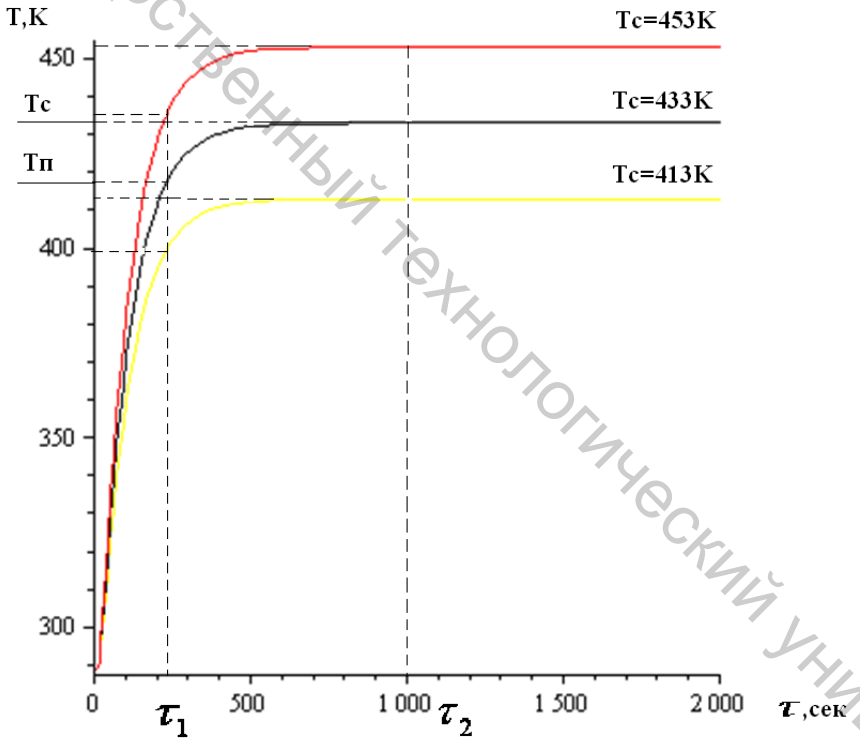


Рисунок 5.8 – Графическая зависимость температуры прогревания центральной части плиты от продолжительности процесса прессования

На полученной графической зависимости можно выделить два характерных участка. В интервале времени от 0 до τ_1 происходит прогревание поверхностного слоя синтетической волокнистой плиты тепловым потоком, верхний слой плиты достигает значения температуры пресса $T_П$. На участке $T_П - T_C$ прогревается вся толщина синтетической волокнистой плиты мягкой. К моменту времени τ_2

Витебский государственный технологический университет

происходит выравнивание температуры пресса с температурой центральной части волокнистой плиты T_C : ($T_П = T_C$).

Таблица 5.1 – Расчетные значения температуры прогревания композиционных текстильных материалов с волокнистым наполнителем (нитроновое волокно 100 %)

Время прогревания, сек	Температура СВП-М, К	Значение температуры, К
1	2	3
Вариант 1 Нитроновое волокно (толщина СВП-М - 18 мм)		
Температура пресса Тп = 413К		
240	Тп	400,72
1000	Тс	412,99
Температура пресса Тп = 433К		
240	Тп	418,74
1000	Тс	433,00
Температура пресса Тп = 453К		
240	Тп	436,76
1000	Тс	453,00
Вариант 2 Нитроновое волокно (толщина СВП-М - 24 мм)		
Температура пресса Тп = 413К		
500	Тп	398,16
1500	Тс	412,87
Температура пресса Тп = 433К		
500	Тп	415,77
1500	Тс	432,85
Температура пресса Тп = 453К		
500	Тп	433,38
1500	Тс	452,83
Вариант 3 Нитроновое волокно (толщина СВП-М - 32 мм)		
Температура пресса Тп = 413К		
500	Тп	385,21
1900	Тс	412,79
Температура пресса Тп = 433К		
500	Тп	400,73
1900	Тс	432,75
Температура пресса Тп = 453К		
240	Тп	416,25
1900	Тс	452,72

Витебский государственный технологический университет

Таблица 5.2 – Расчетные значения температуры прогревания композиционных текстильных материалов с волокнистым наполнителем (полиэфирное волокно 100 %)

Время прогревания, сек	Температура СВП-М, К	Значение температуры, К
1	2	3
Вариант 1 ПЭ (толщина СВП-М - 18 мм)		
Температура пресса Тп = 413К		
240	Тп	403,80
900	Тс	413,00
Температура пресса Тп = 433К		
240	Тп	422,31
900	Тс	433,00
Температура пресса Тп = 453К		
240	Тп	440,83
900	Тс	453,00
Вариант 2 ПЭ (толщина СВП-М - 24 мм)		
Температура пресса Тп = 413К		
500	Тп	408,25
1300	Тс	412,98
Температура пресса Тп=433К		
500	Тп	427,49
1300	Тс	432,98
Температура пресса Тп = 453К		
500	Тп	446,72
1300	Тс	452,98
Вариант 3 ПЭ (толщина СВП-М - 32 мм)		
Температура пресса Тп = 413К		
500	Тп	405,31
1700	Тс	412,99
Температура пресса Тп = 433К		
500	Тп	424,06
1700	Тс	432,99
Температура пресса Тп = 453К		
500	Тп	442,82
1700	Тс	452,99

Анализ полученных теоретических зависимостей распределения температуры по толщине волокнистой плиты позволяет сделать следующие выводы:

Витебский государственный технологический университет

1. С ростом температуры нагревательного элемента прессовального оборудования процесс прогревания композиционных текстильных материалов с волокнистым наполнителем протекает интенсивнее.
2. Время прогревания композиционных текстильных материалов с волокнистым наполнителем зависит от сырьевого состава. Это объясняется различными теплофизическими свойствами синтетических волокон. Кроме того, исследование показало, что время прогрева композиционных текстильных материалов с волокнистым наполнителем увеличивается с повышением толщины материала.

5.2.2 Экспериментальные исследования процесса термообработки композиционных текстильных материалов с волокнистым наполнителем

Экспериментальные исследования проводились установке горячий пресс типа 2ПГ-500 (рисунок 5.9).

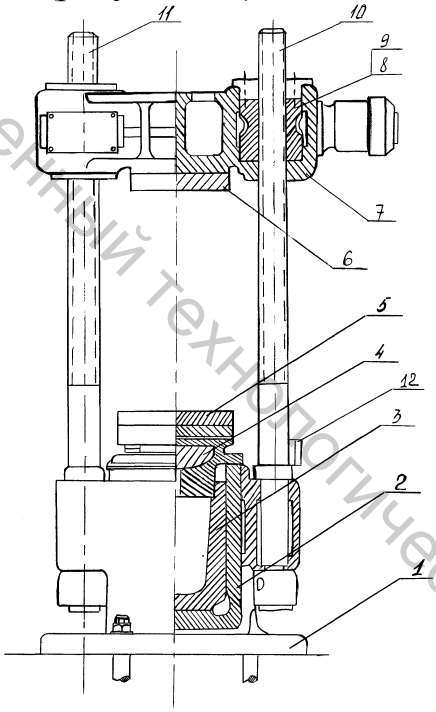


Рисунок 5.9 – Пресс для статических испытаний образцов строительных материалов на сжатие

Пресс типа 2ПГ-500 предназначен для проведения статических испытаний образцов строительных материалов на сжатие с усилием до 500 т. Пресс 2ПГ-500 гидравлический, колонного типа представляет собой раму. Нижняя часть рамы неподвижная и составлена из станины 1, представляющей собой чугунную отливку, на которой монтируются две колонны 14-18, имеющие резьбовую нарезку.

В центральной части станины расположен рабочий цилиндр 4 пресса, в котором помещается плунжер 5.

Витебский государственный технологический университет

Под действием давления масла в цилиндре плунжер перемещается вверх. Ограничение перемещения поршня при сжатии образца вызывает повышение давления масла в системе, что обеспечивает необходимое усилие сжатия. Для устранения боковой составляющей усилия, возникающего при сжатии, плунжер снабжён самоуправляющейся сферической опорой 10, на которой монтируется опорная плита 11 (откатной стол). По нарезке колонны перемещается подвижная часть рамы (подвижная часть траверса) 3, представляющая собой стальную отливку, внутри которой смонтированы червячные колёса-гайки 16-20.

Подвижная траверса имеет механическое перемещение, обеспечивающее установленное перемещение в зависимости от высоты испытуемого образца, которое осуществляется электродвигателем при помощи кнопочной станции 7, с надписями на кнопках «вверх», «вниз», установленной на первой колонне. На нижней части подвижной траверсы смонтирована опорная плита 9.

После установления оптимальных параметров работы оборудования были наработаны опытные образцы композиционных строительных плит.

Условия проведения эксперимента:

– температура пресса устанавливалась по датчику от 140 до 180 ˚С;

– режим работы пресса — установившийся.

Образец размером 500×500 мм помещался в пресс, внутри была зафиксирована термопара. Показания термопары снимались каждые 60 секунд, на рисунке 5.10 представлены графики изменения температуры для композиционных текстильных материалов с волокнистым наполнителем различного сырьевого состава и разных толщин.

Проведены экспериментальные исследования различных составов волокнистых плит: нитрон, полиэфир, шерсть, а также для материалов различной толщины: 18, 24, 32 мм (рисунок 5.10).

Экспериментально установлено время прогревания образцов при различных температурах термообработки: 140, 160, 180 ^{0}С (таблица 5.3).

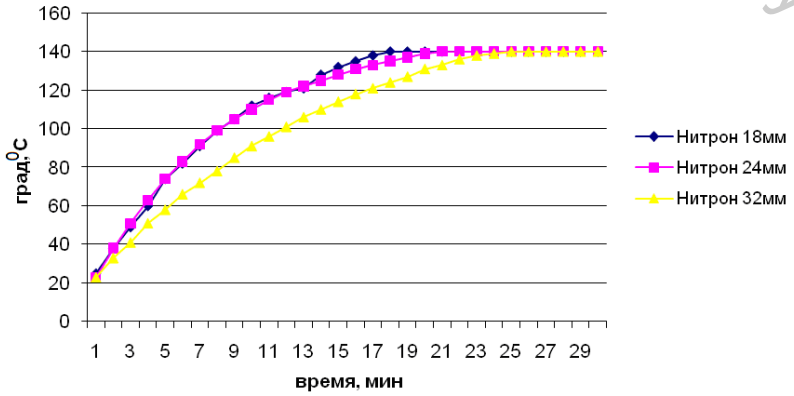


Рисунок 5.10 – Зависимость температуры прогревания композита с волокнистым наполнителем от продолжительности процесса прессования

Витебский государственный технологический университет

Таблица 5.3 – Экспериментальные данные процесса термообработки

Вид СВП-М	Значение температуры, ^{0}С	Время прогревания, мин
Нитроновое волокно 18 мм	140	18
Нитроновое волокно 24 мм	140	21
Нитроновое волокно 32 мм	140	25
Нитроновое волокно 18 мм	160	15
Нитроновое волокно 24 мм	160	24
Нитроновое волокно 32 мм	160	28
Нитроновое волокно 18 мм	180	17
Нитроновое волокно 24 мм	180	26
Нитроновое волокно 32 мм	180	28
Полиэфирное волокно 18 мм	140	17
Полиэфирное волокно 24 мм	140	20
Полиэфирное волокно 32 мм	140	23
Полиэфирное волокно 18 мм	160	14
Полиэфирное волокно 24 мм	160	21
Полиэфирное волокно 32 мм	160	25
Полиэфирное волокно 18 мм	180	20
Полиэфирное волокно 24 мм	180	24
Полиэфирное волокно 32 мм	180	26
Шерстяное волокно 18 мм	140	16
Шерстяное волокно 24 мм	140	19
Шерстяное волокно 32 мм	140	23
Шерстяное волокно 18 мм	160	14
Шерстяное волокно 24 мм	160	22
Шерстяное волокно 32 мм	160	25
Шерстяное волокно 18 мм	180	18
Шерстяное волокно 24 мм	180	23
Шерстяное волокно 32 мм	180	25

Для проведения сравнительного анализа полученных экспериментальных и теоретических зависимостей выбрана синтетическая волокнистая плита толщиной 18 – 24 мм, сырьевой состав: нитрон 100 %: теоретическая зависимость температуры прогревания волокнистой плиты от продолжительности процесса прессования $T(R,\tau) = f(\tau)$ (рисунок 5.11); экспериментальная зависимость температуры прогревания волокнистой плиты от продолжительности процесса прессования $T(R,\tau) = f(\tau)$ (рисунок 5.12).

Витебский государственный технологический университет

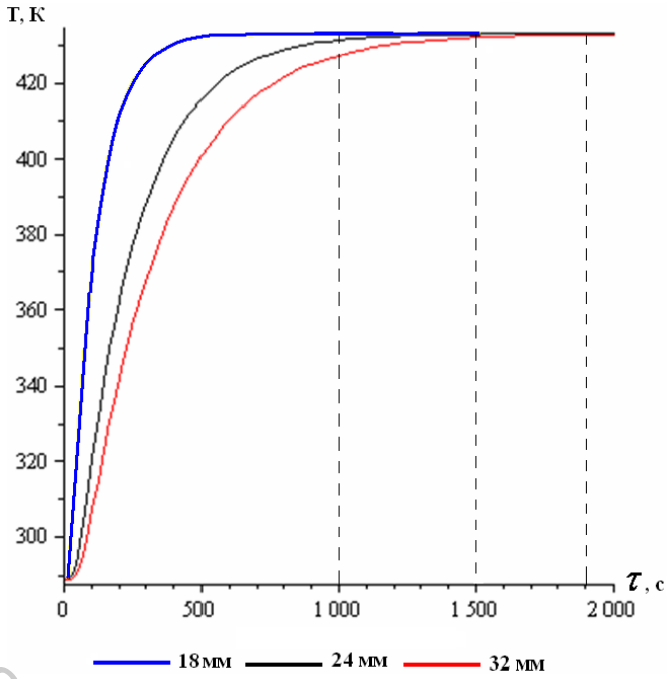


Рисунок 5.11 – Теоретическая зависимость температуры прогревания от продолжительности процесса прессования

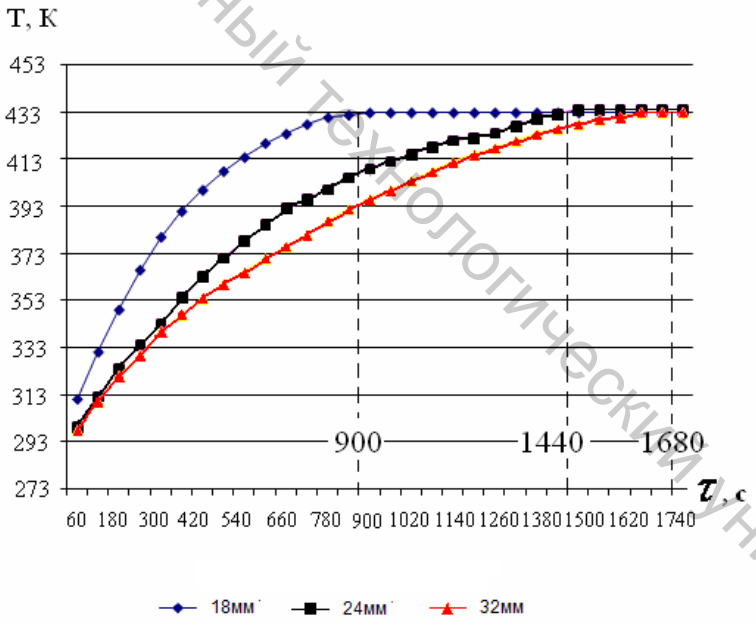


Рисунок 5.12 – Экспериментальная зависимость температуры прогревания от продолжительности процесса прессования

Витебский государственный технологический университет

Экспериментальные данные температуры прессования волокнистой плиты из нитронового волокна, представленные в таблице 5.3, показывают, что центральная часть плиты толщиной 18 мм прогреется до заданной температуры в течение 15 – 17 минут. Оптимальная продолжительность процесса прессования для полного прогревания материала, полученная экспериментально, равна 15 минут. Для волокнистой плиты толщиной 24 мм расчетное значение температуры прессования равно 25 минут, экспериментальное – 24 минуты. Для волокнистой плиты толщиной 32 мм расчетное значение температуры прессования равно 28 – 30 минут, экспериментальное – 28 минут.

Сравнительный анализ результатов теоретического расчета и экспериментальных исследований подтверждают возможность использования формулы (5.14) для исследования процесса термообработки композиционных текстильных материалов с волокнистым наполнителем (таблица 5.4).

Таблица 5.4 – Сравнительные данные между теоретическими расчетами и экспериментальными значениями температуры прогревания волокнистых плит

Вид СВП-М	Время прогревания определенное теоретически, мин	Время прогревания определенное экспериментально, мин	Погрешность расчета, %
Нитроновое волокно, 18 мм	18	15-17	5,51
Нитроновое волокно, 24 мм	24	24-25	4,16
Нитроновое волокно, 32 мм	28	28-30	3,57

5.3 Сушка композиционных текстильных материалов

Цель сушки − удаление влаги из материала при формировании текстильных композитов. Для процесса удаления влаги из композиционного текстильного материала возможно использовать конвективную сушку с внешним обдувом поверхности материала.

При конвективной сушке после прогрева волокнистого верхнего слоя, влага через его поверхность перемещается в окружающий воздух, который является теплоносителем и одновременно сорбентом влаги.

Витебский государственный технологический университет

Воздействие тепловой энергии на композиционный текстильный материал вызывает тепло- и массообменные процессы между ним и окружающим воздушным слоем. Разность температур определяет перенос теплоты от теплоносителя к поверхности влажного тела в ходе теплоотдачи, то есть происходит теплообмен, при котором количество теплоты, передаваемое за промежуток времени $\Delta\tau$ при теплоотдаче, можно записать в следующем виде [97]:

$$\Delta Q = Q \cdot \Delta\tau = \alpha(t_B - t_П)F\Delta\tau, \qquad (5.15)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Дж/(м^{2}с·К);

$(t_B - t_П)$ – движущая сила теплоотдачи, равная разности температур между теплоносителем и поверхностью влажного тела, К;

F – площадь поверхности влажного тела, м^2.

