

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

Е. Л. Лукьянова

**КОМПОЗИЦИОННЫЕ
НЕТКАНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ИЗ
ВТОРИЧНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ
ОТХОДОВ**

Монография

Витебск
2023

УДК 687.001.5. (075)

ББК 37.237.1

Л 84

Автор:
Е. Л. Лукьянова

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
«Техническое регулирование и товароведение» УО «Витебский
государственный технологический университет» Буркин А.Н.;

доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой экологии
и географии УО «Витебский государственный университет
им. П.М. Машерова» Сушко Г.Г.

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским
советом УО «ВГТУ», протокол № 4 от 30.12.2022.

Рекомендовано к изданию научно-техническим
советом УО «ВГТУ», протокол № 8 от 13.12.2022.

Лукьянова, Е. Л.

Л 84 Композиционные нетканые материалы из вторичных текстильных
отходов : монография / Е. Л. Лукьянова. – Витебск : УО «ВГТУ»,
2023. – 188 с.

ISBN 978-985-481-733-0

Монография предназначена для организации самостоятельной работы
студентов специальности 1-50 01 02 «Конструирование и технология швейных
изделий» специализации 50 01 02 01 «Технология швейных изделий».

УДК 687.001.5. (075)
ББК 37.237.1

ISBN 978-985-481-733-0

© УО «ВГТУ», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 ВИДЫ НЕТКАНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И СПОСОБЫ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ	6
1.1 Общая характеристика нетканых композиционных материалов	6
1.2 Анализ рынка, видов и способов получения нетканых композиционных материалов	9
1.3 Процесс подготовки вторичных материалов при использовании их в технологиях нетканых композиционных материалах	14
1.4 Перспективные направления расширения ассортимента нетканых композиционных материалов	22
2 ПОДГОТОВКА ТЕКСТИЛЬНЫХ ОТХОДОВ К ВТОРИЧНОЙ ИХ ПЕРЕРАБОТКЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ	25
2.1 Характеристика используемых видов текстильных отходов ...	25
2.2 Технологический процесс подготовки текстильных отходов в виде слетов, путанки химических нитей	29
2.2.1 Устройство для измельчения химических нитей	29
2.2.2 Теоретические исследования процесса резания химических нитей	31
2.2.2.1 Узел резания химических нитей	31
2.2.2.2 Узел подачи материала в зону резания	33
2.2.3 Экспериментальные исследования процесса резания химических нитей	36
2.3 Технологический процесс подготовки текстильных отходов в виде межлекальных выпадов, отходов кромки грунтовой ткани и лоскута материалов повышенной плотности и жесткости	38
2.3.1 Характеристика оборудования для измельчения	38
2.3.2 Теоретические исследования процесса резания текстильных отходов в виде лоскута	39
2.3.3 Экспериментальные исследования процесса резания текстильных отходов в виде лоскута	46
2.3.4 Теоретические исследования процесса резания текстильных отходов в виде лоскута материалов повышенной плотности и жесткости	47
2.3.5 Экспериментальные исследования процесса дробления текстильных отходов в виде лоскута материалов повышенной плотности и жесткости	53
2.4 Анализ силового взаимодействия ножа с материалом в процессе резания	58

2.5 Оптимизация процесса измельчения отходов кромки грунтовой ткани в роторном измельчителе	66
3 НЕТКАНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВТОРИЧНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ ОТХОДОВ	73
3.1 Технологический процесс производства нетканых тепло- и шумоизоляционных материалов с использованием текстильных отходов	73
3.1.1 Особенности технологического процесса производства нетканых материалов способом термоскрепления с использованием текстильных отходов	75
3.1.2 Оптимизация и разработка рекомендаций работы машины Lap FormAir	95
3.1.3 Исследование процесса формирования нетканого полотна при воздействии температуры	103
3.1.4 Оптимизации технологического процесса производства нетканых материалов с использованием текстильных отходов	108
3.1.5 Исследование процесса фиксации нетканого полотна по толщине	118
3.1.6 Определение пористости нетканых шумо- и теплоизоляционных материалов в зоне формирования	131
3.1.7 Способ раскатки нетканого полотна	134
4 СЛОИСТЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ НЕТКАНЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВТОРИЧНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ ОТХОДОВ	136
4.1 Технологический процесс производства теплоизоляционных звукоизолирующих нетканых материалов способом ламинирования	136
4.2 Обоснование выбора связующего для производства теплоизоляционных звукоизолирующих ламинированных нетканых композиционных материалов	142
4.3 Теоретические исследования технологического процесса производства теплоизоляционных звукопоглощающих ламинированных материалов	145
4.3.1 Исследование процесса нанесения клея валичным способом	145
4.3.2 Теоретические исследования работы адгезии, поверхностного натяжения и прочности покрытия при процессах склеивания слоев материала	153
4.4 Исследование показателей качества теплоизоляционных звукопоглощающих ламинированных термоскрепленных материалов	167
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	174
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	176

ВВЕДЕНИЕ

Создание новых видов материалов, которые представляют собой композицию с включением в них различных видов волокон, позволило совершить прорыв в машиностроительной, авиационной и автомобильной отраслях промышленности. Расширение и постоянное обновление ассортимента композиционных материалов, совершенствование их свойств и увеличение объема выпуска является актуальной научно-технической задачей [1].

Разработка и производство композитов, являющихся многофункциональными за счет своих свойств, имеет практическую значимость для научного и технологического развития многих отраслей экономики, так как их можно использовать во многих сферах хозяйственной деятельности. В настоящее время создание и применение новых, эффективных материалов, конкурентоспособных с дорогостоящими аналогами, становится наиболее актуальным. Применение вторичных текстильных отходов для производства композитов и изделий из них различного назначения является одним из наиболее перспективных направлений [2].

Производство нетканых композиционных материалов является решающим шагом в будущее текстильной индустрии, так как обладают значительно более короткой (вплоть до одного перехода, например, от исходного полимера до готового спанбонда) схемой получения, в отличие от многостадийного ткацкого или трикотажного производства. В будущем такие материалы смогут конкурировать по качеству с тканями и трикотажными полотнами и полностью займут их место в сфере техники и быта, в том числе и одежды. Благодаря своему многообразию они стали непременным атрибутом повседневной жизни современных людей [3].

Несмотря на множество различных технологий изготовления, которые позволяют выпускать широчайший спектр продукции, постоянно возникает потребность в дополнительном изменении и улучшении свойств материалов в соответствии с появляющимися новыми областями их применения и растущими требованиями к качеству конечных изделий [3].

Накопленный на протяжении многих лет практический опыт позволяет в настоящее время целенаправленно управлять свойствами новых видов, разрабатываемых нетканых композиционных материалов путем обоснованного подбора волокнистого сырья. В результате производители получают инструмент для регулирования функциональных свойств вырабатываемого ими готового продукта [4].

1 ВИДЫ НЕТКАНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И СПОСОБЫ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ

1.1 Общая характеристика нетканых композиционных материалов

В настоящее время разработка новых ресурсо- и наукоемких видов материалов, каковыми являются нетканые композиты, для разных отраслей промышленности является весьма перспективным направлением научной деятельности в экономически развитых странах мира. Уровень таких разработок справедливо считается свидетельством достижений фундаментальных и прикладных наук. Все большее внимание уделяется созданию нетканых материалов в виде различных сочетаний компонентов. Комбинации сырьевых составов, всевозможных связующих и добавок, применение высокотехнологичных способов производства позволяет создавать материалы различного назначения с широчайшим спектром свойств [5].

Нетканый материал в понимании специалистов по производству текстильных материалов [6–8] – это сформированный холст из текстильных волокон, скрепленный различными способами.

Авторы [6–9] классифицируют нетканые материалы:

- по волокнистому составу – хлопчатобумажные (включают и смешанные с вискозным волокном), полушерстяные, шелковые, льняные;
- по способу производства – холстопршивные, нитепршивные, тканепршивные, иглопробивные, клееные, комбинированные (к ним относятся холстопршивные полотна с каркасной тканью, каркасные клееные и иглопробивные и др.), полотна типа ватина – холстопршивные, иглопробивные;
- по назначению – бытовые, обтирочные, тарные и паковочные, обувные, основа для ИК (искусственной кожи), прокладочные, фильтровальные, мебельные, ватин.