Поток влаги, вызванный различием влагопотенциалов паров влаги у поверхности влажного тела и в объеме воздуха, рассчитывается по формуле

$$M = \beta(П_П - П_B), \qquad (5.16)$$

из формулы (5.16) определяется формула количества паров влаги, кг, передаваемого массоотдачей за промежуток времени $\Delta\tau$:

$$\Delta M = \beta F(П_П - П_B)\Delta\tau, \qquad (5.17)$$

где β – коэффициент массоотдачи, кг/(м^{2}с ед. П);

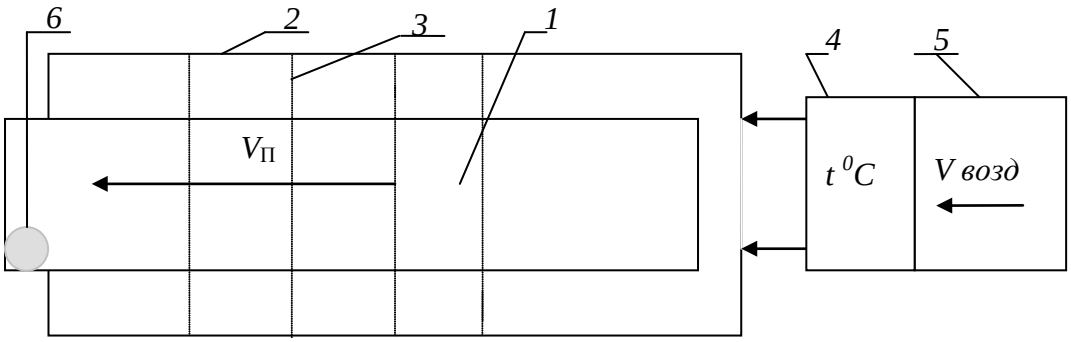
$(П_П - П_B)$ – движущая сила массотдачи, равная разности влагопотенциалов паров влаги у поверхности тела и в объеме воздуха.

Основной технологической задачей при анализе процесса сушки композиционных текстильных материалов является определение температуры и продолжительности теплового воздействия на материал.

На рисунке 5.13 представлена принципиальная схема сушильной установки.

Текстильный композит, попадая в сушильную камеру 1 со скоростью $V_П$, подвергается воздействию теплового потока 3, создаваемого нагревательными элементами с заданной температурой 4. При соприкосновении влажного материала с нагретым воздухом жидкость на поверхности испаряется и путем диффузии покидает поверхность материала, переходя в окружающую среду. Испарение влаги с поверхности материала создает перепад влагосодержания между последующими слоями и поверхностным слоем, что вызывает обусловленное перемещение влаги из низлежащих слоев к поверхностным.

Витебский государственный технологический университет



1 – камера сушки;
2 – нагревательный элемент;
3 – тепловой поток;
4 – блок нагревательных элементов;
5 – вентилятор;
6 – отсос воздуха

Рисунок 5.13 – Схема сушильной установки

Дополнительный эффект создается принудительной конвекцией от вентилятора 5 к пневмоотсосу воздуха 6. В таблице 5.5 представлены основные технологические параметры конвективной сушки, рекомендованные для рулонных материалов [99].

Таблица 5.5 – Режимы сушки

Материал	Температура, °С	Влажность, %	Скорость, м/с
Флизелин	80-120	5-10	1,2
Бумага	80-140	5-8	1,2
Ткань льняная	95-120	5-8	1,2

В непрерывном технологическом процессе получения композиционного текстильного материала полотно проходит через сушильную установку в течение заданного времени, причем длительность процесса сушки взаимосвязана с температурой сушильного агента. При недостаточном температурном воздействии материал останется сырой, что недопустимо в данном технологическом процессе; при слишком интенсивном тепловом воздействии может произойти изменение цвета покрытия, подплавление волокон основы или покрытия. В таблице 5.6 представлены тепловые свойства полотен основы и волокон [91].

Таблица 5.6 – Показатели теплостойкости

Вид материала	Температура, ˚С			
	размягчения	плавления	снижения прочности	воспламенения
Ткань льняная	-	-	150	350
Бумага 90 г/м^2	-	-	-	400
Флизелин	-	-	140	500

Витебский государственный технологический университет

Нитроновое волокно	230	-	180	530
Полиэфирное волокно	230	250	160	560

5.3.1 Анализ процесса сушки композиционных текстильных материалов

В условиях опытно-экспериментальной лаборатории кафедры ПНХВ на лабораторном стенде, представляющем собой конвективную сушку (аналог промышленных сушильных установок), был поставлен ряд экспериментов по исследованию процесса сушки композиционных текстильных материалов.

Условия проведения эксперимента:

– температура воздуха в сушильной камере по датчику 140 ˚С;

– режим работы сушильной установки — установившийся.

Образец (рисунок 5.14) размером 150×10 мм помещался в сушильную установку, послойно были зафиксированы термопары 1 – основа, 2 – клеевой слой, 3 – волокнистый слой.

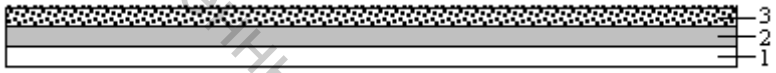


Рисунок 5.14 – Образец и зафиксированные термопары

Показания термопар снимались каждые 10 секунд, на рисунке 5.15 представлены графики изменения температуры.

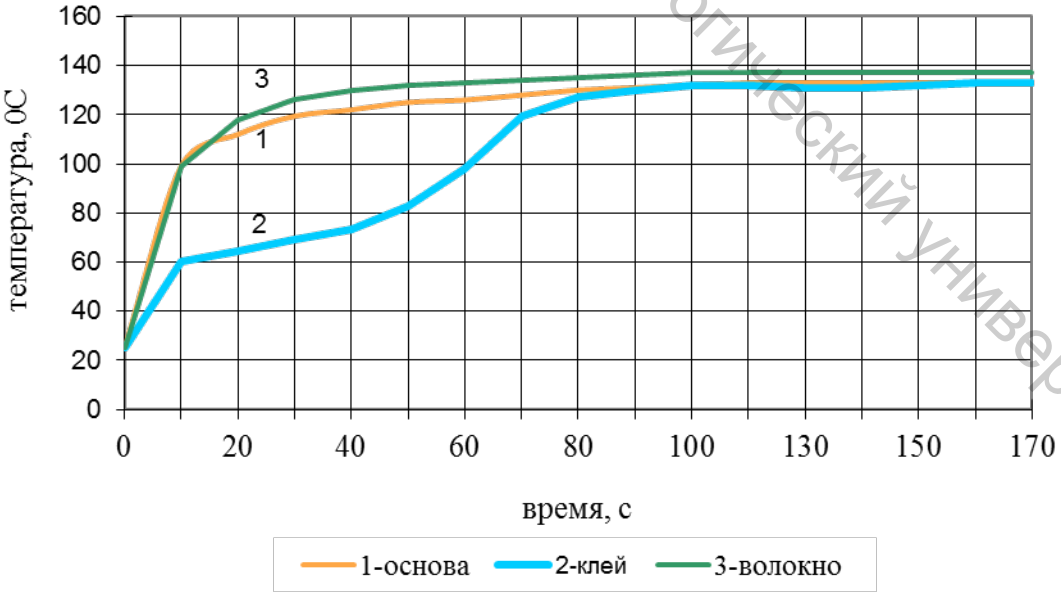


Рисунок 5.15 – Изменение температуры слоев многослойного материала в период сушки пакета

Витебский государственный технологический университет

Длительность процесса сушки можно разделить на три периода. Первый из них, продолжительностью t_0, представляет собой период прогрева. Первый период заканчивается в момент, когда скорость сушки $\frac{dW}{dt}$ достигает постоянного значения, а влагосодержание начинает снижаться по линейному закону. Период постоянной скорости сушки, длительность которого t_1, протекает при неизменных потоках подводимой теплоты к материалу и отводимых от него паров влаги. В этом периоде влага из материала перемещается к его поверхности в виде жидкой фазы, а затем с поверхности материала влага испаряется и в виде паров отводится в воздух. Подводимая к материалу теплота расходуется на испарение влаги, поэтому в этот период влажный материал не прогревается и его температура поддерживается неизменной.

На рисунках 5.16 и 5.17 показаны кривая сушки $W(t)$ и кривая скорости сушки $\frac{dW}{dt} = f(t)$.

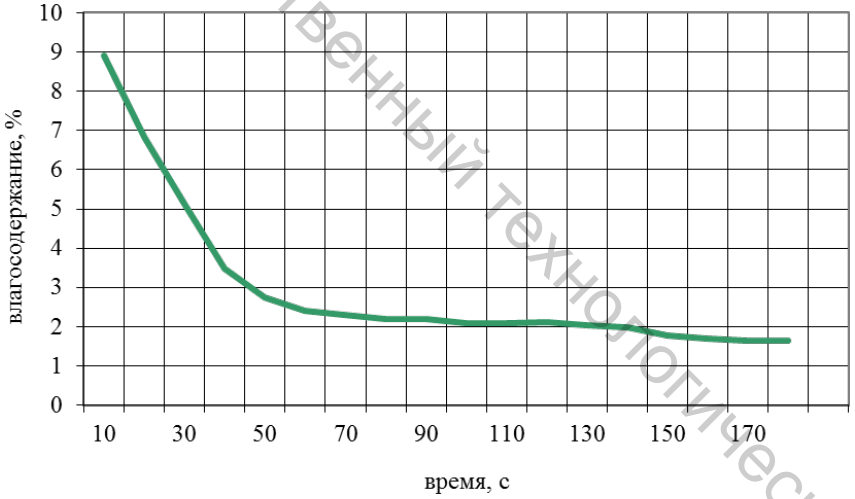


Рисунок 5.16 – Изменение влагосодержания пакета материала

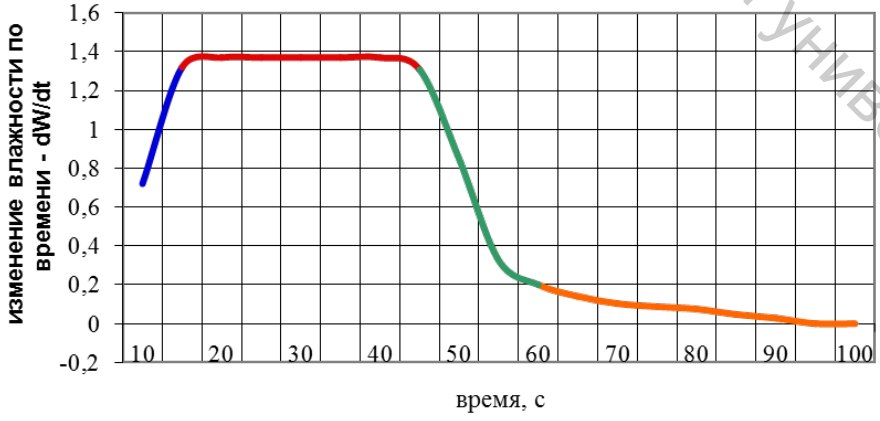


Рисунок 5.17 – Кривая скорости сушки $\frac{dW}{dt} = f(t)$

Витебский государственный технологический университет

После того как влагосодержание материала достигнет некоторого значения, называемого критическим $W_{КР}$, скорость сушки начинает снижаться. Этот период является вторым периодом сушки или периодом падающей скорости сушки. Период падающей скорости сушки протекает при уменьшающихся потоках теплоты и паров влаги. Снижение потоков происходит из-за уменьшения влагосодержания. В этом периоде подводимая теплота расходуется в двух направлениях: одна часть, распространяясь теплопроводностью, прогревает влажное тело, другая ─ идет на испарение влаги.

Для расчета кривой сушки пакета материала воспользуемся приближенным методом [100], основанным на замене реальной кривой скорости сушки $\frac{dW}{dt} = f(W)$ ее упрощенной идеализированной моделью. Кривую скорости сушки построили с помощью зависимостей $W = f(t)$ и $\frac{dW}{dt} = f(t)$, исключая время. На рисунке 5.18 представлена кривая скорости сушки $\frac{dW}{dt} = f(W)$.

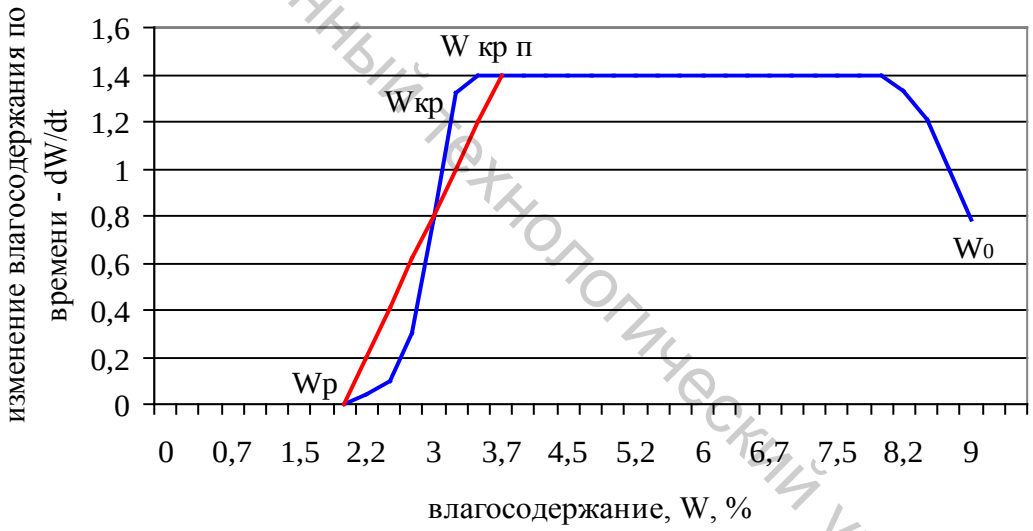


Рисунок 5.18 – Кривая скорости сушки $\frac{dW}{dt} = f(W)$

Согласно методике при построении идеализированной модели кривой скорости сушки, участок, соответствующий периоду падающей скорости сушки, заменим отрезком прямой, проходящей через точку, соответствующую состоянию равновесия ($W = W_{Р}$, $dW/dt = 0$). Для построения идеализированной модели использовался метод наименьших квадратов. Кривая скорости сушки была задана в виде линейной функции, общий вид которой $y = a_0 + kx$. Уравнение отрезка

Витебский государственный технологический университет

прямой, проходящей через точки с координатами ($W = Wp$, $dW/dt = 0$) и ($W = W_{КРП}$, $dW/dt = N$), принимает вид:

$$\frac{dW}{dt} = -N\frac{W - W_P}{W_{КРП} - W_P}. \qquad (5.18)$$

Интегрируя уравнение (5.18) для второго периода сушки, при начальных условиях $t = 0$ и $W = W_{КРП}$, получим:

$$\frac{W - W_P}{W_{КРП} - W_P} = e^{-Kt} \equiv e^{-\chi Nt}, \qquad (5.19)$$

где K – постоянный коэффициент сушки;

χ – относительный коэффициент сушки, 1/%.

$$K = \frac{N}{W_{КРП} - W_P}; \qquad (5.20)$$

$$\chi = \frac{1}{W_{КРП} - W_P}. \qquad (5.21)$$

По уравнению 5.19 находим продолжительность сушки во втором периоде:

$$t_{2'} = \frac{1}{\chi N}\ln\frac{W_{КРП} - W_P}{W_{КР} - W_P}. \qquad (5.22)$$

Продолжительность сушки t_1 в периоде постоянной скорости сушки определяется по формуле

$$t_1 = \frac{(W_0 - W_{КРП})}{N}, \qquad (5.23)$$

а общая продолжительность сушки ($t = t_1 + t_{2'}$) определяется по формуле:

$$t = \frac{1}{N}\left[W_0 - W_{КРП} + \frac{1}{\chi}\ln\frac{W_{КРП} - W_P}{W_{КР} - W_P}\right]. \qquad (5.24)$$

При заданной скорости движения полотна, используя формулу 5.24, можно определить количество рабочих секций сушильной установки на линии для формирования рулонных материалов. В таблице 5.7 представлены расчетные данные.

Витебский государственный технологический университет

Таблица 5.7 – Расчетные и экспериментальные данные процесса сушки

Параметр	Обозначение	Единицы измерения	Значение расчетное	Значение экспериментальное
Начальное влагосодержание	W_0	%	-	9
Критическое влагосодержание	$W_{КР}$	%	-	3,25
Критическое приведенное влагосодержание	$W_{КПР}$	%	-	3,5
Равновесное влагосодержание	$W_Р$	%	-	2
Постоянный коэффициент сушки	K	-	1,25	-
Относительный коэффициент сушки	χ	1/%	0,67	-
Продолжительность сушки в периоде постоянной скорости	$t1$	мин	2,93	3,0
Продолжительность сушки во втором периоде	$t2'$	мин	0,097	0,1
Продолжительность сушки	t	мин	3,074	3,1
Скорость сушки	N	%/мин	1,88	2

Витебский государственный технологический университет

6 ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Современные тенденции развития технологии производства текстильных композиционных материалов таковы, что экстенсивный путь интенсификации технологических процессов, основанный на количественном росте параметров обработки (повышении температуры, давления, концентрации реагентов и т. д.) давно исчерпал себя, так как приводит к нежелательным изменениям структуры волокнистых материалов и ухудшению их потребительских свойств. Это вызывает необходимость разработки таких методов обработки, которые наряду с ускорением физико-химических процессов обеспечивали бы сохранение и улучшение свойств текстильных материалов, способствовали бы снижению экологической вредности производства. С этих позиций заслуживают внимания способы интенсификации технологических процессов, которые базируются на применении нетрадиционных видов энергоносителей, в частности, электромагнитных волн. Радиоволны высокочастотного (ВЧ) и сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона применяют для диэлектрического нагрева в разнообразных операциях тепловлажностной обработки текстильных материалов.

В силу своих специфических особенностей диэлектрический нагрев, включающий в себя ВЧ и СВЧ (микроволновый) способы нагрева, позволяет интенсифицировать тепло-массообменные и диффузионные процессы в условиях тепловлажностной обработки текстильных материалов. При этом, как правило, достигается улучшение физико-механических свойств волокнистых материалов вследствие благотворного воздействия электромагнитного излучения на структуру волокнообразующего полимера. Возможности диэлектрического нагрева как метода интенсификации достаточно широки, что делает его практически универсальным методом повышения эффективности технологических процессов, основанных на тепловой обработке влажных волокнистых материалов.

Технологический процесс ВЧ нагрева материалов осуществляется переменным электрическим полем, создаваемым пластинами конденсатора. К конденсатору подводится напряжение от высокочастотного генератора. Отметим, что для диэлектрического нагрева серийно выпускаются ВЧ генераторы мощностью от 1 до 160 КВт с частотой в диапазоне 13 – 81 МГц [89]. Это соответствует метровому диапазону длин волн. Большинство выпускаемых ВЧ генераторов, которые предназначены для промышленного ВЧ нагрева, работают на частоте 13,56 МГц.

Для промышленного СВЧ нагрева выделены частоты 915 МГц и 2450 МГц [101]. В качестве источников большой мощности в диапазоне СВЧ широко используются электровакуумные приборы – магнетроны и

Витебский государственный технологический университет

клистроны. Промышленность выпускает ряд СВЧ источников на частотах 2450 МГц, 2375 МГц и 915 МГц мощностью 2,5 – 50 КВт [102, 103].

Для обоснования режима диэлектрического нагрева необходимо определить параметры ведения процесса: скорость нагрева, желаемое изменение влагосодержания, начальную и конечную температуру материала. Для этого необходимо знать диэлектрические характеристики материала и его компонентов, теплоемкость, структуру, форму и обрабатываемых материалов. Важным является правильный выбор рабочей частоты. Рабочая частота должна обеспечивать требуемую интенсивность нагрева, которая задается технологическим процессом, равномерное распределение напряжения по всей длине электродов конденсатора, возможность согласования параметров нагрузки с параметрами источника питания и работы при максимальном КПД установки.

Особенности физической природы диэлектрического способа нагрева обусловливают ряд его важных преимуществ по сравнению с традиционными способами нагрева материалов от внешних источников тепла.

Равномерность. Обычно передача тепла осуществляется за счет конвекции, теплопроводности и излучения. Отсюда неизбежен температурный градиент от периферии к центру материала. Уменьшить или почти устранить большой градиент температур можно только за счет увеличения времени обработки. Во многих случаях только за счет медленного и длительного нагрева удается избежать перегрева поверхности слоев обрабатываемого материала. Примерами таких процессов является термообработка текстильных изделий с большим поперечным сечением и высокой плотностью. Диэлектрический нагрев можно рассматривать как нагрев внутренними источниками тепла и при определенных условиях (равномерность электрического поля и однородность диэлектрических свойств материала) он обеспечивает практически равномерный нагрев материалов по всему объему.

Интенсивность. 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.

Избирательность. Основана на зависимости диэлектрических потерь в нагреваемом материале от длины волны. При этом в многокомпонентной системе (например, многослойные текстильные материалы) будут нагреваться только части, где высокий $\mathrm{tg}\delta$.

Саморегулируемость. При нагреве материалов, содержащих жидкую фазу, например, воду, с уменьшением влажности в процессе обезвоживания диэлектрические потери уменьшаются, а нагрев продолжается только в тех участках обрабатываемого материала, где

Витебский государственный технологический университет

еще сохранилась повышенная влажность. Это исключает опасность местного перегрева материала, поскольку нагрев высушенных мест автоматически прекращается.

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

Таким образом, отмеченные преимущества диэлектрического (ВЧ, СВЧ) способа нагрева материалов создают предпосылки для разработки прогрессивных высокоэффективных технологических процессов формирования композиционных текстильных материалов из натуральных и химических волокон.

6.1 Диэлектрический способ нагрева при формировании композиционных текстильных материалов

По своим электрофизическим свойствам текстильные материалы относятся к диэлектрикам, поэтому уместно рассмотреть поведение диэлектрических материалов в электрическом поле. Если диэлектрик поместить в переменное электрическое поле, то в нем разовьются поляризационные процессы, обусловленные смещением под воздействием поля электрических зарядов и связанных с ним молекул и более крупных структурных единиц. Различают два вида поляризации: упругая – при сильной связи между молекулами и релаксационная – при слабой связи. К упругой поляризации относят электронную, атомную и ионную. Такая поляризация следует практически мгновенно за изменением электрического поля, при этом фазовое смещение между векторами электрической индукции и напряженностью практически отсутствует и диэлектрические потери не возникают. Наиболее часто встречающимся видом релаксационной поляризации является дипольная поляризация, имеющая место в полярных диэлектриках при слабых связях между молекулами. Центры тяжести положительных и отрицательных зарядов у таких молекул не совпадают и образуют диполь. Дипольная поляризация сопровождается принудительной переориентацией диполей по направлению вектора напряженности электрического поля. Полярные молекулы или более крупные структурные единицы вследствие дипольной поляризации приобретают вращательный момент. Под действием момента диполи, ориентируясь в направлении вектора напряженности, совершают колебательное движение в такт пульсации электрического поля. Для перемещения молекул затрачивается энергия, которая из-за наличия межмолекулярного трения выделяется в материале в форме теплоты.

Витебский государственный технологический университет

В расчетах часто используют интегральный показатель, представляющий собой произведение угла диэлектрических потерь $tg\delta$ на диэлектрическую постоянную ε, который называется коэффициентом диэлектрических потерь. Коэффициент потерь для данного диэлектрика не является величиной постоянной, а зависит от частоты изменения напряженности электрического поля и температуры.

Удельная мощность, выделяющаяся в виде теплоты в единице объема диэлектрика, определяется следующим соотношением [104]:

$$Q_{\text{уд}} = 5{,}55 \cdot \varepsilon_{м} \cdot tg\delta \cdot f \cdot E^2 \cdot 10^{-11}, \qquad (6.1)$$

где $Q_{\text{уд}}$ – удельная мощность, Вт/м^3; $\varepsilon_м$ – диэлектрическая постоянная нагреваемого материала; f – частота электрического поля, Гц; $tg\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь; E – напряженность электрического поля, Вт/м.

Таким образом, количество выделяемой энергии в материале в процессе высокочастотного нагрева зависит от частоты электрического поля, квадрата напряженности электрического поля и от диэлектрических свойств материала, характеризуемых величиной диэлектрической проницаемости и углом поглощения энергии.

Из формулы (6.1) следует, что факторами повышения эффективности диэлектрического нагрева являются увеличение частоты и напряженности электрического поля.

Возможности интенсификации процесса за счет увеличения напряженности поля E практически исчерпаны, напряженность ограничивается электрической прочностью обрабатываемого материала. Дальнейшее повышение производительности было достигнуто переходом на сверхвысокочастотный диапазон (СВЧ) от 300 МГц и выше, вплоть до инфракрасной области.

Повышение частоты приводит к увеличению коэффициента потерь, являющийся мнимой частью комплексной диэлектрической проницаемости ε_0 [105]

$$\varepsilon_0 = \frac{4\pi\, d_0\, f \tau\, N}{1 + \tau^2}, \qquad (6.2)$$

где d_0 – статическая ориентационная поляризуемость, м^3; N – число молекул в единице объема; τ – время релаксации, с.

Максимальное значение ε_0 принимает при $f = \frac{1}{\tau}$. При СВЧ-нагреве время релаксации молекул воды $\tau = 10^{-11}$ с и диэлектрические потери в воде достигают максимума при частоте 18 ГГц.

Витебский государственный технологический университет

Величина диэлектрической постоянной с ростом частоты поля монотонно уменьшается. В то же время зависимость тангенса угла диэлектрических потерь носит ярко выраженный экстремальный характер. Величина и положение максимума всегда индивидуально для конкретного материала, а его наличие обусловлено резонансом при совпадении частоты колебаний электрического поля с собственной частотой колебаний молекул [89, 100].

В результате интенсивного объемного нагрева в электромагнитном поле обычно возникают специфические условия, когда масса испаренной влаги превышает массу пара, переносимого к периферии капиллярнопористого тела. Возникающий при этом градиент давления является основным фактором удаления влаги в процессе сушки. Конкурирующим фактором является концентрационная диффузия влаги внутрь тела, так как зачастую реализуются условия, когда влагосодержание вблизи поверхности тела ниже, чем внутри. Если принять во внимание, что в некоторых технологических процессах поле воздействует на тело периодически (меандровая система волноводов или вращающиеся излучатели в камерной сушилке), то представляется крайне важным количественно изучить условия возникновения градиента давления в капиллярнопористом теле и зависимость процесса релаксации давления на конечной стадии процесса сушки, когда в результате общего уменьшения влагосодержания величина поглощаемой энергии уменьшается и процесс сушки «автоматически» приостанавливается [66]. Таким образом, при высокой интенсивности процесса СВЧ-сушки важным этапом исследований является определение оптимальных режимов.

В общем виде поток влаги j может быть представлен выражением

$$j = -j_{ur} - j_{\text{т}\,m} - j \;\; - \alpha^{\text{э}} \rho_{m0} E_{\text{м}} - \alpha^{\text{м}} \rho_0 B_{\text{м}}, \qquad (6.3)$$

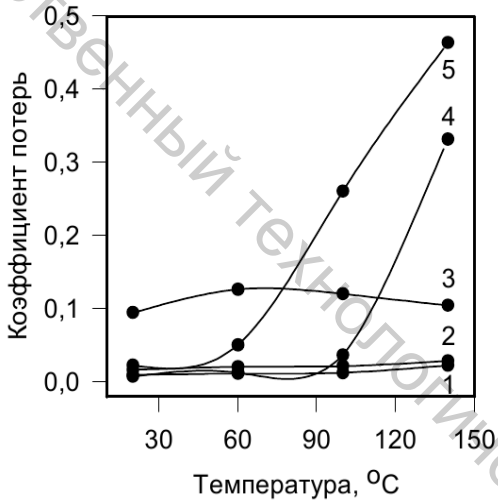
где j_u – поток влаги, обусловленный концентрационной диффузией, м^3; $j_{\text{т}}$ – термодиффузионный поток; j_p – фильтрационный (молярный) поток; j_p – фильтрационный (молярный) поток; $\alpha_m^{\text{э}}, \alpha_m^{\text{м}}$ – коэффициены электро- и магнитодиффузии; ρ_0 – плотность влажного воздуха в порах и капиллярах; $E_{\text{м}}$ – напряженность электрического поля в материале, В; $B_{\text{м}}$ – индукция магнитного поля в материале, Тл.

Применительно к диэлектрическим материалам магнитодиффузией можно пренебречь ввиду слабости взаимодействия с магнитной составляющей поля. В то же время существует практическая необходимость количественно оценить влияние электродиффузии на

Витебский государственный технологический университет

процесс влагопереноса, а также ее зависимости от частоты и напряженности поля [105].

Диэлектрические свойства текстильных материалов в существенной степени зависят от природы волокнообразующего полимера. Так, для полярного полиакрилонитрильного и полиамидного волокон коэффициент диэлектрических потерь на порядок выше по сравнению с неполярным полиэфирным, триацетатным волокнами. Показатель диэлектрических потерь хлопка имеет промежуточное значение по сравнению с указанными группами волокон. Сравнительно более высокий коэффициент диэлектрических потерь у хлопка объясняется более высоким уровнем кондиционной влажности хлопкового волокна по сравнению с полиэфирным и триацетатным волокнами. Различные диэлектрические свойства обусловливают, в свою очередь, и неодинаковое поведение текстильных материалов при помещении их в переменное электрическое поле. Зависимость коэффициента диэлектрических потерь различных тканей от температуры дана на рисунке 6.1 [89].



1 – лавсан; 2 – триацетат; 3 – хлопок; 4 – полиакрилонитрил; 5 – полиамид

Рисунок 6.1 – Зависимость коэффициента диэлектрических потерь тканей от температуры

Анализ сушки в поле СВЧ показал, что значение тангенса угла потерь волокнистых материалов при кондиционной влажности близко к нижней границе tgδ полярных диэлектриков и ле жит в пределах 0,02–0,05. Таким образом, волокнистые материалы в воздушно-сухом состоянии характеризуются низким и значениями диэлектрических потерь. Как следствие, малополярные волокна (лавсановое, ацетатное, полипропиленовое), а также жесткоцепные не термопластичные волокна (хлопок, вискоза, шерсть, шелк) в условиях диэлектрического

Витебский государственный технологический университет

нагрева нагреваются слабо. Следовательно, необходимым условием обеспечения эффективного диэлектрического нагрева неполярных текстильных материалов является присутствие в волокнистом материала какого-либо полярного вещества, которое бы нагревалось в электромагнитном поле и за счет теплопередачи обеспечивало бы разогрев самого материала. В процессах сушки и отделки чаще всего в качестве полярного компонента выступает вода. Диэлектрические характеристики воды, полученные при частоте 30 МГц, представлены на рисунке 6.2 [89]. Примечательно, что с увеличением температуры от 0 до $100\,^{o}C$ коэффициент диэлектрических потерь воды возрастает примерно вдвое. Следовательно, с ростом температуры эффективность СВЧ нагрева повышается.

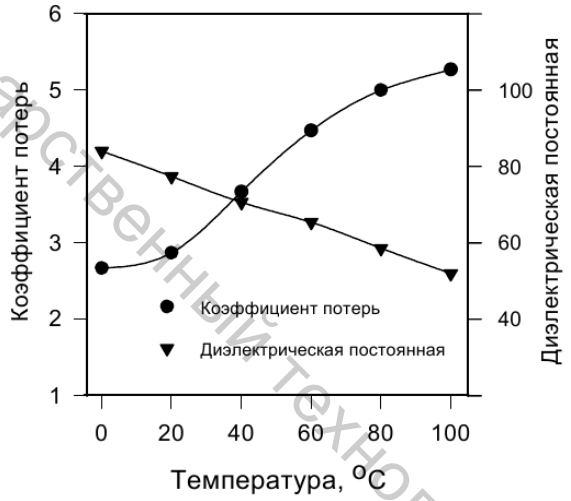


Рисунок 6.2 – Диэлектрические характеристики воды

Так как текстильные материалы содержат в значительном количестве (80–100%) воду [106], то систему "волокнообразующий полимер – вода" можно рассматривать как полярный диэлектрик, электрофизические характеристики которого близки к воде, а теплофизические – к материалу-носителю (то есть волокнистому материалу). Зависимость коэффициента диэлектрических потерь от влажности волокнистого материала проиллюстрирована в таблице 6.1 [89].

Таблица 6.1 – Зависимость фактора диэлектрических потерь волокнистых материалов от влагосодержания

Волокно	**Фактор потерь при содержании воды в тканях, %**			
	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	—	—

Витебский государственный технологический университет

Табличные данные свидетельствуют о том, что при 100 %-ном уровне влажности природа волокнообразующего полимера уже практически не влияет на диэлектрические свойства текстильных материалов, а коэффициент потерь возрастает по сравнению с обезвоженными тканями (0,4 %) примерно в 20 – 100 раз. В результате достигается многократное повышение интенсивности диэлектрического нагрева влажных текстильных материалов.

Присутствие в текстильном материале красителей и аппретирующих веществ также обусловливает возрастание диэлектрических потерь волокна по сравнению с исходной тканью [89], так как эти продукты, являясь дипольными компонентами, увеличивают полярность волокнистого субстрата.

6.2 Зависимость эффективности пропитки волокнистой основы композиционного текстильного материала от параметров СВЧ-обработки

Эффективность процесса пропитки определяется высотой и скоростью капиллярного подъема полимерной композиции. Для определения высоты капиллярного подъема связующего, проведен эксперимент по пропитке текстильного материала из целлюлозных волокон и последующая интенсификация процесса пропитки с помощью электромагнитного излучения СВЧ диапазона. В ходе эксперимента варьировались следующие факторы: концентрация связующего в пропитывающем составе, мощность СВЧ излучения, время термообработки. Уровни варьирования факторов представлены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Уровни варьирования факторов

Фактор	Уровни варьирования
Мощность СВЧ, Вт	300, 450, 600
Время, сек	0..180
Концентрация связующего, г/л	100, 200, 300

В ходе проведения эксперимента контролировались следующие параметры: высота пропитки, мм; температура связующего, C^0.

Зависимость высоты от времени с достаточной точностью описывается моделью вида

$$h = \frac{t}{\left(a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2\right)}, \qquad (6.4)$$

Витебский государственный технологический университет

где h – высота подъема связующего, t – время сушки, a_0, a_1, a_2 – регрессионные коэффициенты.

На рисунке 6.3 изображены точки, полученные в результате экспериментов, и график регрессионной функции, коэффициенты которой найдены с использованием системы компьютерной математики Maple. Из графика видно, что выбранный вид модели хорошо соответствует исследуемому процессу и отклонение графика от экспериментальных данных незначительно.

Для описания зависимостей высоты от мощности и высоты от концентрации были выбраны квадратичные модели вида

$$h = \left(a_3 + a_4 \cdot p + a_5 \cdot p^2\right), \tag{6.5}$$

$$h = \left(a_6 + a_7 \cdot c + a_8 \cdot c^2\right), \tag{6.6}$$

где h – высота подъема связующего, p – мощность СВЧ, c – концентрация связующего, a_3 ... a_8 – регрессионные коэффициенты.

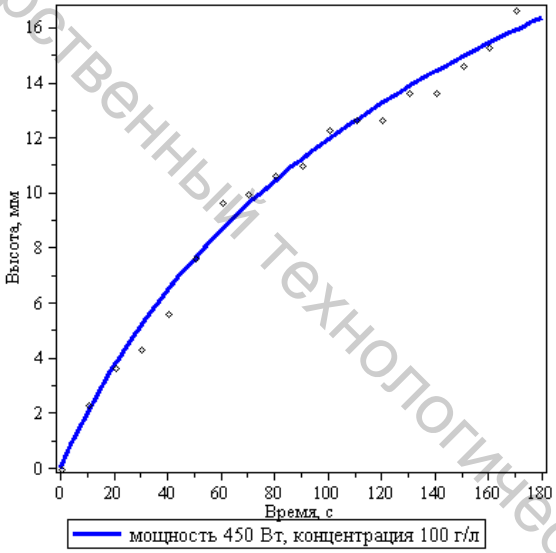


Рисунок 6.3 – Зависимость высоты от времени при концентрации полимерного связующего 100 г/л и мощности СВЧ 450 Вт

На рисунках 6.4 и 6.5 изображены точки, полученные в результате экспериментов, и графики регрессионных функций, коэффициенты которых найдены с использованием системы компьютерной математики Maple. По рисункам видно, что выбранный вид моделей точно описывает исследуемые процессы.

Общая математическая модель процесса пропитки текстильного материала была получена в результате объединения моделей (6.4), (6.5) и (6.6):

Витебский государственный технологический университет

$$h = \frac{t}{\left(a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2\right)} \cdot \left(a_3 + a_4 \cdot p + a_5 \cdot p^2\right) \cdot \left(a_6 + a_7 \cdot c + a_8 \cdot c^2\right), \qquad (6.7)$$

где h – высота подъема связующего, t – время сушки, p – мощность СВЧ, c – концентрация связующего, a_0 ... a_8 – регрессионные коэффициенты.

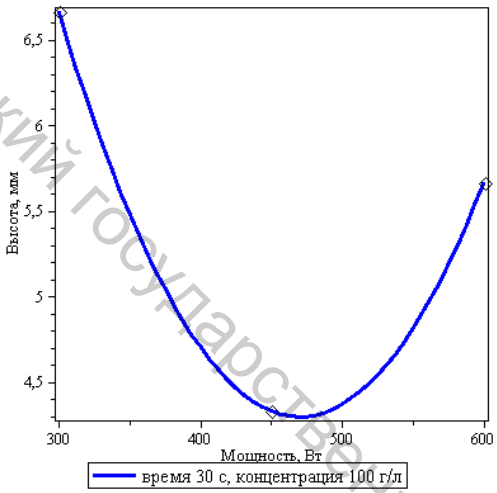


Рисунок 6.4 – Зависимость высоты от мощности при концентрации связующего 100 г/л и времени 30 с

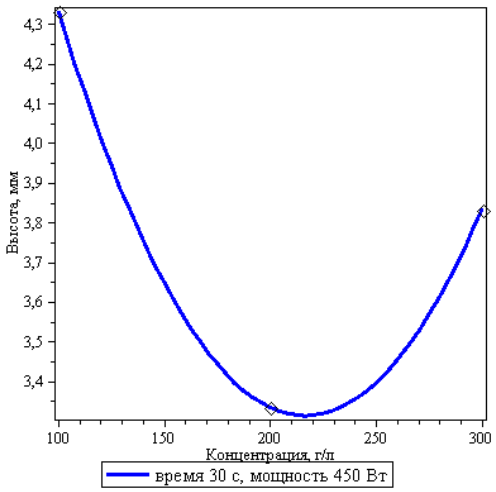


Рисунок 6.5 – Зависимость высоты от концентрации при мощности СВЧ 450 Вт и времени 30 с

В результате определения регрессионных коэффициентов с использованием системы компьютерной математики Maple было получено следующее уравнение:

$$h = \frac{t \cdot \left(94{,}3 + 14{,}4 \cdot p - 0.0150 \cdot p^2\right) \cdot \left(0{,}0000811 - 3{,}99 \cdot 10^{(-7)} \cdot c + 7{,}00 \cdot 10^{(-10)} \cdot c^2\right)}{\left(0{,}687 + 0{,}00401 \cdot t + 0{,}0000176 \cdot t^2\right)} \qquad (6.8)$$

Данное уравнение позволяет определить высоту поднятия связующего при заданных концентрации, мощности СВЧ излучения и времени сушки.