М. С. Брусанов приводит свою классификацию нетканых материалов, представленную на рисунке 1.1 [10]. И, по его мнению, представляет классификацию в структурном виде, как объединенную систему основных подсистем – сырья, способов формирования и скрепления холста – с указанием взаимосвязей между ними.

Судя по классификации, приведенной авторами [6–9], нетканые материалы являются композиционными, так как композиционные материалы – это системы, составленные (скомбинированные) из разных материалов с целью получения улучшенных эксплуатационных свойств по сравнению со свойствами отдельных составляющих компонентов.

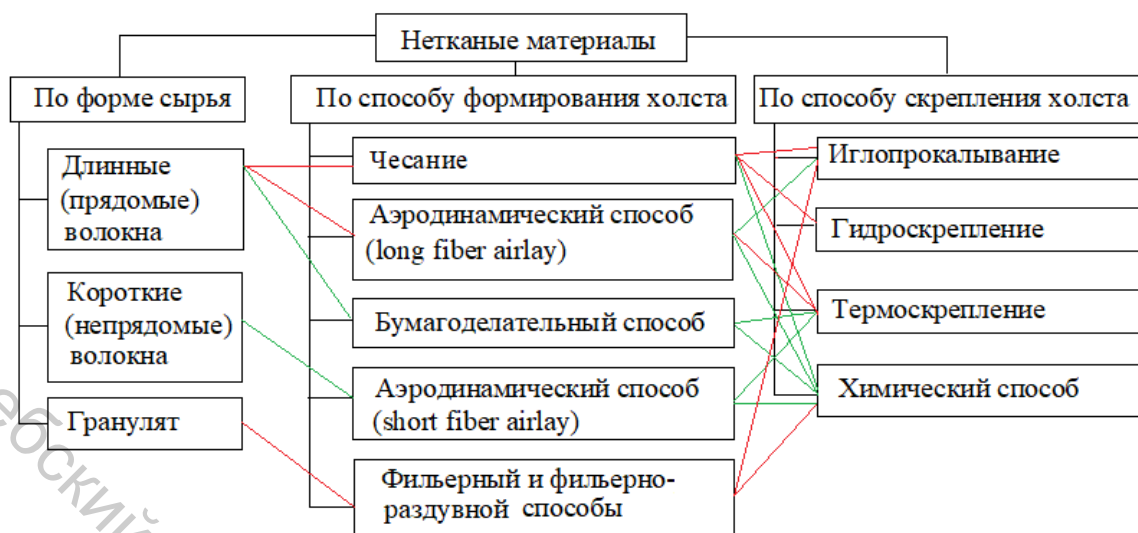


Рисунок 1.1 – Классификация нетканых материалов

Комбинируя объемное содержание компонентов, получают композиционные материалы с требуемыми значениями прочности, жаропрочности, модулем упругости, абразивной стойкости, а также создают композиции с необходимыми магнитными, диэлектрическими, радиопоглощающими и другими специальными свойствами [11, 12].

В свою очередь композиционные материалы (далее КМ) классифицируют по структуре наполнителя на:

- волокнистые (армированы волокнами и нитевидными кристаллами),
- слоистые (армированы пленками, пластинками, слоистыми наполнителями),
- дисперсноармированные, или дисперсно-упрочненные (с наполнителем в виде тонкодисперсных частиц) [13, 14].

Схему строения таких материалов можно представить в виде рисунка 1.2 (а – дисперсноармированные, б – волокнистые, в – слоистые).

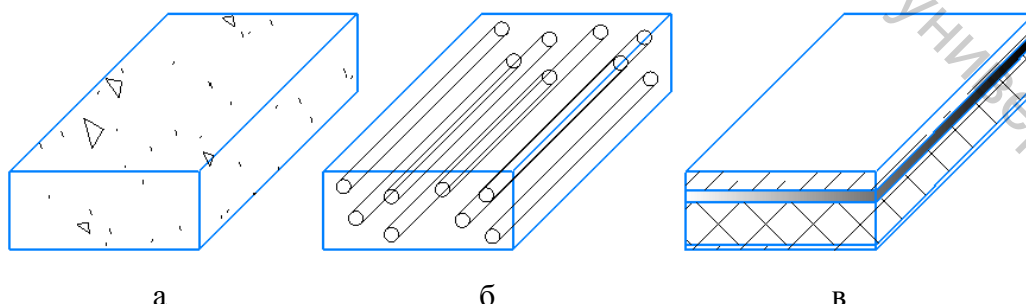


Рисунок 1.2 – Схемы строения композиционных материалов

Армирующей добавкой в волокнистых КМ могут быть волокна различной формы: нити, ленты, сетки разного плетения. Армирование волокнистых КМ может осуществляться по одноосной, двухосной и

трехосной схеме, либо в хаотичном порядке. Прочность и жесткость таких материалов определяется свойствами армирующих волокон, воспринимающих основную нагрузку. Армирование дает больший прирост прочности, но дисперсное упрочнение технологически легче осуществимо [7].

Слоистые композиционные материалы создаются из чередующихся слоев наполнителя и матричного материала (типа «сэндвич»). Слои наполнителя в таких КМ могут иметь различную ориентацию. Возможно поочередное использование слоев наполнителя из разных материалов с разными механическими свойствами. Для слоистых композиций обычно используют неметаллические материалы [12].

Стоит отметить, что существующие схемы классификации в определенной степени условны, так как не могут учесть все многообразие признаков и то, что ассортимент постоянно расширяется и обновляется, разрабатываются новые виды нетканых композиционных материалов, внедряются новые технологии. На основании анализа литературных источников и изучения ассортимента нетканых композиционных материалов предлагается новая классификация с учетом всех рассмотренных признаков, представленная на рисунке 1.3.

В результате анализа выделены следующие признаки классификации: по назначению, способу формирования, степени готовности, жесткости, происхождению исходного сырья, виду исходного сырья и компонентов, по структуре, по теплопроводности, горючести, форме и внешнему виду, виду связующих. Следует отметить, что одни и те же материалы могут относиться к разным группам. Представленная на рисунке 1.3 классификация является условной и может быть дополнена по признакам и группам.

Присутствие в составе КМ текстильных компонентов могут придавать им прочностные и декоративные свойства, создавать необычную структуру, а также различные специальные свойства – огне- и термостойкость, водо-, масло- и грязеотталкивание, антибактериальные, магнитные, диэлектрические, радиопоглощающие и др. [12].