На рисунке 6.6 изображены графики изменения высоты поднятия связующего со временем при различной концентрации полимерной композиции и заданной мощности СВЧ излучения (450 Вт).

Путем дифференцирования формулы (6.8) по времени выведена формула для определения скорости поднятия связующего в заданный момент времени (рисунки 6.8 – 6.10).

Витебский государственный технологический университет

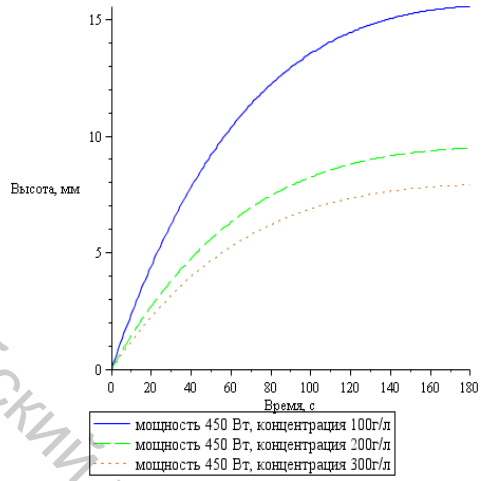


Рисунок 6.6 – Изменение высоты поднятия связующего

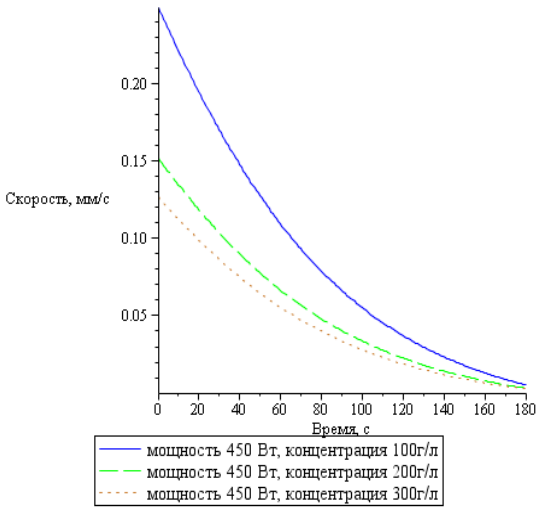


Рисунок 6.7 – Графики изменения скорости поднятия связующего

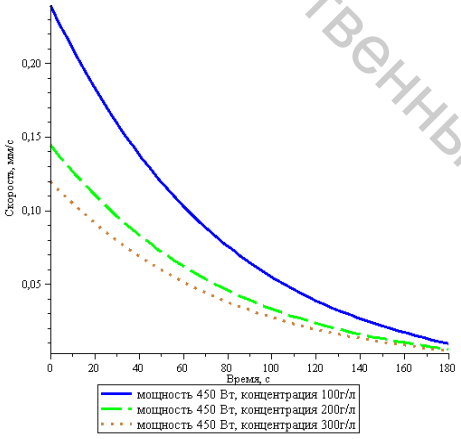


Рисунок 6.8 – Зависимость скорости пропитки от времени

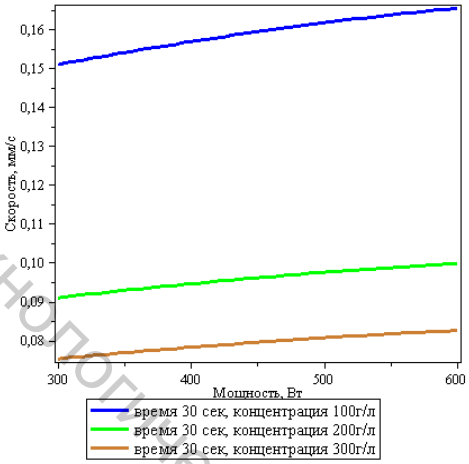


Рисунок 6.9 – Зависимость скорости пропитки от мощности СВЧ

Витебский государственный технологический университет

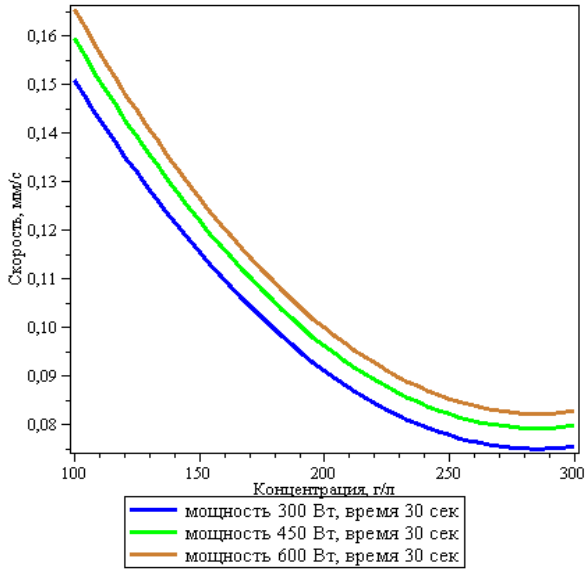


Рисунок 6.10 – Зависимость скорости пропитки от концентрации связующего

6.3 Определение эффективного радиуса капилляров в условиях СВЧ нагрева

Волокнистую систему нельзя рассматривать как простую сумму линейных капилляров с одинаковым поперечным сечением. Капилляры в волокнистых системах существенно отличаются от цилиндрических трубок, обычно принимаемых при выводе основных законов элементарной теории поднятия жидкости в капиллярах. Каналы между волокнами и нитями не имеют круглого сечения, причем площадь сечения по длине одного и того же канала может меняться в широких пределах.

Большинство каналов в волокнистой системе не закрыто с боков и имеет ответвления. Шероховатость стенок капилляров и неодинаковый по длине капилляра диаметр в пористых системах обусловливают возникновение капиллярного гистерезиса, который состоит в том, что при стекании жидкости заполнение капилляров больше, чем при подъеме жидкости. Капиллярный гистерезис является результатом двух явлений: обычного гистерезиса смачивания и гистерезиса формы капилляров. Преобладающее значение той или иной компоненты зависит от условий пропитывания и характера пропитываемой системы.

Кроме того, в процессе взаимодействия ткани с жидкостью может происходить набухание волокна, что приводит к изменению структуры пористого тела и усложняет процесс пропитывания.

Уравнение Пуазейля при установившемся режиме течения жидкости с учетом влияния гидростатического давления объемная скорость течения жидкости через капилляры ткани, мм^3 / с

Витебский государственный технологический университет

$$V = \frac{\pi r_e^4}{8\eta l}\left(\frac{2\sigma \cos\theta)}{r_e} - \rho g l \sin\alpha\right) \qquad (6.9)$$

где V – объемная скорость течения жидкости, м^3/с; r_e – эффективный радиус, м; ρ – плотность жидкости, кг / м^3; l – длина впитывания жидкости в капилляр, м; α – угол наклона капилляра к поверхности жидкости, град.

Уравнение Пуазейля позволяет достаточно точно определять эффективный радиус капилляров ткани.

Для нахождения объемной скорости течения жидкости необходимо знать зависимость объема впитанного аппрета от времени.

Для определения объема впитанного аппрета проведен эксперимент, в ходе которого устанавливалось распределение аппрета внутри материала, определяемое на различной глубине от поверхностного слоя. На каждом слое измерялась площадь распространения аппрета. Глубина проникновения и площадь распространения аппрета изменяется с увеличением мощности и продолжительности СВЧ-обработки. Для ткани из целлюлозных волокон при различных режимах СВЧ-сушки получены модели зависимости площади распространения связующего от глубины проникновения.

Проведен анализ полученных регрессионных моделей зависимости площади распространения аппрета от глубины проникновения.

Для оценки распределения аппрета введен коэффициент пропитки, определяемый из соотношения

$$k_{\text{расп}} = V_0 / V_1, \qquad (6.10)$$

где V_0 – исходный объем аппретирующего раствора, мм^3; V_1 – объем распространения аппрета в материале после обработки, мм^3.

Для изучения влияния режимов СВЧ-обработки на изменение коэффициента пропитки материала $k_{\text{расп}}$ проведен полный факторный эксперимент. В качестве варьируемых факторов выбрана мощность и время СВЧ-излучения (таблица 6.3). Получены статистически значимые линейные математические модели зависимости коэффициента пропитки материала $k_{\text{расп}}$ от варьируемых факторов, графики которых представлены на рисунке 6.11.

$$k_{\text{расп}} = 0{,}122 X_1 - 0{,}118 X_2^2 + 2{,}155 .$$

Для определения зависимости объема впитанного материалом аппрета от времени (рисунки 6.12 – 6.14) вычислялось произведение полученных моделей коэффициента пропитки на объем пропитанного материала.

Витебский государственный технологический университет

Таблица 6.3 – План эксперимента

Уровни проведения эксперимента	Натуральные значения i-го фактора		Кодированные значения i-го фактора	
	X1 (мощность, ВТ)	X2 (время, с)	X1 (мощность, ВТ)	X2 (время, мин)
Основной уровень фактора	450	60	0	0
Интервал варьирования фактора	150	30	1	1
Верхний уровень фактора	600	90	+1	+1
Нижний уровень фактора	300	30	-1	-1

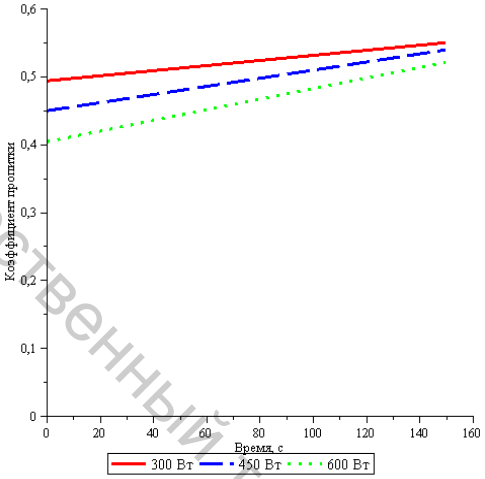


Рисунок 6.11 – Зависимость коэффициента пропитки от времени

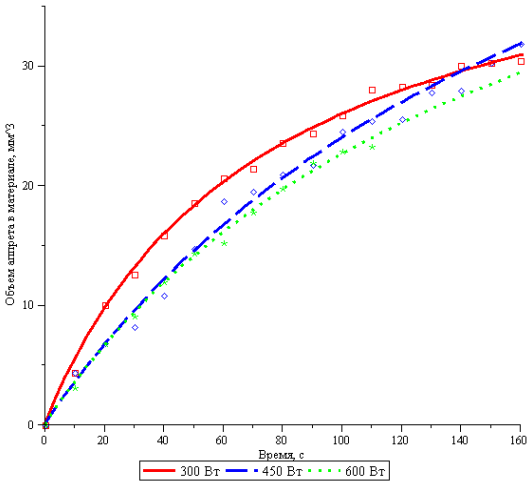


Рисунок 6.12 – Зависимость объема связующего от времени при концентрации 100 г/л

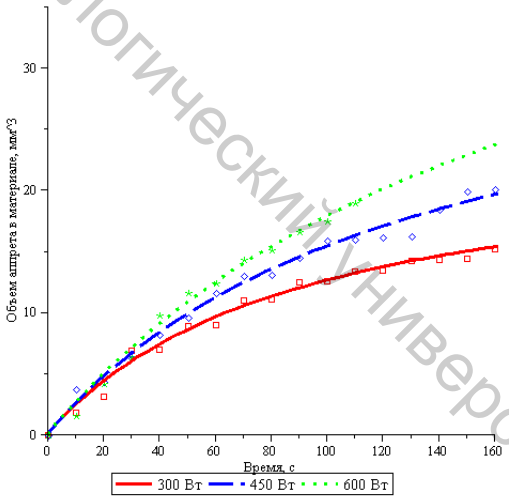


Рисунок 6.13 – Зависимость объема связующего от времени при концентрации 200 г/л

Витебский государственный технологический университет

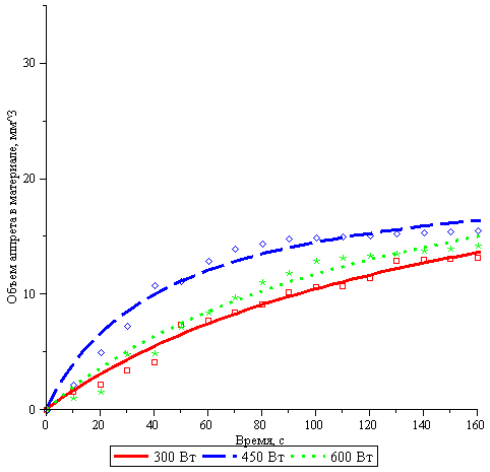


Рисунок 6.14 – Зависимость объема связующего от времени при концентрации 300 г/л

Модель изменения объемной скорости вычислялась как производная по времени модели зависимости объема связующего в материале от времени при различной концентрации. Графики полученных моделей изображены на рисунках 6.15 – 6.17.

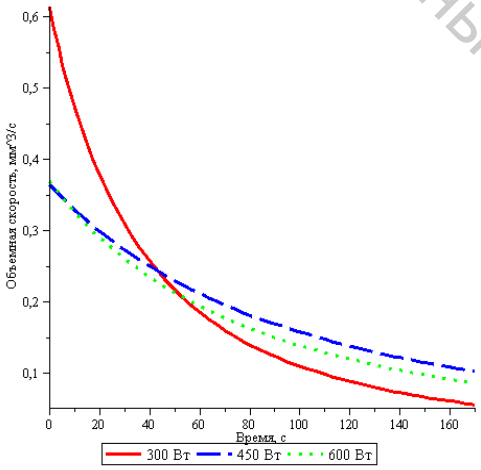


Рисунок 6.15 – Зависимость объемной скорости от времени при концентрации 100 г/л

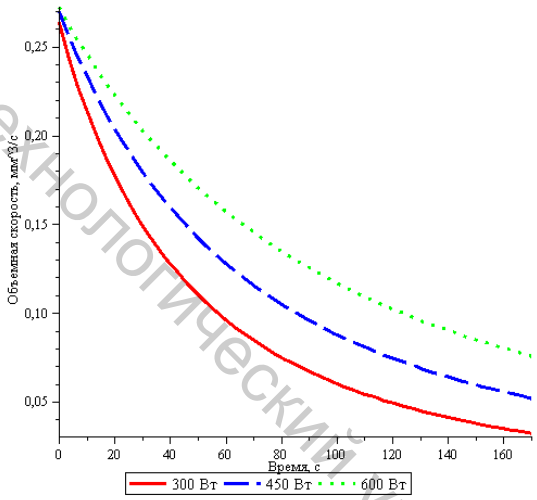


Рисунок 6.16 – Зависимость объемной скорости от времени при концентрации 200 г/л

Витебский государственный технологический университет

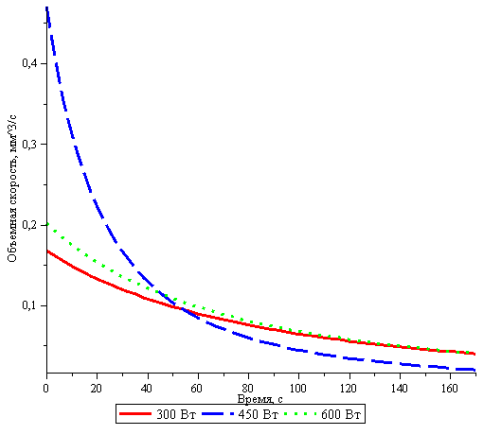


Рисунок 6.17 – Зависимость объемной скорости от времени при концентрации 300 г/л

С использованием математических моделей для объемной скорости, высоты капиллярного подъема, поверхностного натяжения, вязкости, угла смачивания, а также экспериментально установленных значений плотности связующего, из формулы Пуазейля построены математические модели для эффективного радиуса капилляров текстильных материалов в условиях воздействия СВЧ излучения. Графики этих моделей изображены на рисунках 6.18 – 6.20.

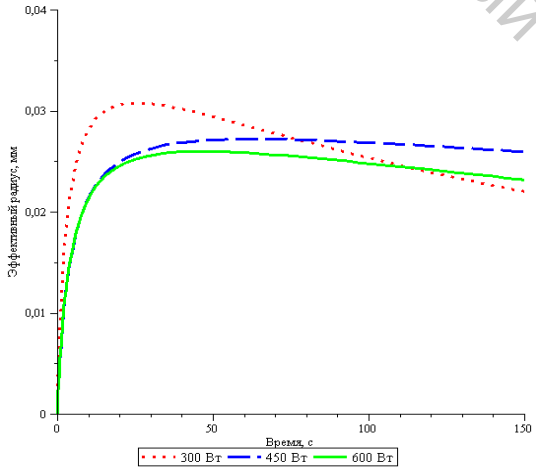


Рисунок 6.18 – Изменение эффективного радиуса капилляров во время сушки при концентрации аппрета 100 г/л

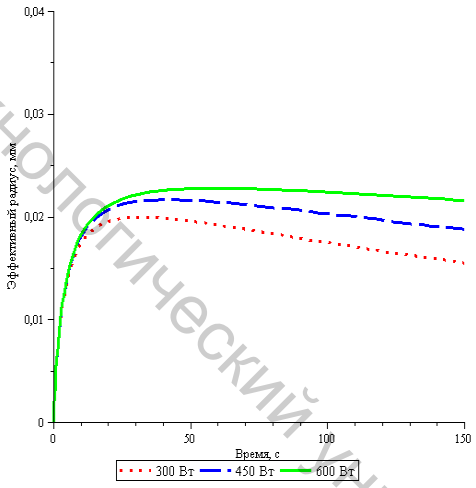


Рисунок 6.19 – Изменение эффективного радиуса капилляров во время сушки при концентрации аппрета 200 г/л

Витебский государственный технологический университет

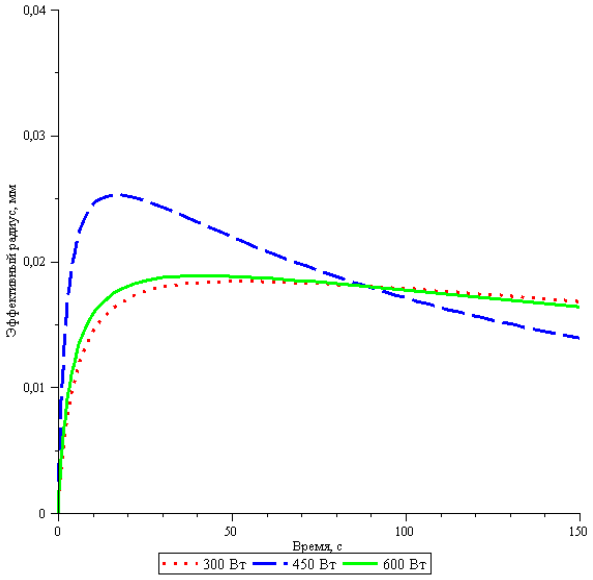


Рисунок 6.20 – Изменение эффективного радиуса капилляров во время сушки при концентрации аппрета 300 г/л

Интенсивное и полное заполнения пористой структуры текстильного материала в процессе пропитки волокнистого материала происходит в первом периоде через 1,5 – 2,0 с после начала СВЧ-обработки [107]. При этом показатель качества пропитки значительно превосходит аналогичный показатель пропитки при применении конвективного нагрева текстильного материала и лишь незначительно уступает показателям при использовании предварительного вакуумирования или запаривания текстильного материла перед аппретированием [107]. На рисунке 6.21 представлен зависимость изменения площади распределения аппрета от глубины материала при СВЧ-нагреве и конвективной обработке.

Процесс пропитки можно условно разделить на два периода, сумма продолжительностей которых определяется из соотношения [108]

$$\tau_{общ} = \tau_1 + \tau_2 , \qquad (6.11)$$

где τ_1 – продолжительность первого периода пропитки, в течение которого заполняются поры и капилляры материала, не содержащие «защемленного» воздуха; τ_2 – продолжительность второго периода, в котором заполняются жидкостью поры, содержащие «защемленный» воздух.

При обработке водой продолжительность первого периода пропитки для тканей составляет $10^{-2}...10^{-3}$ с. Для тканей из целлюлозных волокон, прошедших предварительную щелочную обработку и обладающих хорошей смачиваемостью поверхности, доля пор и капилляров, не содержащих «защемленного» воздуха при пропитке, достигает 95 %. Заполнение порового объема материала в этом случае

Витебский государственный технологический университет

определяется в основном продолжительностью первого периода пропитки в течение 1–2 с [108].

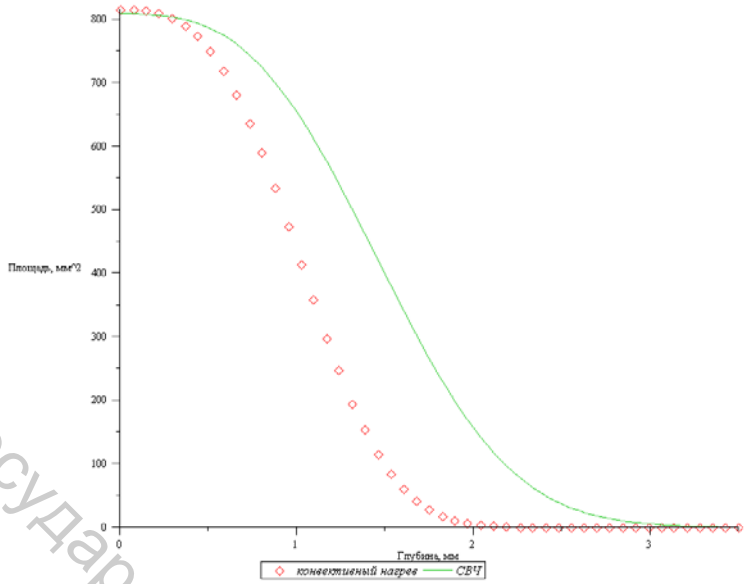


Рисунок 6.21 – Графики зависимости площади распространения связующего от глубины проникновения при различных режимах обработки

Во втором периоде пропитки механизм заполнения порового объема существенно отличается от механизма капиллярного впитывания и основан на одновременно протекающих явлениях растворения «защемленного» воздуха в пропитывающей жидкости и его диффузии через пропитывающую жидкость к поверхности испарения и явлении конденсации паров пропитывающей жидкости на внутренней поверхности поры и ее заполнении конденсатом.

При этом лимитирующей будет продолжительность процесса растворения воздуха в пропитывающей жидкости. При повышении температуры пропитывающей жидкости до 100 ^{0}C продолжительность второго периода сокращается более чем в 7 раз, однако даже в этом случае составляет десятки секунд и даже минут [108]. Следовательно, интенсификация процесса пропитки плохо смачиваемых текстильных материалов только за счет повышения температуры не является эффективной.

Скорость заполнения тупиковых капилляров определяется перепадом давления ΔP [108]:

$$\Delta P = \Delta P_к + P_0 - \left[P_0 h_0 / (h_0 - h) \right] - \rho_ж g h, \qquad (6.12)$$

где P_0 – давление на поверхности пропитывающей жидкости (для случая пропитки при атмосферном давлении $P_{0атм} = P$); $\Delta P_к = -2\sigma_{жг} \cos\theta \; r_k$

Витебский государственный технологический университет

– капиллярное давление; $r_к$ – внутренний радиус канала капилляра; h_0, h – соответственно полная длина капилляра и длина его заполненной части в первом периоде пропитки.

Принимая за степень пропитки отношение $\varphi = h / h_0$ предельную степень пропитки тупикового капилляра φ_∞ в первом периоде из условия равенства давлений защемленного воздуха и внешнего давления в момент установления капиллярного равновесия, то есть при $\Delta P = 0$ [108].

$$\varphi_\infty = h_\infty / h_{0к} = \left(\Delta_0 P + P_{по} - P_к\right) / \left(\Delta_0 P + P\right), \quad (6.13)$$

где $P_{пор}$ – давление в капилляре перед началом пропитки.

Анализируя уравнение (6.13), можно сделать вывод, что для интенсификации процесса пропитки волокнистых материалов необходимо обеспечивать максимальное снижение давления $P_{пор}$ в порах материала на момент начала процесса пропитки [108].

6.4 Выбор рациональных режимов формирования композиционных текстильных материалов в условиях воздействия электромагнитных волн СВЧ и ИК диапазона

При решении обычной задачи оптимизации находится оптимальное значение одного результирующего показателя. Но в нашей задаче нужно найти такие параметры процесса, при которых оптимальными являются несколько результирующих показателей: расход энергии, высота подъема и температура аппретирующей композиции. Для решения этой оптимизационной задачи нужно ввести обобщенную функцию желательности, которая учитывает значения всех результирующих показателей.

$$D = \left(d_1 \times d_1 \times ... \times d_k\right)^{1/k}, \quad (6.14)$$

где d_i – частные функции желательности, k – количество частных функций желательности.

Частные функции желательности d_i определяются путем нормализации результирующих функций Y_i, таким образом, чтобы значения d_i лежали в пределах от 0 до 1, так как результирующие показатели могут иметь различные единицы измерений и диапазоны значений. При этом значению 0 соответствуют наименее, а 1 – наиболее желательные значения функций Y_i.

Оптимальными значения входных параметров будут те значения, при которых достигается максимальное значение обобщенной функции

ВитебскийГосударственныйТехнологическийУниверситет

желательности. В качестве нормализующих функций выбраны функции желательности Дерринжера, которые находятся по формулам (6.15 – 6.17). Графики данных функций представлены на рисунках 6.22 – 6.24.

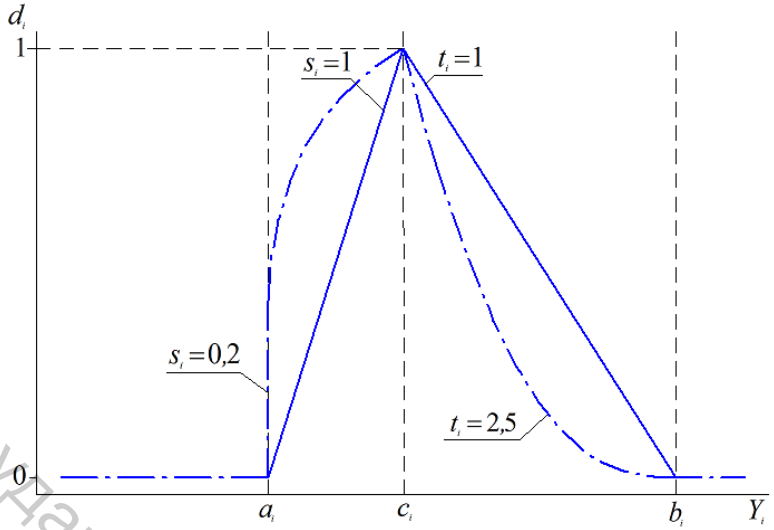


Рисунок 6.22 – График функции желательности для формулы 6.15

$$d_i(Y_i)=\begin{cases}0, & Y_i<a_i\\ \left(\dfrac{Y_i-a_i}{c_i-a_i}\right)^{s_i}, & a_i\le Y_i\le c_i\\ \left(\dfrac{Y_i-b_i}{c_i-b_i}\right)^{t_i}, & c_i<Y_i\le b_i\\ 0, & Y_i>b_i\end{cases} \qquad (6.15)$$

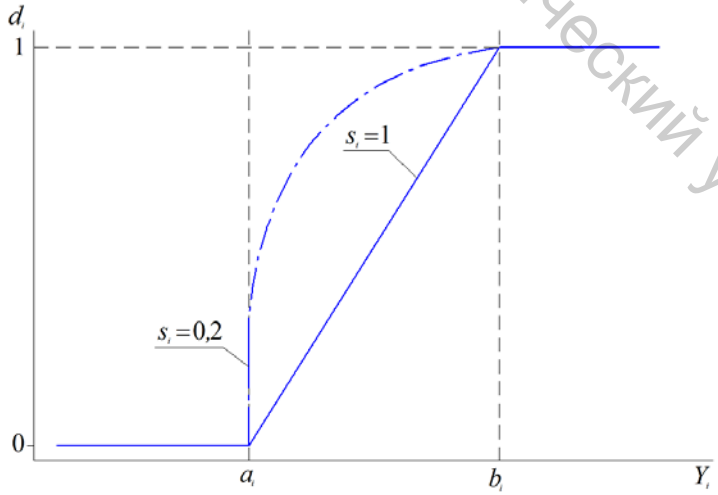


Рисунок 6.23 – График функции желательности для формулы 6.16

Витебский государственный технологический университет

$$d_i(Y_i)=\begin{cases}0, & Y_i < a_i \\ \left(\dfrac{Y_i-a_i}{b_i-a_i}\right)^{s_i}, & a_i \le Y_i \le b_i \\ 1, & Y_i > b_i\end{cases} \qquad (6.16)$$

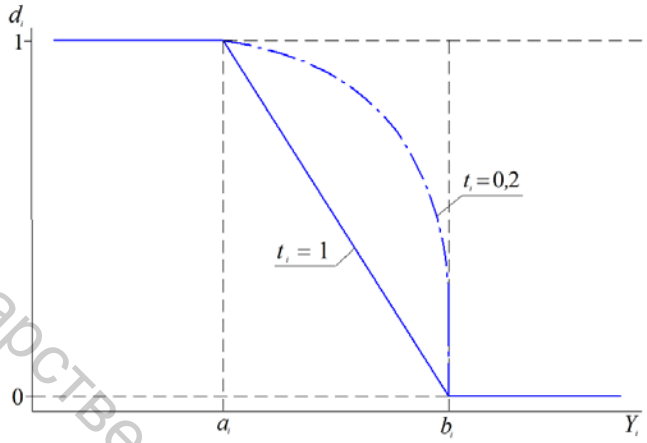


Рисунок 6.24 – График функции желательности для формулы 6.17

$$d_i(Y_i)=\begin{cases}1, & Y_i < a_i \\ \left(\dfrac{Y_i-b_i}{a_i-b_i}\right)^{t_i}, & a_i \le Y_i \le b_i \\ 0, & Y_i > b_i\end{cases} \qquad (6.17)$$

При построении функций желательности d_i используются значения границ интервала желательности a_i, b_i, c_i результирующего показателя, которые определяются с помощью экспертных оценок. Формула (6.15) используется, когда для результирующего показателя существует одно наиболее желательное значение c_i, а значения ниже, чем a_i, и выше, чем b_i, не желательны. В задаче оптимизации процесса пропитки текстильных материалов существует диапазон наиболее желательных температур, который обусловлен физико-химическими свойствами аппретирующей композиции. Поэтому для получения функция желательности температуры T была использована формула (6.15). Используемая аппретирующая композиция имеет рабочий диапазон температур от 20 ^{0}C до 50 ^{0}C. Наилучшие показатели физико-механических свойств аппретирующей композиции достигаются при

Витебский государственный технологический университет

температуре 45 ^{0}C, поэтому такая температура взята в качестве наиболее желательной.

Формула (6.16) используется в случаях, когда для результирующего показателя наиболее желательными являются максимальные значения. При оптимизации процесса пропитки таким показателем является высота поднятия аппретирующей композиции h. В качестве нижней границы диапазона желательности взято значение $h = 0$, а в качестве верхней границы – $h = 70$мм .

Формула (6.17) целесообразно применять, когда для результирующего показателя наиболее желательными являются минимальные значения. При решении задачи оптимизации процесса пропитки в условиях воздействия электромагнитных волн сверхвысокочастотного и инфракрасного диапазонов таким показателем является расход энергии на единицу объема аппретирующей композиции E. В качестве нижней границы диапазона желательности для обоих способов интенсификации процесса взято значение $E = 0$, а в качестве верхней границы – $E = 0{,}5$Дж/мм ^{3} для ИК-способа и $E = 0{,}05$Дж/мм ^{3} для СВЧ-способа.

При определении функций желательности для температуры аппретирующей композиции d_1 по формуле (6.15) использовались регрессионные модели зависимости температуры T от времени t, мощности излучения p и концентрации аппретирующей композиции c, полученные после обработки результатов экспериментов по исследованию процессов пропитки с применением ИК и СВЧ излучения. При проведении экспериментов использовалась аппретирующая композиция трех концентраций: 100 г/л, 200 г/л, 300 г/л; мощность излучения устанавливалась на трех уровнях: 300 Вт, 450 Вт, 600 Вт для СВЧ и 1800 Вт, 2200 Вт, 2600 Вт для ИК. Формула (6.18) является моделью зависимости температуры для ИК-способа, формула (6.19) является моделью зависимости температуры для СВЧ-способа.

$$T = (-0{,}485t + 4{,}99)\cdot(0{,}0176\,p - 27{,}6)\cdot(-3{,}85\cdot 10^{-6}\,c - 0{,}00751) + 19{,}9\,; \quad (6.18)$$

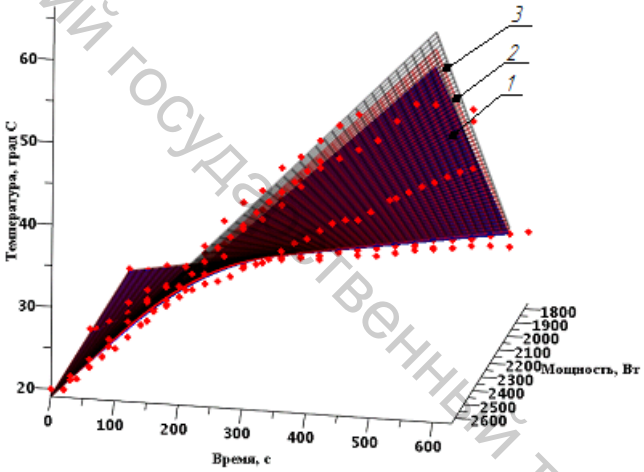
$$T = (0{,}00423t + 0{,}0139)\cdot(0{,}0172\,p + 0{,}476)\cdot(-0{,}02\,c + 32{,}9) + 17{,}6\,. \quad (6.19)$$

Регрессионные коэффициенты функций (6.18) и (6.19) были определены методом наименьших квадратов с использованием системы компьютерной алгебры Maple. Для проверки адекватности регрессионных функций определены коэффициенты детерминации R^2, которые составили 0,99 для ИК и 0,98 для СВЧ. На рисунке 6.25 изображены зависимости температуры аппретирующей композиции от режимов процесса пропитки при воздействии ИК излучения при различных концентрациях аппрета.

Витебский государственный технологический университет

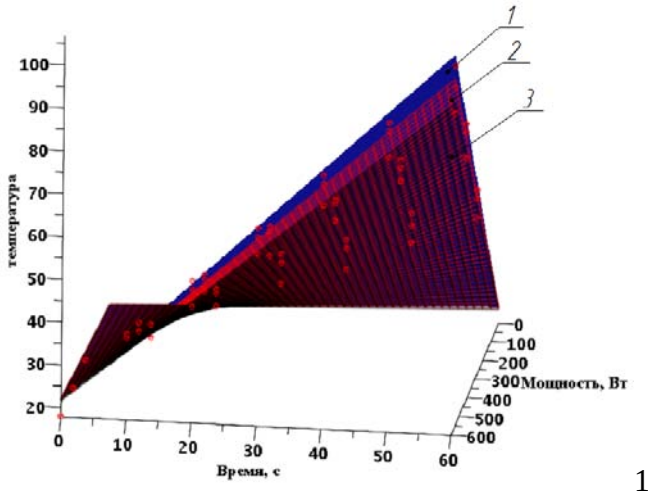
На рисунке 6.26 изображены зависимости температуры аппретирующей композиции от режимов процесса пропитки при воздействии СВЧ излучения при различных концентрациях аппрета.

Сравнив полученные зависимости, можно сделать вывод о том, что концентрация по-разному влияет на температуру аппретирующей композиции для разных способов интенсификации пропитки. Увеличение концентрации композиции при СВЧ-способе приводит к уменьшению максимальной температуры, в то время как для ИК-способа ситуация противоположная. Также графики свидетельствуют о том, что при СВЧ-способе температура растет значительно быстрее, чем при ИК-способе.