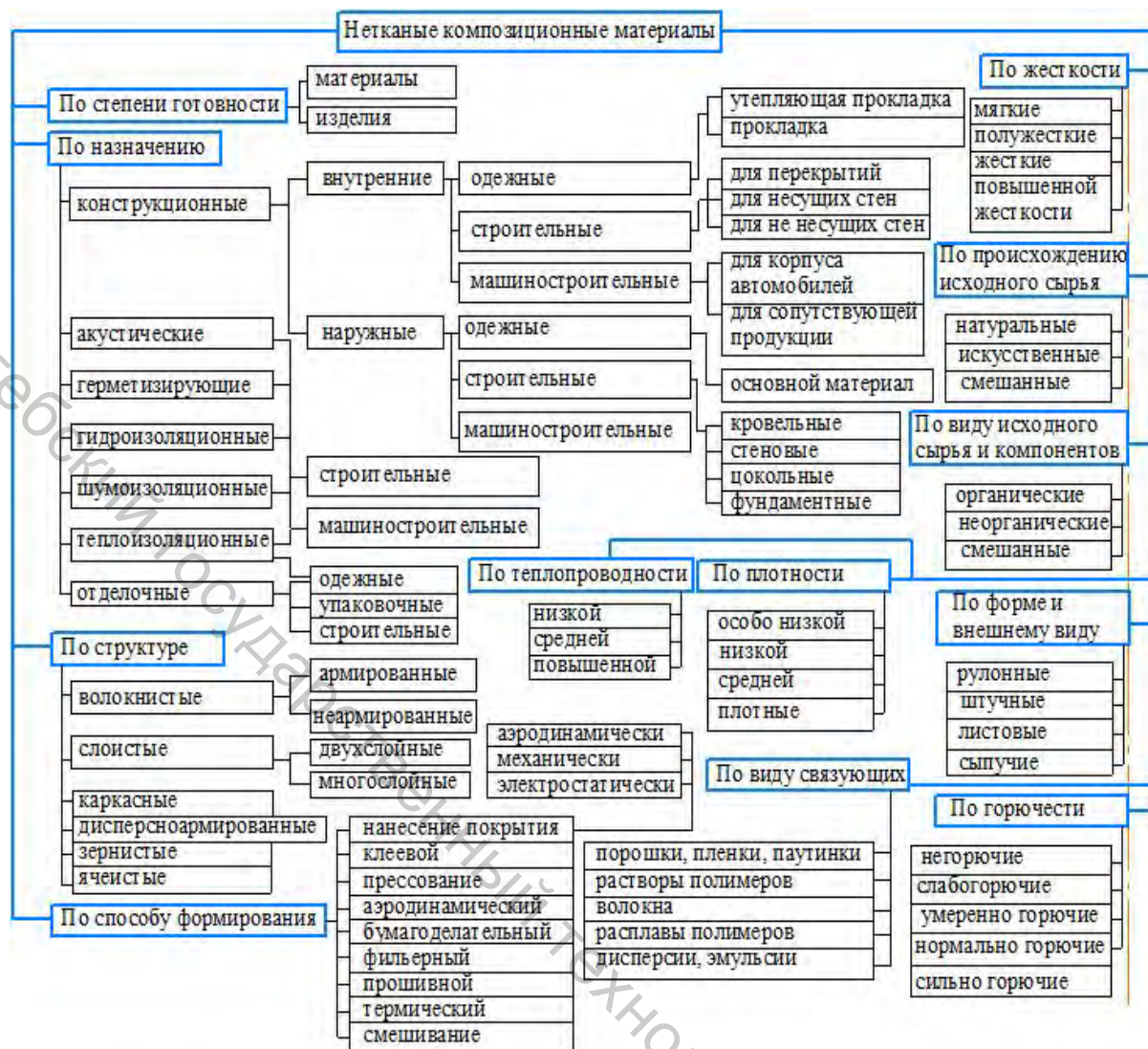


Рисунок 1.3 – Классификация нетканых композиционных материалов

1.2 Анализ рынка, видов и способов получения нетканых композиционных материалов

Согласно данным Национального статистического комитета Республики Беларусь [15, с. 25] с каждым годом наблюдается динамика роста выпуска нетканых материалов (далее НМ) предприятиями легкой промышленности (рисунок 1.4). В 2020 г. по сравнению с 2016 г. выпуск увеличился на 38,3 %, что говорит о нарастающем спросе на данный вид продукции. Объем промышленного производства в данном случае приведен по крупным, средним, малым и микроорганизациям всех форм собственности независимо от их основного вида экономической деятельности и с учетом объемов промышленного производства индивидуальных предпринимателей [15].

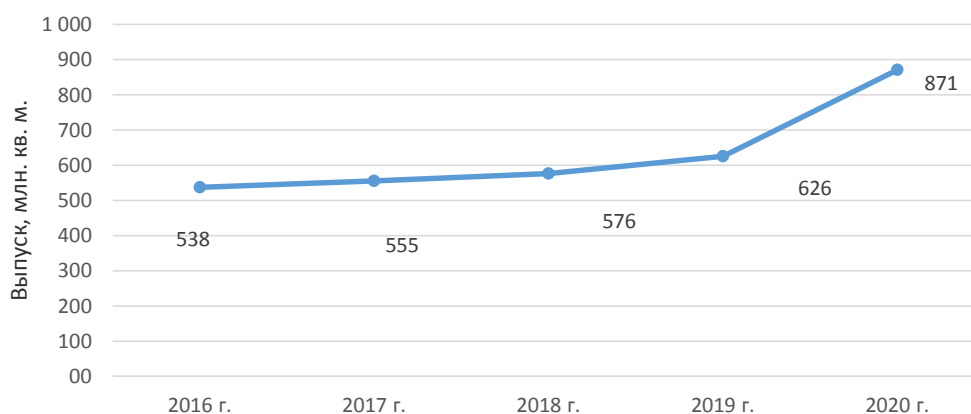


Рисунок 1.4 – Динамика выпуска нетканых материалов в Республике Беларусь

Основными предпосылками интенсивного роста производства НМ являются прогрессивность технологий их производства, которые обеспечивают возможность комплексной механизации и автоматизации процессов, сокращение трудовых и капитальных затрат, возможность переработки всех видов волокон, в том числе вторичных – в виде текстильных отходов. По своим свойствам НМ успешно конкурируют с тканями и заменяют их, а по некоторым свойствам превосходят традиционные текстильные материалы [16].

Ю. Н. Хакимуллин и другие предлагают технологию НМ на основе полимеров, используемые для производства медицинской одежды и белья, стерилизуемой радиационным излучением, и приводят основные способы повышения радиационной стойкости таких материалов [17].

Известен слоистый нетканый материал, который может использоваться при изготовлении одежды для медицинских целей (например, в форме упругих бандажей). Материал состоит из одной или нескольких упругих пленок и из одного или нескольких слоев нетканого материала, прикрепленного к пленке клеем [18].

Д. Д. Ньюкирк и другие разработали нетканый материал, содержащий волокно из лигнинового соединения, сформированное из расплава [19]. Лигнин представляет собой основной компонент древесины. Один этап при изготовлении бумажной массы из древесины включает отделение лигнина от целлюлозы посредством использования, например, натронного, сульфитного или сульфатного процесса (крафт-процесса). Лигнин представляет собой побочный продукт и подлежит выбрасыванию или сжиганию. Использование лигнина в качестве базового компонента для нетканого материала в соответствии с данным изобретением обеспечивает повышение доли экологически рационального содержимого изделий одноразового и неодноразового использования [19].

Немецкими учеными предлагается текстильный материал, который содержит несущий тканый или трикотажный слой и соединенный с ним с помощью водяных струй покрывной слой в виде волокнистого холста из натуральных и химических волокон. Используется данный материал для изготовления фильтров, одежды, обуви, покрытия крыш и зданий [20].

Текстильные обои также относятся к композиционным материалам, один из слоев которых получен бумагоделательным способом, а второй – в процессе ткачества. Слои скрепляются с помощью клея, т.е. на бумажную основу наносится клей и припрессовывается тканое полотно, после этого материал сушат в специальных инфракрасных сушильных камерах [12, 21]. Процесс производства таких настенных покрытий является трудоемким, требует специального оборудования, и цена таких обоев довольно высока.

Представляют интерес многослойные композиционные материалы замшеподобного вида. Это бархатные ткани для одежды, мебели, интерьера, ворсовые рисунки на различных материалах и готовых изделиях, полученные способом электрофлокирования. Способ электрофлокирования основан на ориентации волокон вдоль силовых линий электрического поля. Сущность его заключается в ориентированном нанесении в электрическом поле высокого напряжения на основу, покрытую клеем, коротких волокон [22, 23].

Французскими учеными разработан ворсовый слоистый материал, имеющий опорный элемент. На одной или обеих поверхностях такого элемента может располагаться адгезивный материал, на который нанесено множество коротких волокон или пучков, образующих бархатную поверхность [24].

Особое место среди многослойных материалов занимают металлизированные материалы, которые используются в производстве специальной одежды пожарных, рабочих горячих цехов. Металлизированные ткани также применяют для защиты от магнитных полей, от фотохимического воздействия лучей, теплоизлучения. Металлизация тканей представлена в работах Н. В. Катца [28, с. 3–4].