1– 100 г/л, 2 – 200 г/л, 3 – 300 г/л

Рисунок 6.25 – Зависимость температуры от режимов пропитки при ИК-способе



1– 100 г/л, 2 – 200 г/л, 3 – 300 г/л

Рисунок 6.26 – Зависимость температуры от режимов пропитки при СВЧ-способе

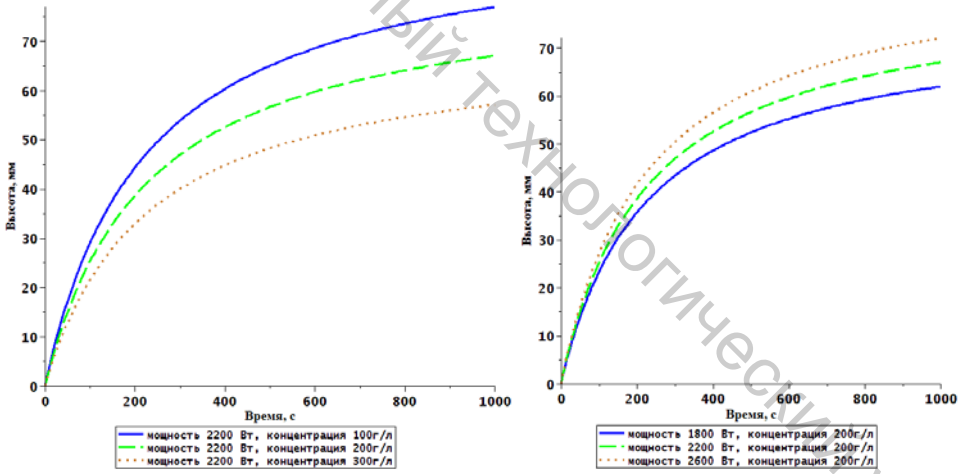
Витебский государственный технологический университет

Формула (6.20) является моделью зависимости высоты для ИК-способа, формула (6.21) является моделью зависимости высоты для СВЧ-способа.

$$h = \frac{t \cdot \left(1{,}09 \cdot 10^{-5}\, p + 0{,}0398\right) \cdot \left(-6{,}92 \cdot 10^{-4}\, c + 0{,}606\right)}{3{,}63 \cdot 10^{-4}\, t + 0{,}082}; \tag{6.20}$$

$$h = \frac{t \cdot c}{\left(0{,}763t + 82{,}5\right) \cdot \left(-0{,}121\, p + 281\right) \cdot \left(7{,}68 \cdot 10^{-5}\, c - 0{,}0255\right)}. \tag{6.21}$$

Регрессионные коэффициенты функций (6.20) и (6.21) были определены методом наименьших квадратов с использованием системы компьютерной алгебры Maple. Для проверки адекватности регрессионных функций определены коэффициенты детерминации R^2, которые составили 0,96 для ИК и 0,97 для СВЧ. На рисунке 6.27 изображены зависимости высоты поднятия аппретирующей композиции от режимов процесса пропитки при воздействии ИК излучения.

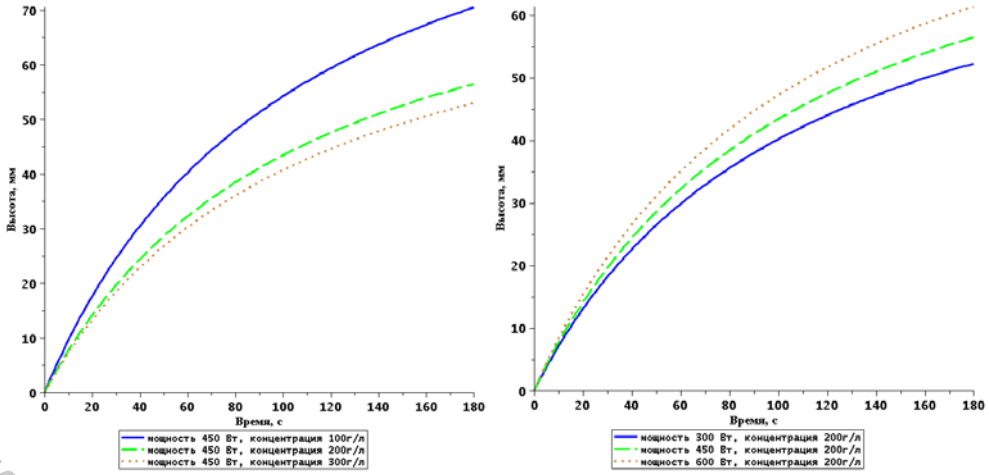


а б

Рисунок 6.27 – Графики высоты поднятия связующего при ИК-способе: а – при различной концентрации, б – при различной мощности излучения

На рисунке 6.28 изображены зависимости высоты поднятия полимерной композиции от режимов процесса пропитки при воздействии СВЧ излучения.

Витебский государственный технологический университет



а б

Рисунок 6.28 – Графики высоты поднятия связующего при СВЧ-способе: а – при различной концентрации, б – при различной мощности излучения

В результате анализа графических зависимостей, представленных на рисунках 6.27 и 6.28, было установлено, что увеличение концентрации полимерной композиции приводит к уменьшению максимальной высоты поднятия аппрета (рисунки 6.27 а и 6.28 а), а увеличение мощности излучения приводит к увеличению максимальной высоты поднятия связующего (рисунки 6.27 б и 6.28 б), для обоих способов интенсификации процесса. Однако для достижения одинаковой высоты поднятия связующего при ИК-способе требуется значительно больше времени, чем при СВЧ-способе.

При использовании ИК-излучения происходит нагрев полимерной композиции по свободной площади поверхности, а при использовании СВЧ излучения нагрев происходит по всему объему полимерной композиции. Эти обстоятельства были учтены при выводе формулы зависимости затраченной энергии от времени и мощности излучения в пересчете на единицу объема полимерной композиции.

Формулы (6.22) и (6.23) являются моделями зависимости затрат энергии на единицу объема полимерной композиции от мощности излучения и времени для ИК- и СВЧ- способов.

$$E = 7{,}018 \cdot 10^{-5} \cdot p \cdot t\,; \qquad (6.22)$$

$$E = 3{,}3 \cdot 10^{-6} \cdot p \cdot t\,. \qquad (6.23)$$

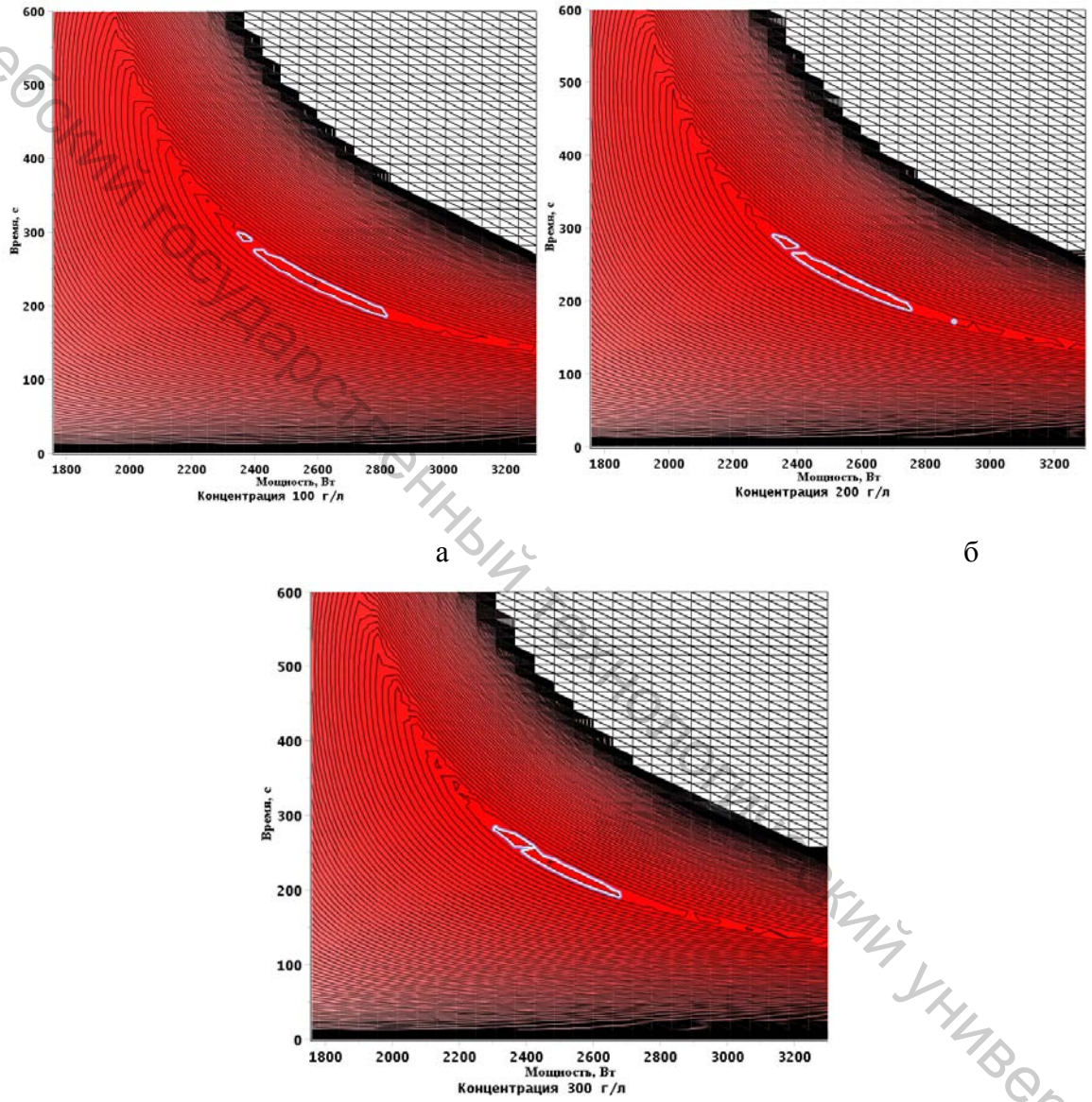
Коэффициенты в моделях (6.22) и (6.23) учитывают мощности установок, рабочие объемы камер и использованные объемы полимерной композиции.

Функции (6.22) и (6.23) были использованы для получения частных функций желательности d_3 для затрат энергии по формуле (6.17).

Витебский государственный технологический университет

Полученные частные функции желательности для температуры d_1, высоты d_2 и энергозатрат d_3 были использованы для получения обобщенных функций желательности D по формуле (6.14) для ИК- и СВЧ-способов интенсификации процесса пропитки.

Контурные диаграммы обобщенной функции желательности для ИК-способа при различных концентрациях связующего представлены на рисунке 6.29.



а б

в

Рисунок 6.29 – Контурные диаграммы для обобщенной функции желательности для ИК-способа интенсификации

На контурных диаграммах отмечены области оптимальных значений мощности излучения и времени воздействия и точки, соответствующие максимальной обобщенной желательности. Для концентраций 100 г/л, 200 г/л и 300 г/л были определены оптимальные

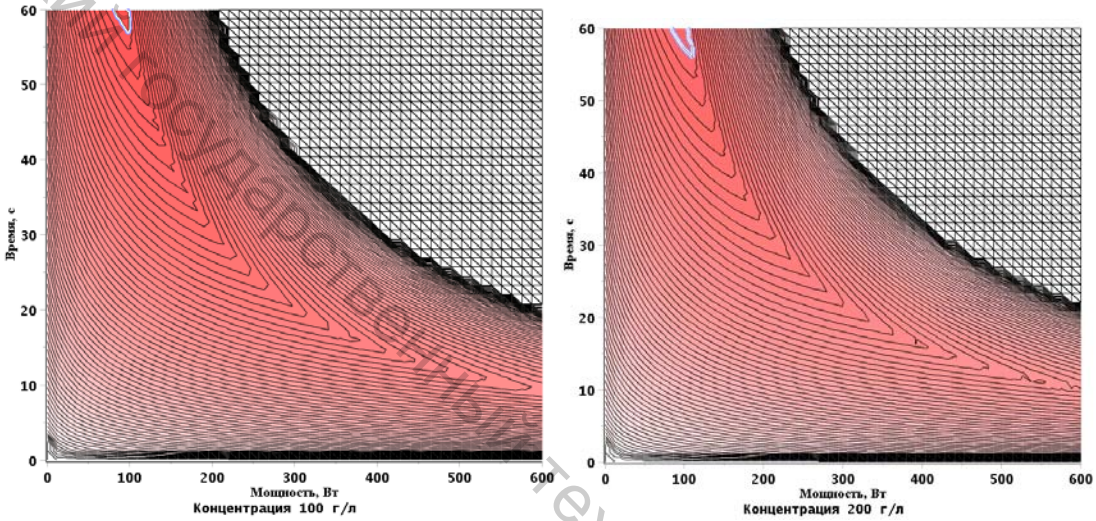
Витебский государственный технологический университет

сочетания мощности и времени воздействия ИК излучения, которые представлены в таблице 6.4.

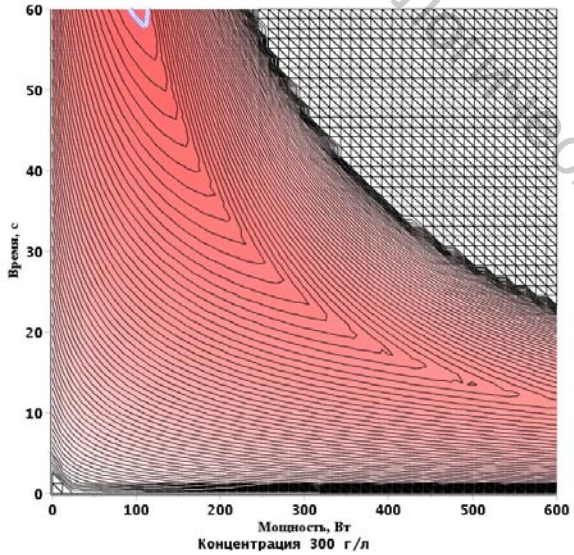
Таблица 6.4 – Оптимальные параметры процесса пропитки

Концентрация, г/л	Оптимальная мощность, Вт	Оптимальное время, сек
100	2593	230
200	2528	234
300	2471	237

Контурные диаграммы обобщенной функции желательности для СВЧ-способа при различных концентрациях аппрета представлены на рисунке 6.30.



а б



в

Рисунок 6.30 – Контурные диаграммы для обобщенной функции желательности для СВЧ-способа интенсификации при различных концентрациях

Витебский государственный технологический университет

Установлено, что обобщенные функции желательности для ИК- и СВЧ- способов интенсификации имеют одинаковый характер и позволяют для выбранной мощности излучения определить оптимальное время воздействия и наоборот. В результате исследования обобщенных функций желательности были получены функции для определения оптимальных комбинаций мощности и времени воздействия для различных концентраций, представленные формулами (6.24) для ИК и (6.25) для СВЧ.

$$t = \frac{1087{,}2}{-7{,}045 + p}, \text{ для концентрации } 100 \text{ г/л};$$

$$t = \frac{1033{,}06}{-7{,}046 + p}, \text{ для концентрации } 200 \text{ г/л}; ; \qquad (6.24)$$

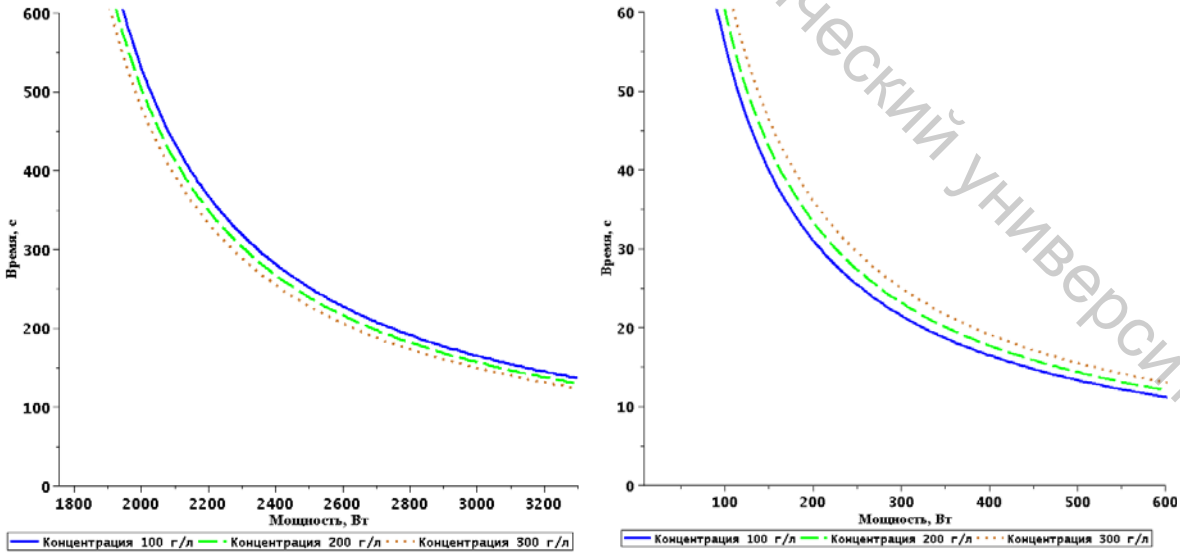
$$t = \frac{984{,}05}{-7{,}047 + p}, \text{ для концентрации } 300 \text{ г/л}.$$

$$t = \frac{6980}{24{,}8 + p}, \text{ для концентрации } 100 \text{ г/л};$$

$$t = \frac{7520}{25{,}1 + p}, \text{ для концентрации } 200 \text{ г/л};$$

$$t = \frac{8130}{25{,}2 + p}, \text{ для концентрации } 300 \text{ г/л}. \qquad (6.25)$$

Графики функций (6.24) и (6.25) представлены на рисунке 6.31.

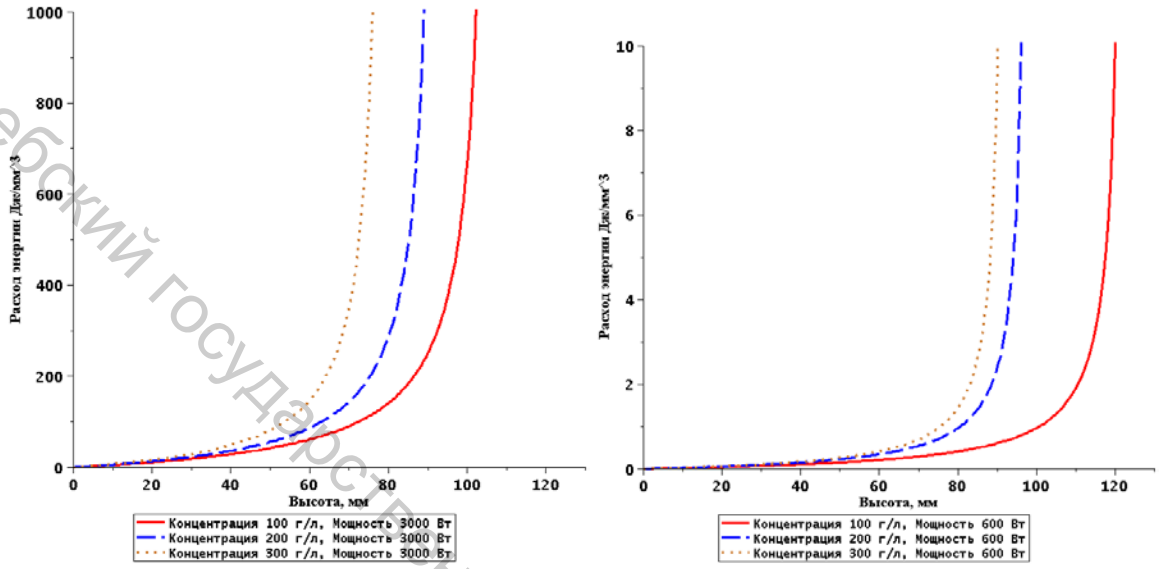


а б

Рисунок 6.31 – Графики оптимальных комбинаций режимных параметров процесса пропитки: а – ИК-способа, б – СВЧ-способа

Витебский государственный технологический университет

Для сравнения энергоэффективности ИК- и СВЧ-способов интенсификации процесса пропитки получены формулы для определения энергозатрат на единицу объема, необходимых для поднятия связующего на заданную высоту. Графики этих зависимостей представлены на рисунке 6.32.