Князькиным С. В. разработана технология создания текстильных армирующих компонентов композиционных материалов, применяемых в атомной промышленности, на базе «фальшнамоток», формируемых из термостойких и высокопрочных волокон различной природы [26].

Чешскими учеными предлагается способ изготовления нетканого текстильного материала, включающий процессы обработки для придания материалу защитных и антистатических свойств. Для осуществления способа полиолефиновый полимер, подходящий для формирования волокон, смешивают с первой добавкой, способной модифицировать характеристику поверхности и способной мигрировать сквозь массу полимера; затем полученную смесь используют для

формирования по меньшей мере одного слоя нетканого текстильного материала с использованием технологии формирования волокон из расплава; и, прежде чем будет завершен процесс миграции первой добавки с обеспечением стабилизации окончательных защитных свойств на поверхности волокон, на слой наносят вторую добавку, способную модифицировать антистатические свойства материала, после чего полученный нетканый текстильный материал выдерживают при определенной температуре и относительной влажности в течение времени, достаточного для миграции первой добавки к поверхности и изменений на поверхности второй добавки [27].

Российскими разработчиками запатентован слоистый огнезащитный композиционный материал, выполненный в виде пакета и содержащий наружный слой из термостойких волокон, гидроизоляционный слой, промежуточный термоизоляционный и внутренний слой из хлопчатобумажной ткани. При этом гидроизоляционный слой выполнен в виде полимерного расплава [28].

Выпускаются комбинированные материалы в виде панелей при использовании бумаги, картона. Картон дробят на мелкие части, смешивают с антипиренами, адгезивами и добавками различного вида, подвергают сжатию при нагревании или охлаждении, после чего высушивают и упаковывают. Кроме бумаги, картона используются отходы и утиль от переработки материалов и волокон самых разных видов и назначения: отходы ткани из натуральных или синтетических волокон (например, отходы производства тканей или промышленные отходы и т.п.) [29], компоненты которых можно использовать отдельно или в сочетании с бумагой, картоном, цветным склеенным картоном и целлюлозой.

Известен армированный слоистый материал на основе нетканых материалов, содержащий первый слой нетканого материала, сформированного из полиэфирных нитей при их случайном расположении; второй слой – из таких же полиэфирных нитей. Между этими слоями располагается сетка из стеклонитей. Слои нетканых материалов термоскрепляются за счет использования некоторого количества нитей из полиэфира с более низкой температурой плавления по сравнению с полиэфиром, из которого сформирована основная масса. Возможно скрепление слоев нетканых материалов с использованием термоадгезивного материала, температура плавления которого ниже температуры плавления нитей, составляющих слои. Для скрепления материала используется специальная смола [30].

Известен комбинированный текстильный материал, который содержит первый слой нетканого полотна на основе синтетических волокон; второй – состоящий из минеральных или синтетических волокон, обладающих сопротивляемостью возгоранию и сетчатое

полотно, расположенное между этими двумя слоями. Полотна скрепляются между собой с помощью клея [31].

Известен нетканый материал, состоящий из волокон, обладающих высокой огнестойкостью, содержащих графит. Когда графит подвергается воздействию высокой температуры, он расширяется и придает волокнам свойство самотушения. Благодаря этому такой материал приобретает высокую огнестойкость [32].

Учеными получен нетканый материал, способ производства которого заключается в подаче волокнистой суспензии на сборную поверхность в электростатическом поле [33].

Авторами [34] предлагается система для изготовления композиционного материала, содержащего натуральные волокна льна и сизали. Для производства которой применяются натуральные длинные волокна, которые повышают прочность материала до максимума, обеспечивает высокие механические свойства, эквивалентные свойствам композитов, упрочненных стеклянными или углеродными нитями.

Примерами композиционных многослойных нетканых материалов могут также служить пористые полимерные материалы на основе обувных пенополиуретанов [35].

К классическим способам получения нетканых материалов относятся способы, основанные на механической, физико-химической и комбинированной технологиях. По механической технологии вырабатывают вязальнопрошивные и иглопробивные нетканые материалы [6]. По физико-химической технологии вырабатывают материалы способом проклеивания, формованием из расплава или раствора полимера, горячего прессования и бумагоделательным способом [29]. Комбинированные способы представляют собой комбинацию механической и физико-химической технологий. К ним относятся тафтинговый, электрофлокировальный, иглопробивной с пропиткой, валяльно-войлочный и склеивающий способы [36].

Применение и сочетание различных сырьевых компонентов, использование современных технологий позволяет расширить ассортимент нетканых композиционных материалов с широким спектром свойств.

Преимуществами разнообразия способов получения композиционных нетканых материалов являются:

- возможность получения материалов широкого ассортимента и назначения за счет использования различных по свойствам волокон и чередования их слоев в материале;
- сокращение цепочки переходов (тем самым частично устраняется проблема образования отходов, уменьшается длительность цикла получения готового продукта).

К недостаткам существующих способов можно отнести повышенную энергозатратность оборудования, например, при расплавлении полимеров и формировании холстов, что для условий Республики Беларусь экономически невыгодно. Некоторые из рассмотренных способов предполагают использование технологических процессов сложного управления. Специфичность сырья, используемого при осуществлении описанных способов, не всегда позволяет применять отходы текстильного и швейного производства.

По результатам исследований литературных источников, патентной документации и другой научно-технической литературы выявлены следующие тенденции в развитии технологий композиционных нетканых материалов:

1. Совершенствование существующих технологий.
2. Повышение производительности оборудования предприятий.
3. Освоение новых способов производства.
4. Проектирование новых видов композиционных материалов в соответствии с потребительским спросом.

Основными путями развития технологий композиционных нетканых материалов в соответствии с тенденциями развития являются:

- привлечение научно-производственного потенциала к разработкам фирм-производителей;
- использование уже известных научных, технических и конструкторских решений, опыта и знаний сторонних предприятий-производителей композиционных нетканых материалов;
- расширение первичной сырьевой базы, применение новых видов волокон и вторичных материальных ресурсов.

1.3 Процесс подготовки вторичных материалов при использовании их в технологиях нетканых композиционных материалах

Технология формирования нетканых композиционных материалов включает следующие операции:

- подготовка компонентов;
- подготовка материала основы и связующего (при их наличии);
- формирование адгезионного контакта (нанесение, смачивание, пропитка, смешивание);
- сушка (термофиксация).

Подготовка текстильного компонента в виде вторичных материальных ресурсов (далее ВМР) заключается, в основном, в его измельчении до необходимой фракции, поэтому важное значение имеет процесс резания и дробления таких материалов и разработка режимов его осуществления.

В области изучения процесса резания текстильных материалов имеется большой теоретический и экспериментальный материал, разработанный профессором И.И. Капустиным [37].

Успехи, достигнутые в области изучения механических свойств высокополимерных материалов, и выявление роли межмолекулярных связей в изменении их физико-механических свойств позволяют в настоящее время рассматривать поведение текстильных материалов в процессе растяжения, сжатия и других механических воздействий. Изучению релаксации текстильных волокон посвящено много работ, авторами которых являются Г.Н. Кукин, А.Н. Соловьев [38], Ф.Х. Садыкова [39].

Процесс резания отходов нитей, текстильных материалов, объединенных в жгут, можно сравнить с процессом резания неметаллических материалов. Основоположником исследования технологического процесса резания сельскохозяйственных продуктов лезвием является В.П. Горячкин, который разделяет процесс резания на две разновидности: в одном случае лезвие перемещается в направлении разреза только в нормальном к его кромке направлении, в другом – одновременно с этим оно перемещается и параллельно кромке. В.А. Желиговский [40] объясняет эффект скользящего движения лезвия тем, что при скольжении лезвия по материалу оно захватывает неровностями частицы материала, стремится сдвинуть их с места и увлечь за собой. Между смещаемыми и соседними частицами материала возникают нормальные напряжения сдвига вместо напряжения смятия, т.е. сжатия.

Н.Е. Резник эффект скользящего резания объясняет кинематической трансформацией угла заточки лезвия. При анализе силового взаимодействия лезвия с материалом усилие резания становится наиболее важным объектом исследования. Н.Е. Резник рассмотрел взаимодействие лезвия с материалом в наиболее простом случае при внедрении его в материал в нормальном относительно кромке направлении [41].

В работе И.И. Капустина [42] представлена диаграмма изменений усилий, действующих на резак, по мере его погружения в материал. Он установил, что интенсивный рост нагрузки происходит при погружении резака на глубину, равную примерно половине толщины разрезаемого материала, по мере дальнейшего погружения резака в него интенсивность роста усилий уменьшается [42].

Значительный вклад в исследование процесса резания кожи и меха был внесен М.М. Майзелем [43], который рассматривает процесс как систему взаимодействия лезвия и материала.

А.Ф. Прошков процесс резания жгутового химического волокна делит на три стадии: введение ножа в соприкосновение с волокнами жгута, уплотнение жгута, разрезание и дальнейшее уплотнение [44].

Определение силы резания одиночной нити проводил В.Н. Гарбарук [45], жгутовых из химических нитей В.Е. Слываков [46].

Анализ работ в области резания показывает, что наиболее распространенным способом резания является резание дисковым ножом. Большое внимание уделяется резанию и раскрою лучом лазера в работе В.А. Михайлова-Теплякова [47]. Автором разработана конструкция станка с программным управлением и подобраны рабочие режимы.

Исследования способов физического резания (раскаленной проволокой, струей плазмы, воды или разогретого газа, электрической искрой, ультразвуком) проводились многими авторами, как в нашей стране, так и за рубежом, но широкого практического распространения эти способы не получили.

Соколов В.В. рассматривает процесс резания текстильных материалов лезвием. В своей работе он дает толкование базовых понятий и определений теории и систематизации разновидностей технологического резания лезвием, по мнению автора более точно отражающих сущность и назначение этого процесса [48].

Резание текстильных материалов, как утверждает А.В. Савостицкий, может выполняться методами пиления, ножа и ножниц [49]. Резание методом пиления осуществляется ножом, движущимся по двум направлениям, что обеспечивается движением ножа перпендикулярно к поверхности материала и движением машины или материала по вырезаемому контуру. Относительно большая скорость движения ножа обеспечивает при методе пиления чистоту срезаемого слоя и небольшие усилия резания [49].

Разрезание методом ножа характеризуется тем, что нож входит в материал перпендикулярно к линии резания. При этом нож испытывает давление со стороны материала, представляющее собой сопротивление сжатию разрезаемого материала и сопротивление его раздвиганию. Следовательно, при разрезании ножом материала возникают силы трения. Поэтому можно утверждать, что усилие резания зависит от состояния режущего инструмента и свойств материала [49].

Разрезание методом ножниц осуществляется двумя режущими лезвиями, расположенными по обеим сторонам разрезаемого материала. При вдавливании лезвий в материал сопротивление их продвижению возникает из-за деформации сжатия. Резание методом ножниц применяют при небольшой толщине материала, так как усилия резания растут пропорционально квадрату толщины [49].

В промышленности широко используется оборудование для измельчения материалов. Измельчение часто сопровождается размолом, в результате которого достигается изменение объемных и поверхностных свойств материалов. Изменения материалов в процессе

измельчения зависят как от природы самого материала, так и от условий проведения процесса, особенностей применяемого оборудования [50].

Для измельчения крупных кусков материалов, например, волокнистых плит применяют резальные и рубильные машины. Более мелкие частицы материала получают на дробильных машинах (вальцовых, молотковых) и бегунах. Тонкое измельчение волокнистых материалов производят на роллах, мельницах и гидроизмельчителях. Сыпучие материалы измельчают в сухом состоянии и в смеси с жидкостями. В таблице 1.1 дано краткое описание и принцип работы рабочих органов измельчителей древесных отходов [51, 52].

Таблица 1.1 – Описание и принцип работы рабочих органов измельчителей

Тип рабочих органов	Подкласс	Принцип работы, краткое описание
1	2	3
Вальцовые	Рифленые	Рифленые вальцы представляют собой барабан цилиндрической формы, на поверхности которого имеются рифли. Рифленые вальцы можно использовать для тонкого измельчения древесных отходов небольшого диаметра. Наиболее существенным недостатком является налипание измельчаемой массы на рифли, что приводит к резкому ухудшению процесса измельчения, требуется остановка машины и очистка вальцов
	Ребристые	Ребристые вальцовые рабочие органы представляют собой набор дисков, в пазы которых вставляются и крепятся ножи, расположенные параллельно оси вращения вальца. Данные рабочие органы осуществляют измельчение древесных отходов неограниченной длины на маломерные отрезки длиной 120...160 мм, диаметр перерабатываемых отходов до 150 мм. К недостаткам следует отнести размер получаемых отрезков, которые при дальнейшей переработке в кормовых целях необходимо доизмельчать
Резцовые	-	Представляют собой вращающийся резец, закрепленный в оправке, к которому подается измельчаемый материал. В основном машины, в которых используются резцовые рабочие органы, предназначены для переработки деловой древесины, с целью получения древесного шпона и технологической щепы

Окончание таблицы 1.1

1	2	3
Ножевые	Пуансонные	Пуансонные рабочие органы представляют собой набор вращающихся и неподвижных ножей. Измельчение происходит путем перерезания измельчаемой массы подвижным ножом при попадании ее на два неподвижных ножа
	Рубильные: дисковые и барабанные	При использовании рубильных рабочих органов для измельчения деловой древесины и отходов из нее получается кондиционная технологическая щепка, используемая в гидролизном и бумажном производстве для получения ДСП, ДВП и других строительных материалов. Существенным недостатком рубильных рабочих органов является их частая поломка и затупление
Молотковые	Пластинчатые, объёмные	Представляют собой ротор с шарнирно закрепленными молотками пластинчатой или объемной формы. Пластинчатые молотки могут быть прямоугольными, ступенчатыми и фигурными, объемные – сплошными и составными. В основном молотковые рабочие органы применяются в сельском хозяйстве для измельчения зерна, грубых кормов, комбикормов

Типы рабочих органов машин, применяющихся для измельчения отходов волокнистых плит, представлены схемой на рисунке 1.5 [51, 52].

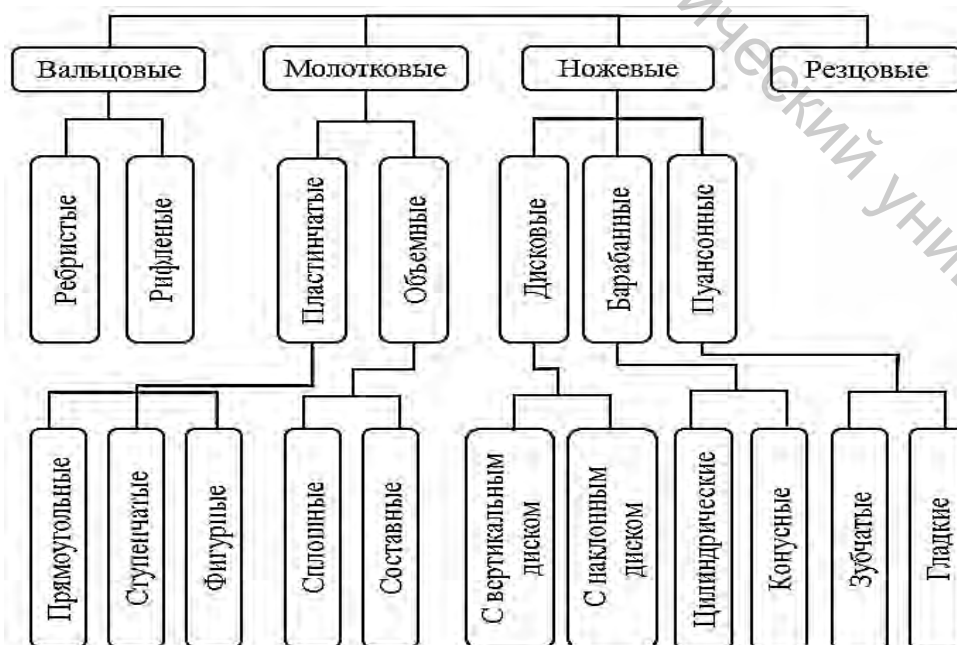


Рисунок 1.5 – Типы рабочих органов измельчителей древесных отходов

На рисунке 1.6 представлены разновидности технологического резания лезвием [37]. В данном случае наклонное резание представлено двумя способами, когда скорость ножа перпендикулярна плоскости материала (рисунок 1.6 а) и когда скорость ножа параллельна плоскости материала (рисунок 1.6 б); резание ножницами – тремя вариантами: 1 – с поступательным перемещением одного из лезвий (рисунок 1.6 в), с возвратно-поворотным движением одного из лезвий (рисунок 1.6 г) и резание штампом (рисунок 1.6 д); комбинированное резание: абразивное резание (рисунок 1.6 е) и фрезерование (рисунок 1.6 ж).