а б

Рисунок 6.32 – Графики зависимостей энергозатрат от высоты поднятия связующего при: а – ИК-способе, б – СВЧ-способе

Анализ рисунка 6.32 позволяет сделать вывод о том, что интенсификация процесса формирования композиционных текстильных материалов с использованием СВЧ излучения позволяет достигать заданной высоты поднятия полимерной композиции (эффективности пропитки) со значительно меньшими энергозатратами и за значительно меньшее время.

6.5 Влияние воздействия электромагнитных волн СВЧ-диапазона на свойства композиционных текстильных материалов

Воздействие диэлектрического нагрева на композиционный текстильный материал не приводит к изменению химических свойств волокнообразующих полимеров, а оказывает влияние только на надмолекулярную структуру материала. Степень воздействия электромагнитной энергии определяется в основном двумя факторами: диэлектрическими свойствами волокна и его влагосодержанием в условиях диэлектрического нагрева. Первый параметр определяет способность поглощать электромагнитную энергию самим полимером. Процесс взаимодействия полярного полимера с электромагнитной

Витебский государственный технологический университет

энергией обусловлен дипольной поляризацией и сопровождается повышением сегментальной подвижности макромолекул, следствием чего может быть разрыв межмолекулярных связей, восстановление их на более выгодном энергетическом уровне и, как следствие, релаксация внутренних напряжений волокна.

Для исследования зависимости свойств текстильных материалов из натуральных и химических волокон от параметров процесса обработки материала с использованием СВЧ нагрева проведен эксперимент, в качестве входных факторов были выбраны:

- X1 – мощность, Вт.
- X2 – продолжительность сушки, мин.

Уровни и интервалы варьирования, входных параметров X1 и X2, представлены в таблице 6.5.

В качестве выходных параметров выбраны следующие качественные показатели текстильных материалов:

– разрывная нагрузка;

– разрывное удлинение;

– усадка;

– капиллярность.

Проведено исследование влияния СВЧ-сушки на изменение физико-механических характеристик льняных и полиамидных тканей поверхностной плотности 120 – 240 г/м^2: разрывной нагрузки, разрывного удлинения, капиллярности и усадки. Проведен полный факторный эксперимент с двумя изменяемыми факторами и тремя уровнями варьирования. В качестве изменяемых факторов выбраны: мощность СВЧ-излучения и время сушки. Для сушки материалов использовалась СВЧ-установка с максимальной мощностью 900 Вт и рабочей частотой 2450 МГц.

Таблица 6.5 – Условия проведения эксперимента

Уровни проведения эксперимента	Натуральные значения i-го фактора		Кодированные значения i-го фактора	
	X1 (мощность, Вт)	X2 (время, мин)	X1 (мощность, Вт)	X2 (время, мин)
Основной уровень фактора	600	3	0	0
Интервал варьирования фактора	300	1	1	1
Верхний уровень фактора	900	4	+1	+1
Нижний уровень фактора	300	2	-1	-1

В таблице 6.6 приведены обобщенные результаты оценки физико-механических свойств, отражающие характер изменений этих показателей относительно значений, полученных при конвективном способе сушки при температуре 150 °С, а также для ткани увлажненной

ВитебскийГосударственныйТехнологическийУниверситет

и высушенной в естественных условиях (в таблице обозначена как «необработанная»). Данные представлены для образцов, которые были увлажнены до относительной влажности 90 % и высушены до равновесного влагосодержания. Как видно, СВЧ-сушка увеличивает показатели капиллярности и усадки для исследованных образцов льняного материала по сравнению с необработанной тканью.

Таблица 6.6 – Обобщенные результаты оценки физико-механических свойств

Показатель	Вид ткани	Необрабо-танная	Конвективная сушка	СВЧ		
				300 Вт	600 Вт	900 Вт
Капиллярность, мм за 60 мин	Лен	12,0	51,0	81,0	63,0	43,0
	Полиамид	161,0	160,0	157,5	152,0	153,0
Усадка, %	Лен	5,0	5,2	8,3	7,7	7,7
	Полиамид	0,1	0,3	2,1	2,5	2,7
Разрывная нагрузка, 0,5 кгС	Лен	83,0	81,0	74,5	66,0	70,0
	Полиамид	185,0	184,6	225,0	214,0	203,0
Разрывное удлинение, мм	Лен	10,8	11,2	18,5	19,0	18,5
	Полиамид	17,5	17,0	21,5	20,5	19,5

На рисунке 6.33 представлены поверхности отклика зависимостей капиллярности (а) и усадки (б) от варьируемых факторов. На поверхности суровых тканей содержатся гидрофобные загрязнения, которые препятствуют проникновению влаги в волокно. Для их удаления обычно используют процесс отварки. В исследуемом процессе увеличение капиллярности по сравнению с образцом, высушенным конвективным способом, можно объяснить частичным разрушением гидрофобных примесей в процессе СВЧ-нагрева, а также эффектом увеличения радиуса капилляров вследствие расклинивающего действия молекул воды при запаривании. Однако увеличение продолжительности СВЧ-обработки и мощности СВЧ-излучения приводит к уменьшению капиллярности образцов льняного материала, вплоть до практически полного исчезновения, что может быть вызвано уменьшением среднего радиуса капилляров. В.С. Побединский объясняет подобный эффект явлением дипольной поляризации, сопровождающимся более четкой ориентацией звеньев макромолекул.

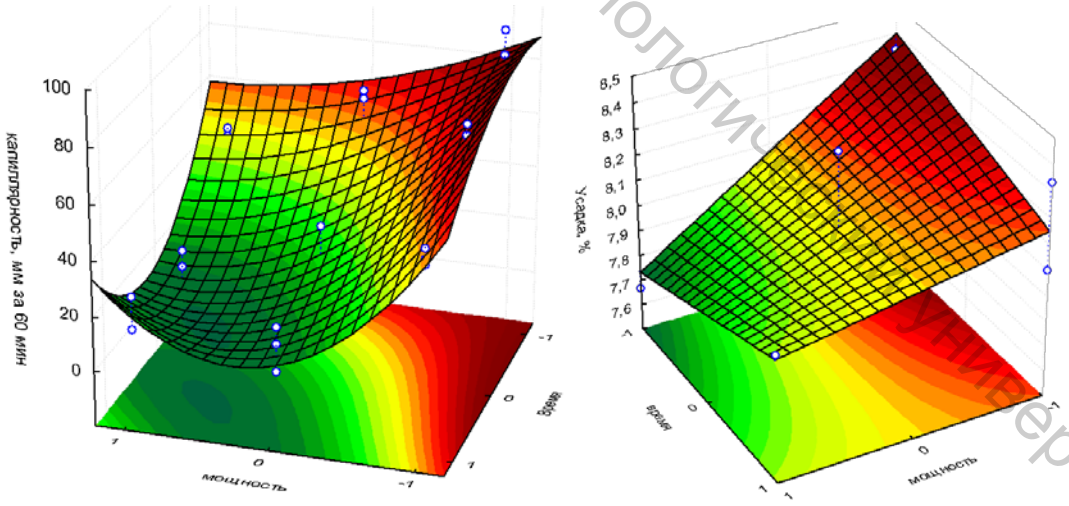
В процессе смачивания льняной ткани происходит усадка за счет набухания волокон. При диэлектрическом способе сушки нагревание воды внутри пор волокна до закипания создается режим запаривания, что приводит к более полной усадке материала. Одновременно

Витебский государственный технологический университет

происходит частичная релаксация внутренних напряжений волокон. При увеличении мощности СВЧ-излучения и продолжительности сушки происходит полное удаление влаги из материала, и значение усадки незначительно уменьшается (рисунок 6.33 б). Однако даже минимальные значения усадки, полученные в результате СВЧ-сушки льняных образцов, превышают значения, полученные при конвективном и при естественном способах сушки.

Наблюдаемое уменьшение разрывной нагрузки образцов льняного материала, подвергнутых СВЧ-сушке, может быть вызвано повышением хрупкости и частичным разрушением волокон из-за полного удаления воды. В процессе усадки уменьшаются силы сцепления и силы трения, действующие между волокнами. Это позволяет волокнам сдвигаться относительно друг друга, поэтому разрывное удлинение обработанных образцов выше, чем у необработанных и высушенных конвективным способом.

Воздействие электромагнитных волн СВЧ-диапазона на ткань из полиамидных волокон оказывает большее влияние на прочностные свойства: разрывная нагрузка и разрывное удлинение. Математическая зависимость разрывной нагрузки от варьируемых факторов имеет вид $Y_3 = 14,75X_1 - 26,88X_1 \cdot X_2$, а разрывного удлинения – $Y_4 = 1,75X_1 - 2,5X_1 \cdot X_2$. На рисунке 6.34 представлены поверхности отклика зависимостей разрывной нагрузки (а) и разрывного удлинения (б) от варьируемых факторов.



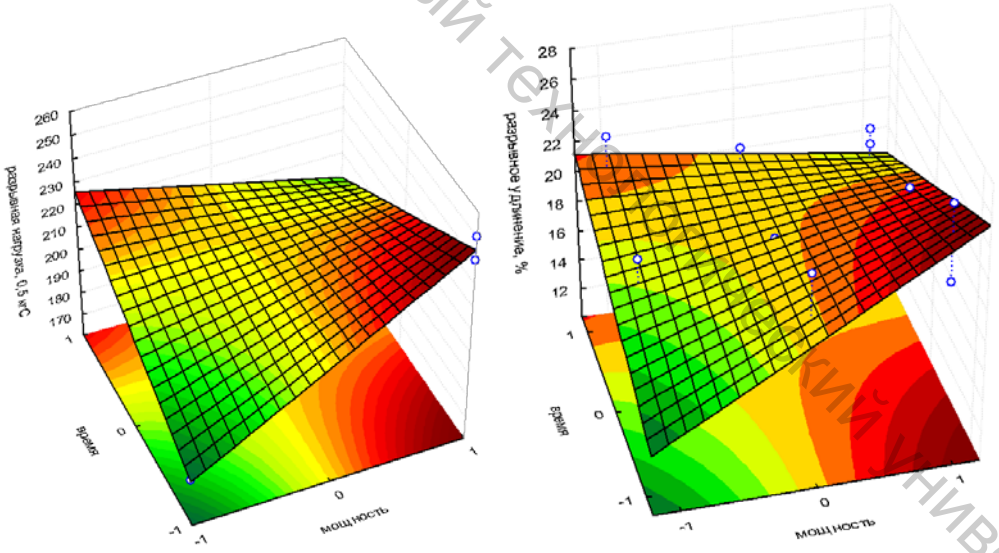
а б

Рисунок 6.33 – Поверхности отклика зависимостей капиллярности (а) и усадки (б)

Витебский государственный технологический университет

При увеличении мощности и продолжительности процесса СВЧ-сушки полиамидной ткани происходит релаксация внутренних напряжений под влиянием электромагнитных волн, связанная с подвижностью кинетически независимых участков макромолекул (амидных групп) и обусловленная обрывом с последующим восстановлением водородных связей в положении, характеризующемся более низкой потенциальной энергией, достигается свободная усадка волокон.

Воздействие электромагнитных волн на надмолекулярную структуру полиамидных волокон приводит к повышению степени ориентации кристаллитов, поперечные размеры которых могут в зависимости от времени обработки и мощности СВЧ-излучения как увеличиваться, так и уменьшаться. Изменения надмолекулярной структуры элементарных волокон оказывают влияние на их механические свойства. В.С. Побединским установлено влияние СВЧ-излучения на прочностные свойства тканей из натуральных и химических волокон. Экспериментальные данные, представленные в таблице 6.6, свидетельствуют о том, что при СВЧ-сушке происходит увеличение разрывной нагрузки полиамидных волокон и удлинения при разрыве по сравнению с естественным и с конвективным способами сушки.



а б

Рисунок 6.34 – Поверхности отклика зависимостей разрывной нагрузки (а) и разрывного удлинения (б)

Таким образом, СВЧ-сушка не приводит к ухудшению физико-механических характеристик текстильных материалов. Напротив, в процессе диэлектрического нагрева происходит перестраивание структуры волокон, в результате чего улучшаются капиллярные, деформационные и прочностные свойства.

Витебский государственный технологический университет

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новые материалы / под ред. Ю. С. Карабасова. – Москва : МИСИС, 2002. – 362 с.
2. Композиционные материалы: справочник / под ред. Д. М. Карпиноса. – Киев : Навукова думка, 1985. – 592 с.
3. Берлин, А. А. Принципы создания композиционных полимерных материалов / А.А. Берлин [и др.]. – Москва : Химия, 1990. – 240 с.
4. Пинчук, Л. С. Материаловедение и конструкционные материалы / Л. С. Пинчук [и др.] ; под ред. В. А. Белого. – Минск : Вышэйшая школа, 1989. – 461 с.
5. Горчаков, Г. И. Строительные материалы / Г. И. Горчаков, Ю.М. Баженов. – Москва : Стройиздат, 1986.
6. Струк, В. А. Материаловедение в машиностроении и промышленных технологиях : учебно-справочное руководство / В. А. Струк [и др.]. – Долгопрудный : Интеллект, 2010. – 536 с.
7. Иманкулова, А.С. Текстильные композиты / А. С. Иманкулова. – Бишкек : МОК, 2005. – 152 с.
8. Калиновская, И. Н. Технологический процесс получения текстильных настенных покрытий: дисс. … канд. техн. наук : 05.19.02 / И. Н. Калиновская. – Витебск, 2010. – 250 с.
9. Балашова, Т. Д. Основы химической технологии волокнистых материалов : учебное пособие / Т. Д. Балашова [и др.]. – Москва : МГТУ им. А. Н. Косыгина, 2005. – 363 с.
10. Козлов, С. Н. Создание экологически чистых льносодержащих обоев / С. Н. Козлов [и др.] // Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева. – Москва, 2002. – № 2. – С. 25–30.
11. Московцев, С. В. Оценка гидрофобности плащевых тканей / С. В. Московцев, С. М. Кирюхин, С.С. Горшкова // Технология текстильной промышленности. – Иваново, 2010. – № 4 (325). – С. 12–14.
12. Одинцова, О. И. Основы текстильного материаловедения / М. Н. Кротова, С. В. Смирнова // Ивановский химико-технологический университет. Кафедра химической технологии волокнистых материалов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://window.edu.ru/resource/437/71437. – Дата доступа : 24.12.2013.
13. Коган, М. А. Разработка технологии трикотажа для фильтрования суспензий : автореф. дисс. … канд. техн. наук : 05.19.02 / М. А. Коган. – Витебск, 1995.
14. Базеко, В. В. Исследования физико-механических свойств тканей со специальными видами заключительной отделки / В. В. Базеко, Н. Н. Ясинская, А. Г. Коган // Материалы докладов 43 научно-технической конференции преподавателей и студентов университета : тезисы докладов, Витебск, апрель 2010 г. / УО

Витебский государственный технологический университет

«Витебский государственный технологический университет». – Витебск, 2010. – С. 217-218.
15. Полотна декоративные. Общие технические условия : ГОСТ 23432-89. – Введ. 01.07.1990. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 1989. – 12 с.
16. Браславский, В. А. Капиллярные процессы в текстильных материалах / В. А. Браславский. – Москва : Легпромбытиздат, 1987. – 112 с.
17. Щукин, Е. Д. Коллоидная химия : учеб. для университетов и химико-технолог. вузов / Е. Д. Щукин, А.В. Перцов, Е. А. Амелина. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высш. шк., 2004. – 445 с.
18. Воюцкий, С. С. Физико-химические основы пропитывания и импрегнирования волокнистых систем водными дисперсиями полимеров / С. С. Воюцкий. – Москва : Химия, 1969. – 336 с.
19. Мир материалов и технологий. Клеевые соединения / под ред. Г. В. Малышевой. – Москва : РИЦ Техносфера, 2007. – 380 с.
20. Ровкина, Н. М., Основы химии и технологии клеящих полимерных материалов : учебное пособие / Н. М. Ровкина, А. А. Ляпков. – Томск : Изд-во ТПУ, 2005. – 104 с.
21. Карпеня, А. М. Технология нетканых материалов технического назначения с использованием волокнистых отходов : дисс. … канд. техн. наук : 05.19.02 / А. М. Карпеня. – Витебск, 2013. – 233 с.
22. Справочник по клеям / Л. Х. Айрапетян [и др.] ; под общ. ред. Л. Х. Айрапетяна. – Ленинград : Химия, 1980. – 304 с.
23. Практикум по полимерному материаловедению / Е. Е. Кузнецов [и др.] ; под общ. ред. Д. А. Кардашева. – Москва : Химия, 1980. – 256 с.
24. Кукин, Г. Н. Текстильное материаловедение (волокна и нити) : учеб. для вузов. / Г. Н. Кукин, А. Н. Соловьев, А. И. Кобляков. 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Легпромбытиздат, 1989. – 352 с.
25. Чукасова-Ильюшкина, Е. В. Технология многослойных текстильных материалов с использованием коротковолокнистых отходов : дисс. … канд. техн. наук : 05.19.02 / Е. В. Чукасова-Ильюшкина. – Витебск, 2008. – 278 с.
26. Бершев, Е. Н. Изучение эксплуатационных свойств ковров / Е. Н. Бершев, Г. П. Смирнов. – Москва, 1976. – 150 с.
27. Бершев, Е. Н. Физические основы технологии электрофлокирования : учеб. пособие / Е. Н. Бершев. – Ленинград : Изд-во Ленингр. ун-та, 1984. – 232 с.
28. Бершев, Е. Н. Электрофлокирование : монография / Е. Н. Бершев – Москва : Легкая индустрия, 1977. – 300 с.
29. Чукасова-Ильюшкина, Е. В. Технологический процесс

Витебский государственный технологический университет

подготовки коротковолокнистых отходов для получения многослойных материалов Е. В. Чукасова-Ильюшкина, К. С, Матвеев, Н. Н. Ясинская // Международная научно-техническая конференция «Современные технологии и оборудование текстильной промышленности (ТЕКСТИЛЬ – 2006)», Москва, 28 – 29 ноября 2006 г. / МГТУ им. А.Н. Косыгина ; редкол.: К. И. Кобраков [и др.]. – Москва, 2006. – С. 32–33.