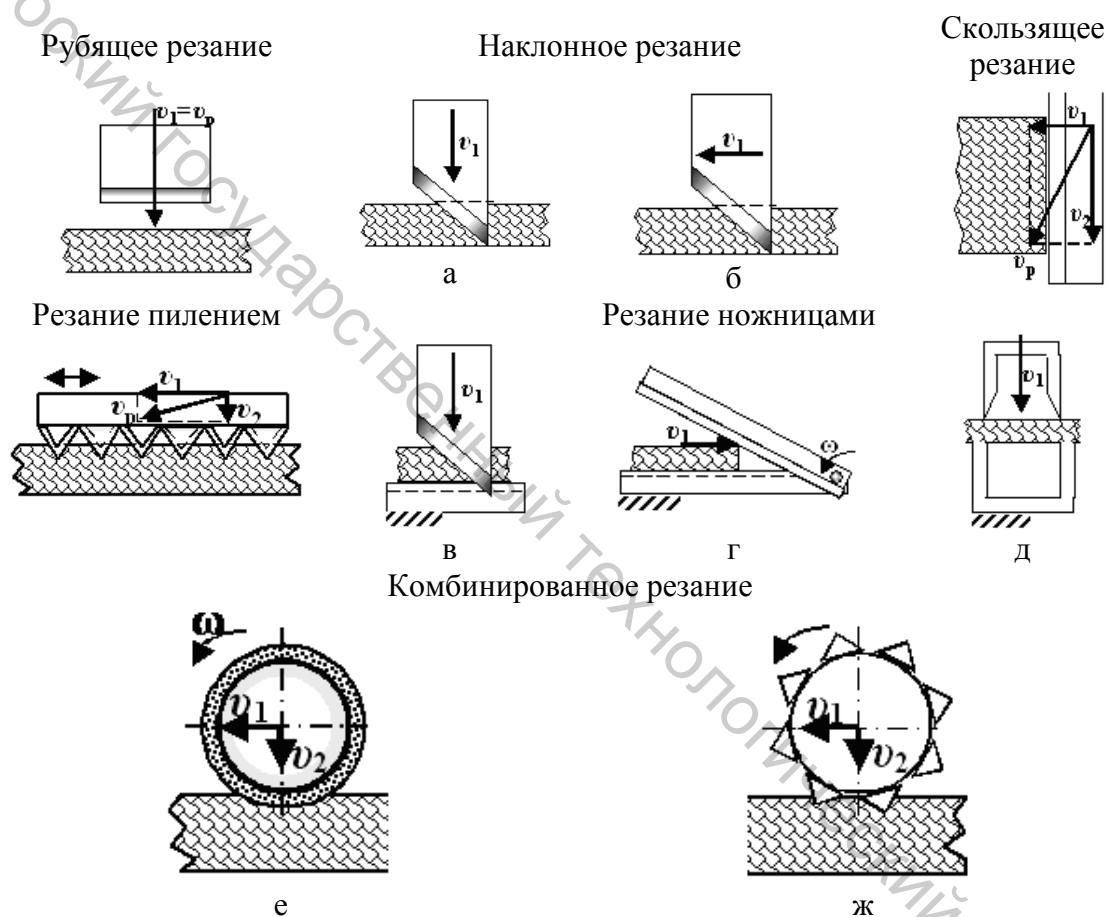


Рисунок 1.6 – Разновидности технологического резания лезвием

Учеными постоянно проводятся исследования и разработка новых способов измельчения материалов исходя из свойств исходного продукта. Например, известен способ непрерывной рубки нити, жгута, ленты и тому подобных материалов и устройство для его осуществления (рисунок 1.7). Способ заключается в подаче исходного материала так, что его конец свободно безопорно выступает из подающего устройства на заданную длину отрубаемого отрезка, в рубке высокоскоростным ударом и пневмоудалении рубленого продукта путем отсоса, направление которого совмещают с направлением подачи исходного материала [53].

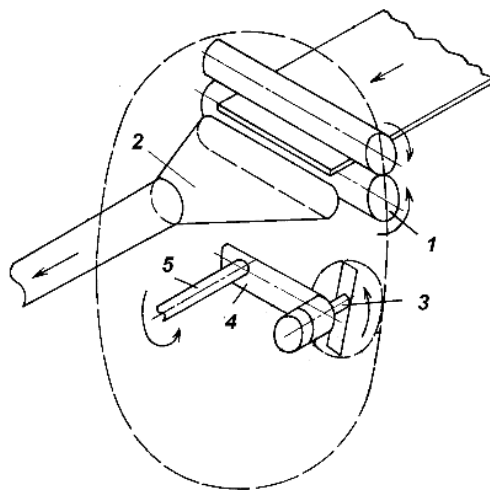


Рисунок 1.7 – Устройство для непрерывной рубки нити, жгута, ленты и тому подобного материала:

1 – подающее приспособление, 2 – сопло, 3 – рубящий орган,
4 – водило, 5 – приводной вал

Устройство для осуществления способа содержит подающее приспособление 1, рубящий орган 3, закрепленный на приводном валу его привода, водило рубящего органа 4, закрепленное одним его концом на приводном валу 5 его привода, и камеру пневмоудаления рубленого продукта, выполненную в виде сопла 2, раструбом обращенного к подающему приспособлению, а узкой частью присоединенного к вакуумному насосу. При этом корпус привода рубящего органа закреплен на другом конце водила, рубящий орган выполнен в виде пластины, диска, крестовины или другого плоского элемента [53].

Также российскими учеными разработано устройство для повторяющейся выдачи пучков со случайной ориентацией волокон (рисунок 1.8).

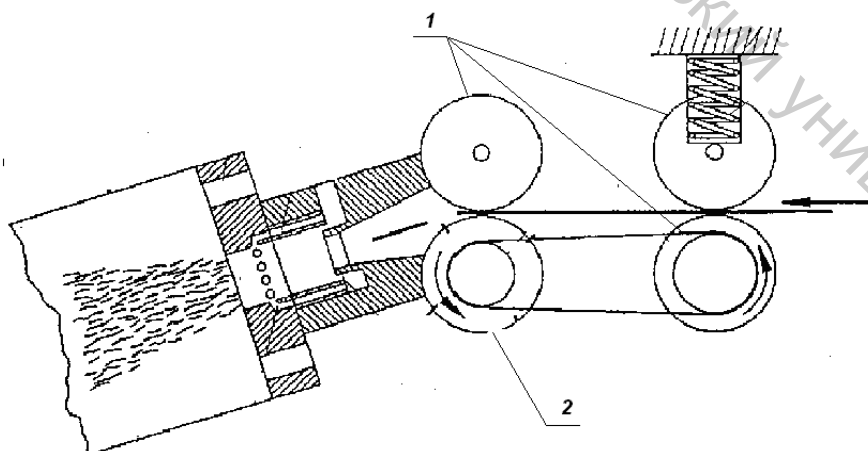


Рисунок 1.8 – Устройство для повторяющейся выдачи пучков со случайной ориентацией волокон:

1 – прижимные подающие ролики, 2 – ролик с ножевыми пластинами

Устройство позволяет получать заготовки в виде хлопьев достаточно высокого качества, а также делает возможным автоматизирование добавки усиливающих волокон в продукт [54]. Подача материала в зону резания осуществляется прижимными роликами 1, резание – роликом с ножевыми пластинами 2.

Известны контактные способы рубки нити, жгута или ленты, которые предполагают подачу материала в зону контакта рубящего органа и прижимного элемента, захват и рубку материала на плоскости или между двумя опорами. В устройствах, реализующих известные способы, рубящим органом является нож, лезвие которого тупится и вызывает необходимость в остановках процесса рубки на замену или заточку лезвия. В качестве прижимного элемента, а также плоскости, на которой производится рубка, в известных устройствах используют резиновый валик или диск, которые также приходится заменять по мере их износа. Известен способ рубки стеклонити, заключающийся в подаче нити между упругим и ножевыми валами и в рубке ее на отрезки путем заглубления ножей в упругий вал [55]; способ рубки жгутов, заключающийся в подаче жгутов между валком, имеющим эластичное покрытие, и ножами и рубке их на отрезки определенной величины за счет контакта, совершающего планетарное движение вала с ножами [56]. В этих способах используются устройства, работающие по принципу «контакта» ножей с прижимным элементом со всеми вышеописанными последствиями этого (затупление ножей, выход из строя эластичного покрытия прижимного элемента).

Анализ литературных источников показал, что наиболее приемлемым для измельчения вторичных материальных ресурсов в виде текстильных отходов является процесс резания по принципу ножниц. Исследованием данных процессов занимались многие ученые, в работах которых рассматривается механика ножниц, описывается методика экспериментов, приводятся некоторые результаты, которые могут быть применены в технологии подготовки ВМР к производству НМ. Вопросы геометрии ножниц изложены в работах И.И. Капустина [37], К.А. Гаврилова [57]. Процесс резания древесины изложен в работе И.Т. Глебова [58], где рассматриваются вопросы взаимодействия лезвия с разрезаемым материалом, приводятся рекомендации по выбору геометрии лезвий и режимов резания. Авторы утверждают, что скольжение при резании оказывает большое влияние на величину усилий резания и предлагают экспериментальные зависимости для учета этого влияния.

В настоящее время в разработках способов и устройств для непрерывной рубки различных материалов на отрезки заданной длины появилась необходимость универсализации как способов, так и устройств. Известные на данный момент способы и устройства для рубки рассчитаны, как правило, на конкретный вид материала, что резко

ограничивает их возможности. Способы и устройства для рубки волокна или нити не пригодны для рубки жгута или ленты и наоборот. Способы и устройства для рубки низкопрочного материала непригодны для рубки высокопрочного материала. Способы и устройства для рубки лент из неволокнистых материалов типа пленочных низкопроизводительны и маломощны.

Однако необходимо отметить, что вопросы резания текстильных материалов изучены недостаточно. Отсутствуют какие-либо рекомендации по выбору режущего инструмента, определению усилий резания, расчету необходимого скоростного режима, расходу мощности на резание при измельчении упругопластичных материалов.

1.4 Перспективные направления расширения ассортимента нетканых композиционных материалов

В настоящее время использование нетканых композиционных материалов в различных отраслях оказывает большое влияние на общество; в основном это касается аспектов устойчивого развития предприятия, страны и охраны окружающей среды [59]. Многие направления связаны с улучшением и повышением свойств традиционных материалов посредством введения в них различного вида каких либо добавочных продуктов. Также введены могут быть и текстильные отходы, что не только снизит энергопотребление при разработке новых материалов, но и увеличит их жизненный цикл, при одновременном снижении воздействия на окружающую среду при сжигании и хранении отходов на свалках [60].

Волокна, извлеченные из отходов, могут быть использованы для армирования бетона. Преимущества использования таких переработанных волокон, как правило, включают более низкую стоимость переработки по сравнению с первичными волокнами и устранение необходимости утилизации отходов на свалках. Использование текстильных волокон при изготовлении бетона может решить две проблемы, а именно устранение загрязнителя окружающей среды и предоставление альтернативного материала для строительной промышленности [61].

Известен композиционный материал в виде бетонного полотна, представляющий собой пропитанную бетоном ткань, которая в процессе взаимодействия с водой застывает и создает прочный, тонкий, стойкий к огню и воде слой бетона. Стандартное бетонное полотно в своей структуре включает 3-мерные волокна, которые пропитываются специальной бетонной смесью (рисунок 1.9) [62].

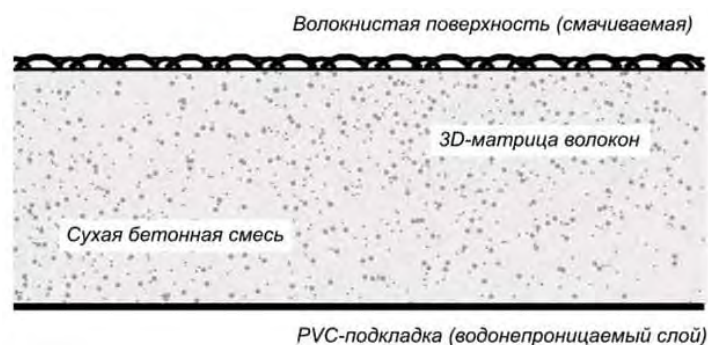


Рисунок 1.9 – Структура бетонного полотна

Благодаря особому расположению волокон ткани полотно после первого взаимодействия с водой становится водонепроницаемым. Первичная гидратация осуществляется методом распыления или полного погружения материала в воду. После того, как покрытие установлено, оно схватывается и создает прочный слой, не боящийся внешних воздействий и исключающий возможность распространения трещин [62].

Такой материал стелют в местах, где есть контакт с водой: отделяют каналы, дренажные канавы, иные сооружения. Довольно часто бетонную ткань используют для гидроизоляции колодцев, бассейнов, что позволяет выполнять качественный ремонт канализационных емкостей, систем. Также полотно подходит для обработки труб, перемычек в шахтах, создания дамб [62].

Армированные волокнами нетканые композиционные материалы имеют широкий спектр возможностей для их использования в строительной индустрии, благодаря своим характеристикам, таким как: снижение затрат на техническое обслуживание (отсутствие краски, отсутствие распада, отсутствие насекомых), низкий нагрев, небольшая стоимость и высокая прочность конструкции [63].

Звукоизоляционные материалы хорошего качества могут быть успешно изготовлены из гранулированной смеси отходов ковровых покрытий [64, 65]. Такие изоляционные материалы обладают следующими преимуществами: экологически приемлемый, простой и эффективный процесс, низкие энергозатраты, хорошие свойства конечного продукта, сопоставимые со свойствами обычного изоляционного материала, огнестойкая отделка, экономические затраты на конверсию [60].

Широко волокна используются в производстве битумных мастик, которые представляют собой однородную массу из нефтяных битумов, пылевидных или волокнистых наполнителей (известняковый, доломитовый, кварцевый порошки, тальк или асбест 7-го сорта, минеральное волокно), антисептиков и добавок. Наполнители

позволяют уменьшить расход битума и его хрупкость, повысить теплостойкость [66, 67].

Таким образом, выявлены следующие направления создания новых видов нетканых композиционных материалов:

- расширение области применения за счет вариативности компонентов и их исходных свойств;
- варьирование свойств готовых КМ путем создания гибридных КМ;
- проектирование материалов под заданные требования эксплуатации.

Анализ способов получения нетканых композиционных материалов показал, что существующие технологии ориентированы на потребление дорогостоящего сырья, применение сложного и энергоемкого оборудования, введение дополнительных этапов технологического процесса их производства.

Поэтому разработка технологии получения новых нетканых композиционных материалов с применением текстильных отходов является актуальной задачей и обеспечивает наиболее рациональный способ использования отходов с целью расширения ассортимента высококачественной продукции, пользующейся спросом.