30. Борщев, В. Я. Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы : учебное пособие / В. Я. Борщев. – Тамбов : Издательство Тамбовского Государственного Университета, 2004. – 75 с.
31. Технология электрофлокирования // Контурфлок [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа: http://www.konturflok.ru. – Дата доступа: 12.12.2007.
32. Тканые конструкционные композиты : пер. с англ. / под ред. Т.-В. Чу и Ф. Ко. – Москва.: Мир, 1991. – 432 с.
33. Хилл, Р. Теория механических свойств волокнистых композиционных материалов Р. Хилл // Механика / Сб. переводов. 1966. – № 2. – С. 131 – 149.
34. Кулаженко, Е. Л. Рациональное использование отходов текстильных материалов предприятий Республики Беларусь / Е. Л. Кулаженко, Н. Н. Ясинская // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : тезисы докладов международной научно-технической конференции / Государственное учреждение высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет» ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.].; Могилев, 2008. – С. 66-67.
35. Кулаженко, Е. Л. Перспективы применения отходов текстильной промышленности / Е. Л. Кулаженко, Н. Н. Ясинская, А. Г. Коган // Современные наукоемкие технологии и перспективные материалы текстильной и легкой промышленности (Прогресс - 2008) : сборник материалов международной научно-технической конференции. Часть 1. / Ивановская государственная текстильная академия; редкол. : Г. И. Чистобородов [и др.]. – Иваново : ИГТА, 2008. – С. 16-17.
36. Кулаженко, Е. Л. Использование текстильных отходов при производстве многослойных материалов / Е. Л. Кулаженко, А. Г. Коган // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2008. – Вып. 15. – С. 81-83.
37. Пористость // Материал из Википедии — свободной энциклопедии [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://ru.wikipedia.org/wiki/. – Дата доступа : 11.11.2013.
38. Гудок, Н. С. Изучение физических свойств пористых сред / Н. С. Гудок. – Москва : Недр А, 1970. – 209 с.

Витебский государственный технологический университет

39. 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.
40. Мурычева, В. В. Технология композиционных текстильных материалов способом импрегнирования: дисс. … канд. техн. наук : 05.19.02 / В. В. Мурычева. – Витебск, 2014. – 210 с.
41. Полотна текстильные. Методы определения гигроскопических и водоотталкивающих свойств : ГОСТ 3816-81. – Введ. 01.07.1982. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 1981. – 14 с.
42. Чукасова-Ильюшкина, Е. В. Технологии получения многослойных материалов из коротковолокнистых отходов текстильной промышленности / Е. В. Чукасова-Ильюшкина, Л. В. Козлова, А. Г. Коган // Тезисы докладов XXXIX научно-технической конференции преподавателей и студентов университета / УО «ВГТУ» ; гл. ред. С. М. Литовский. – Витебск, 2006. – С. 105.
43. 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. – № a 20050939; заявл. 30.09.2005 ; опубл. 28.02.2008 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці/ 2008. – № 1. – С. 107.
44. Абрамович, Г. Н. Теория турбулентных струй / Г. Н. Абрамович. – Москва: Физматгиз, 1960. – 715 с.
45. Альтшуль, А. Д. Гидравлика и аэродинамика (Основы механики жидкости): учебное пособие для вузов./ А. Д. Альтшуль, П. Г. Киселев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Стройиздат, 1975. – 323 с.
46. 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 : спецвыпуск «Научный альманах». – 2007. – № 8. – С. 43–45.
47. Чукасова-Ильюшкина, Е. В. Анализ влияния скорости воздушно-волокнистой струи на качество многослойных материалов / Е. В. Чукасова-Ильюшкина // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Современные технологии и оборудование текстильной промышленности» (Текстиль – 2007) / МГТУ им. А. Н. Косыгина ; пред. ред. коллегии К. И. Кобраков. – Москва. – 2008. – С. 77.
48. Чукасова-Ильюшкина, Е. В. Анализ скоростных режимов скорости воздушно-волокнистой струи при формировании

Витебский государственный технологический университет

многослойных материалов аэродинамическим напылением / Е. В. Чукасова-Ильюшкина, Н. Н. Ясинская, А. Г. Коган // Сборник материалов всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы проектирования и технологии изготовления текстильных материалов специального назначения» (Техтекстиль – 2007), Димитровград, 18 – 19 октября 2007 г. / ДИТУД УлГТУ; пред. ред. коллегии : В.В. Павутницкий – Димитровград, – 2007. – С. 94–95.

49. Кострюков, В. А. Основы гидравлики и аэродинамики / В. А. Кострюков. – Москва: Высшая школа, 1975. – 220 с.
50. Чукасова-Ильюшкина, Е. В. Исследование процесса формирования комбинированных текстильных материалов / Е. В. Чукасова-Ильюшкина, Н. Н. Ясинская // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2007. – Вып. 12. – С. 50–53.
51. Нетканые текстильные полотна : справочное пособие / Е. Н. Бершев [и др.] ; под общей редакцией Е. Н. Бершева. – Москва : Легпромбытиздат, 1987. – 400 с.
52. Чукасова-Ильюшкина, Е. В. Исследование пневмоинжекционных эффектов в аэродинамическом устройстве и его оптимизация / Е. В. Чукасова-Ильюшкина // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2008. – Вып. 14. – С. 31–35.
53. Чукасова-Ильюшкина, Е. В. Исследование процесса нанесения клея валиками при получении многослойного текстильного полотна / Е. В. Чукасова-Ильюшкина, Н. Н. Ясинская, А. Г. Коган // Тезисы докладов XL научно-технической конференции преподавателей и студентов университета / УО ВГТУ ; гл. ред. В. В. Пятов. – Витебск, 2007. – С. 77–78.
54. Примеры расчетов по гидравлике : учебное пособие для вузов / А. Д. Альтшуль [и др.] ; под общ. ред. А. Д. Альтшуля. – Москва : Строймздат, 1977. – 254 с.
55. Соколов, Е. Я. Струйные аппараты / Е. Я. Соколов, Н. М. Зингер. – 3-е изд. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
56. Лойтянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойтянский. – Москва : Ленинград : Гостехиздат, 1950. – 676 с.
57. Повх, И. Л. Техническая гидродинамика / И. Л. Повх. – Ленинград : Машиностроение, 1969. – 524 с.
58. Логачев, И. Н. Аэродинамические основы аспирации : монография / И. Н. Логачев, К. И. Логачев. – Санкт Петербург : Химиздат, 2005. – 659 с.
59. Пискунов, Н. С. Дифференциальные и интегральные исчисления для втузов в 2-х книгах / Н. С. Пискунов. – Москва : Наука, 1966. – 2 кн.
60. Чукасова-Ильюшкина, Е. В. Определение координаты

Витебский государственный технологический университет

волокнистой частицы при нанесении на поверхность – основу / Е. В. Чукасова-Ильюшкина, В. И. Ольшанский, А. Г. Коган // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2008. – Вып. 14. – С. 23–27.

61. Чукасова-Ильюшкина, Е. В. Исследование геометрических параметров аэродинамического устройства для нанесения мелкодисперсных частиц потоками сжатого воздуха / Е. В. Чукасова-Ильюшкина, Н. Н. Ясинская, В. И. Ольшанский // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2008. – Вып. 15. – С. 39–43.
62. Чукасова-Ильюшкина, Е. В. Исследование аэродинамических процессов в зависимости от геометрических параметров устройства / Е. В. Чукасова-Ильюшкина, А. Г. Коган // Материалы докладов XLI научно-технической конференции преподавателей и студентов университета / УО «ВГТУ». – Витебск, УО «ВГТУ», 2008. – С.109–111.
63. 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. – № u 20060354 ; заявл 02.06.2006 ; опубл. 30.12.2006 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці : – 2006. – № 6. – С. 188.
64. Беликов, Г. М. Новая технология переработки коротковолокнистых отходов / Г. М. Беликов // Текстиль: бытовой, специальный, технический. – 2003. – № 5. – С. 25.
65. Кулаженко, Е. Л. Технологический процесс производства многослойных материалов с текстильным покрытием / Е. Л. Кулаженко, Н. Н. Ясинская, А. Г. Коган // Молодые ученые – развитию текстильной и легкой промышленности (Поиск - 2008) : сборник материалов международной научно-технической конференции. Часть 1. / Ивановская государственная текстильная академия; редкол. : Г. И. Чистобородов [и др.]. – Иваново : ИГТА, 2009. – С. 22-23.
66. Кулаженко, Е. Л. Технологический процесс непрерывного валкового нанесения льняной костры на основу / Е. Л. Кулаженко // Современные наукоемкие технологии и перспективные материалы текстильной и легкой промышленности (Прогресс - 2008) : сборник материалов международной научно-технической конференции. Часть 1. / Ивановская государственная текстильная академия ; редкол.: Г. И. Чистобородов [и др.]. – Иваново : ИГТА, 2008. – С. 30.
67. Кулаженко, Е. Л. Технология многослойных материалов с волокнистым покрытием / Е. Л. Кулаженко, А. Г. Коган // Современные технологии и оборудование текстильной

Витебский государственный технологический университет

промышленности (Текстиль-2009) : тезисы докладов международной научно-технической конференции / Московский государственный текстильный университет имени А. Н. Косыгина ; редкол. К. И. Кобраков [и др.]. – Москва : ГОУВПО «МГТУ им. А. Н. Косыгина», 2009. – С. 12-13.
68. Кулаженко, Е. Л. Способ и устройство для формирования многослойных материалов / Е. Л. Кулаженко, Е. В. Чукасова-Ильюшкина // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : тезисы докладов международной научно-технической конференции. Часть 2. / Государственное учреждение высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет» ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2009. – С. 35-36.
69. Кулаженко, Е. Л. Оптимизация параметров формирования волокнистого покрытия при производстве композиционных текстильных материалов / Е. Л. Кулаженко, Н. Н. Ясинская, А. Г. Коган // Новое в технике и технологии текстильной и легкой промышленности : материалы международной научной конференции / УО «ВГТУ» ; гл. редактор В. В. Пятов. – Витебск : УО «ВГТУ», 2009. – С. 72-74.
70. Калиновская, И. Н. Создание льносодержащих текстильных настенных покрытий / И. Н. Калиновская, Н. Н. Ясинская // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2005. – Вып. 7. – С. 9-13.
71. Справочник механика целлюлозно-бумажного предприятия / В. И. Пожитков [и др.] ; под ред. канд. техн. наук М. И. Калинина. – Москва : Лесная промышленность, 1983. – 415 с.
72. Кузьмичев, В. Е Теория и практика процессов склеивания деталей одежды : учебное пособие для студ. высш. учеб. заведений / В. Е. Кузьмичев, Н. А. Герасимова. – Москва : Академия, 2005. – 255 с.
73. Мигушов, И. И. Механика текстильной нити и ткани / И. И. Мигушов. – Москва : Легкая индустрия, 1980. – 160 с.
74. Контроль давления при склеивании // «Хозяин дома» [Электронный ресурс] – 2006. – Режим доступа: http://www.xozaindoma.ru/dom/kontrol-davleniya-pri-skleivanii.htm – Дата доступа: 20.03.2006.
75. Термоклеевые материалы швейного производства блок // Сайт компании «Джей» [Электронный ресурс] – 2009. – Режим доступа: http://www.dzej.ru/info/termokleevie_materiali_dlya_shvejnogo_proizvodstva/ – Дата доступа: 03.02.2009.
76. Галынкер, И. И. Резание и режущий инструмент / И. И. Галынкер. – Москва : Легкая индустрия, 1969. – 256 с.

Витебский государственный технологический университет

77. Базюк, Г. П. Резание и режущий инструмент в швейном производстве / Г. П. Базюк. – Москва : Легкая промышленность, 1989. – 185 с.
78. Бареян, А. Г. Применение специальных наплавок, покрытий и технологий упрочнения для повышения износостойкости ножей куттеров / А. Г. Бареян // Сборник научных трудов. – 2004. – № 1 (7). – С. 14 – 19.
79. Борисенко, А. А. Режущие рабочие органы оборудования и их расчёт / А. А. Борисенко. – Ставрополь, 2004. - 175 с.
80. Калиновская, И. Н. Обоснование выбора конструкции ножа для обрезки кромки текстильных настенных покрытий / И. Н. Калиновская, Н. Н. Ясинская, А. Г. Коган // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2007. – Вып. 13. – С. 67-71.
81. Шайдоров, М. А. Клеевые материалы и клеевые соединения при производстве одежды: учеб. пособие / М. А. Шайдоров. – УО “ВГТУ”. – Витебск, 2003. – 133с.
82. Кузьмичев, В. Е. Теоретическое обоснование и разработка процессов склеивания текстильных материалов : дис. док. тех. наук : 05.19.03, 05.19.04 / В. Е. Кузьмичев. – Иваново, 1995. – 331 л.
83. Калиновская, И. Н. Исследования параметров процесса сушки текстильных настенных покрытий / И. Н. Калиновская, Н. Н. Ясинская // Всероссийская науч.-технич. конф. “Современные технологии и оборудование текстильной промышленности” (Текстиль–2005) (22–23 ноября 2005 г.) : тезисы докладов / МГТУ им. А.Н. Косыгина ; пред. ред. коллегии К. И. Кобраков. – Москва, 2005. – С. 50-51.
84. Кукин, Г. Н. Текстильное материаловедение / Г. Н. Кукин, А.Н. Соловьев, А. И. Кобляков. – Москва : Легпромбытиздат, 1989. – 352 с.
85. Кулаженко, Е. Л. Технология композиционных текстильных материалов механического способа формирования : дисс. … канд. техн. наук : 05.19.02 / Е. Л. Кулаженко. – Витебск, 2009. – 231 с.
86. Калекин, А. А. Гидравлика и гидравлические машины : учебное пособие / А. А. Калекин. – Москва : Мир, 2005. – 512 с.
87. Кулаженко, Е. Л. Исследование процесса нанесения клея валичным способом / Е. Л. Кулаженко // Материалы докладов XLII научно-технической конференции преподавателей и студентов университета / УО «ВГТУ» ; редкол. : В. В. Пятов [и др]. – Витебск : УО «ВГТУ», 2009. – С. 189-191.
88. Ясинская, Н. Н. Новые технологии склеивания при формировании многослойных текстильных материалов / Н. Н. Ясинская, Е. Л. Кулаженко, Е. В. Чукасова-Ильюшкина //

Витебский государственный технологический университет

Тезисы докладов XLII научно-технической конференции преподавателей и студентов университета / УО «ВГТУ» ; редкол. : В. В. Пятов [и др]. – Витебск : УО «ВГТУ», 2009. – С. 123.
89. 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.
90. Применение ИК излучателей. Инфракрасная сушка [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.elcer.com.ua/article/ir_dry/. – http://www.elcer.com.ua/ Дата доступа : 03.01.2014.
91. 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.
92. Кукин, Г. Н. Текстильное материаловедение (волокна и нити) : учеб. для вузов / Г. Н. Кукин, А. Н. Соловьев, А. И. Кобляков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Легпромбытиздат, 1989. – 352 с.
93. Трещалин, М. Ю. Исследование процесса капиллярного подъема жидкости в нетканых материалах / В. С. Мандрон, Г. К. Мухамеджанов // Известия ВУЗов. Технология текстильной промышленности. – 2009. – № 4. - С. 24 – 26.
94. Валько, Э. Коллоидно-химические основы текстильной технологии / Э. Валько. – Москва – Ленинград : Гос. изд-во легкой промышленности, 1960. – 328 с.
95. Бумагоделательные и отделочные машины / И. Я. Эйдлин [и др.] ; под ред. И. Я. Эйдлина. - изд. 3-е, испр. и доп. – Москва : Лесная промышленность, 1970. – 623 с.
96. Бельцов, В. М. Оборудование для отделки хлопчатобумажных тканей: учебник для средн. спец. учеб. заведений / В. М. Бельцов. – Москва : Легкая и пищевая промышленность, 1982. - 352 с.
97. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – Москва : Высшая школа, 1967. – 599 с.
98. Тепломассообмен // Система управления обучением DiDesk. Новосибирский государственный технический университет [Электронный ресурс] – 2009. – Режим доступа: http://courses.edu.nstu.ru - Дата доступа : 10.05.2009.
99. Тихомиров, В. Б. Нетканые клееные материалы / В. Б. Тихомиров. – Москва : Легкая индустрия, 1966. – 342 с.
100. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва : Энергия, 1968. – 472 с.
101. Кукарин, С. В. Электронные СВЧ приборы / С. В. Кукарин. – Москва : Радио и связь, 1981. – 271 с.

Витебский государственный технологический университет

102. Бацев, П. В. СВЧ-модуль промышленного применения с электронной системой регулирования мощности / П. В. Бацев, А. С. Зуемановский // Электронная техника. Серия I "Электроника СВЧ". – 1974. Вып.8.
103. Рогов, И. А. Техника сверхвысокочастотного нагрева пищевых продуктов / И. А. Рогов, С. В. Некрутман, Г. В. Лысов. – Москва : Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 199 с.
104. Глуханов, Н. П. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов в машиностроении / Н. П. Глуханов, И. Г. Федоров. – Ленинград : Машиностроение, 1983. – 160 с.
105. Коротков, В. А. Проблемы исследования сушки слоистых и капиллярнопористых материалов в поле сверхвысокой частоты / В. А. Коротков, А. П. Пиденко, Б. Д. Тулаев // Тепло- и массоперенос. Т.6. Тепло- и массоперенос в капиллярнопористых телах и процессах сушки. – Минск, 1972. – С. 468–471.
106. Кавказов, Ю. Л. Тепло- и массообмен в технологии кожи и обуви / Ю. Л. Кавказов. – Москва : Легкая индустрия, 1973. – 272 с.
107. Сакалов, М. А. Использование токов СВЧ для повышения эффективности процесса мерсеризации тканей : дисс. канд. техн. наук / М. А. Сакалов. – Иваново, 1999. – 167 с.
108. Губерман, М. С. Теоретическое обоснование, разработка и освоение высокоэффективных технологий производства тканей специального и бытового назначения : дисс. докт. техн. наук / М. С. Губерман. – Иваново, 2000. – 601 с.

Витебский государственный технологический университет

Научное издание

Ясинская Наталья Николаевна
Ольшанский Валерий Иосифович
Коган Александр Григорьевич

КОМПОЗИЦИОННЫЕ ТЕКСТИЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Редактор Платонов А.П.
Технический редактор Скобова Н.В.
Корректор Богачева Е.М.
Компьютерная верстка Ясинская Н.Н.

Подписано к печати_____. Формат _____ Уч.-изд. Лист
Печать ризографическая, тираж _____, заказ №…..

Отпечатано на ризографе «УО» Витебский государственный технологический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/172 от 12.02.2014.
210035, Витебск, Московский проспект, 72.

Витебский государственный технологический университет