Введение текстильных отходов в состав нетканых композиционных материалов предполагает их подготовку к вторичной переработке в виде измельчения. При анализе литературных источников установлено, что отсутствуют рекомендации и методы управления процессом резания именно текстильных отходов с учетом их видов, структуры и свойств. Актуальной является задача определения влияния основных технологических и конструктивных параметров оборудования на качество резания и стабильность выполнения технологических операций механического резания, исследование силовых факторов процесса резания упругопластичных материалов.

2 ПОДГОТОВКА ТЕКСТИЛЬНЫХ ОТХОДОВ К ВТОРИЧНОЙ ИХ ПЕРЕРАБОТКЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Сотрудниками УО «ВГТУ» рассмотрен ряд проблем, связанных с разработкой новых видов композиционных материалов, а также вопросы получения материалов с использованием отходов текстильного производства. Разработка технологических процессов формирования композиционных материалов базируется на результатах проведенных ранее исследований [68–72]. Использование в качестве компонента вторичных материальных ресурсов увеличивает область применения текстильных отходов, позволяет получать композиционные материалы и изделия из них с низкой себестоимостью.

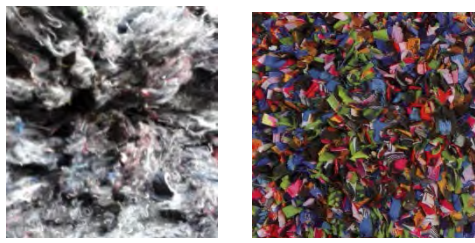
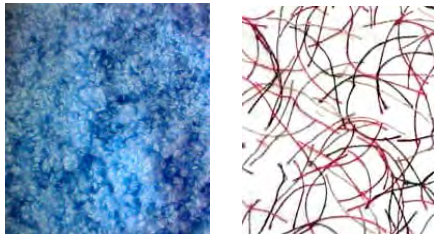
2.1 Характеристика используемых видов текстильных отходов

Для разработки новых видов нетканых композиционных материалов предлагается использовать отходы предприятий по производству ковровых изделий, швейных и текстильных предприятий. В зависимости от места образования отходов их внешний вид, структура и свойства будут различные (таблица 2.1). Предварительно определена область их применения.

Вопросы использования этих отходов для выпуска изделий решаются индивидуально на каждом предприятии, но их переработка является неэффективной [73]. Была поставлена задача изготовления полноценных изделий из текстильных отходов, которые до настоящего времени не подвергались вторичной переработке или перерабатывались не полностью. Изучены существующие процессы и методы переработки отходов на действующих предприятиях; ассортимент изделий, выпускаемый в цехах производства изделий бытового назначения. Переработка таких отходов чаще всего нерентабельна в связи с большими затратами труда и вспомогательных материалов для изготовления изделий из отходов [75]. Однако при предварительной подготовке производства и незначительной модернизации средства будут оправданы.

В зависимости от конечного продукта, его области применения, способа получения могут быть использованы различные текстильные отходы. Например, в качестве основного сырьевого компонента для производства композиционных материалов с волокнистым покрытием для отделки помещений предлагается использовать концы ленты, пряжи – отходы текстильного производства, химических нитей, а также некондиционные изделия: нити непрокрашенные, с поврежденной паковкой, загрязненные, неравномерные по линейной плотности.

Таблица 2.1 – Виды текстильных отходов для производства нетканых композиционных материалов

Место образования	Наименование отходов	Внешний вид		Предполагаемая область использования
		до измельчения	после измельчения	
Предприятия по производству одежды	Межлекальные выпады в виде лоскута. Состав отходов зависит от ассортимента предприятия, в основном смешанный (из различных волокон)			Технология нетканых композиционных шумо- и теплоизоляционных материалов для строительства, машиностроения и одежды специального назначения
Предприятия по производству пряжи, нитей, тканей	Волокнистая масса в виде слетов, путанки. Состав может быть однородный (из натуральных, искусственных или синтетических волокон), неоднородный или смешанный (из различных волокон)			Технология композиционных материалов для отделки помещений
Предприятия по производству ковровых изделий	Кромка грунтовой ткани. Обрезки кромки с ворсом из текстурированных жгутовых нитей не более 10 рядов, шириной 3-10 см			Технология композиционных материалов, а именно модифицированных бетонов, битумов, мастик, асфальтобетонов и НМ
Предприятия по производству мебели	Межлекальные выпады в виде лоскута материалов повышенной плотности и жесткости			Технология нетканых композиционных шумо- и теплоизоляционных материалов для строительства и машиностроения

Отходы химических нитей образуются на предприятиях «Химволокно» г. Гродно, г. Могилев, г. Светлогорск и подразделяются на: отходы нитей с бобин после формования (отходы невытянутых нитей); отходы вытянутых нитей и волокна, поступающие в виде путанки, т.е. пучков перепутанных волокон и нитей различной длины; волокнистые отходы – чистые отходы фильерного волокна [67, 72, 73].

Для материалов строительного назначения с целью тепло- и шумоизоляции могут быть использованы межлекальные выпадки, образующиеся при раскрое деталей на швейных предприятиях, отходы производства ковровых изделий. Данные отходы, как правило, не перерабатывают из-за трудоемкости и неэкономичности процессов дополнительной сортировки, резки, прочесывания, рыхления и т.д. Состав отходов может быть различным: вискозные, полиамидные, полиэфирные и другие их сочетания.

Свойства отходов химических нитей, используемые при изготовлении композиционных нетканых материалов декоративного назначения с волокнистым покрытием, представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Характеристика сырья в виде слетов, путанки 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, °С	- не плавится, разрушается 150-160	170 215	235 255
Влажность, %	11,0-13,0	2,4-2,8	0,4-0,6
Объемная плотность, г/см ³	1,52	1,14	1,38

Состав, объемная плотность, размер нарезки текстильных отходов будут обуславливать не только свойства, структуру, внешний вид готовых композиционных нетканых материалов, но и параметры работы оборудования как для подготовки, так и для формирования [75].

В технологии композиционных материалов для строительства в виде модифицированных бетонов, битумов, мастик, асфальтобетонов также могут быть использованы отходы коврового и швейного

производства. В таблице 2.3 представлена характеристика основных свойств кромки грунтовой ткани.

Таблица 2.3 – Свойства кромки грунтовой ткани

Наименование	Состав	Ширина, см	Поверхностная плотность, г/м ²
Обрезки кромки грунтовой ткани	полипропилен, полиамид, полиэфир, аппретирующая смесь	5–7	388

Свойства составляющих кромки грунтовой ткани представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Свойства составляющих кромки грунтовой ткани

Вид составляющих	Процентное содержание в кромке, %	Температура плавления, °С	Температура воспламенения, °С	Морозостойкость, °С	Влагопоглощаемость
Полипропилен	20,0	130-170	325-350	-15÷-20	малая
Полиамид	12,5	254-260	355-435	-40÷-50	высокая
Полиэфир	14,6	255-260	341-349	до -60	высокая
Аппретирующая смесь	52,9				

Отходы швейного производства различны не только по волокнистому составу, но и по своим размерам. Также отходы представляют собой мерный и весовой лоскут, отходы по длине и ширине настила [67, 76, 77].

Состав отходов в виде межлекальных выпадов зависит от ассортимента предприятия, в основном смешанный (из различных волокон).

При производстве композиционных материалов текстильные отходы нельзя использовать в чистом виде из-за разности их размеров (длин), поэтому необходимо подготовить их к вторичной переработке. Подготовка заключается в измельчении и смешивании продукта с целью получения однородной по физико-механическим свойствам массы. Геометрия частиц и их природа оказывают значительное влияние на качество проектируемых материалов.

Для получения однородной волокнистой массы текстильные отходы необходимо подвергнуть процессу измельчения. Выбор способа, типа и рациональной конструкции машины для измельчения базируется на анализе свойств текстильных отходов с учетом размера измельченного материала и требований к размерам и качеству готового продукта.

Для подготовки волокнистой массы предлагается 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 [50, 79, 80].

2.2 Технологический процесс подготовки текстильных отходов в виде слетов, путанки химических нитей

2.2.1 Устройство для измельчения химических нитей

При изучении и эксплуатации современных резальных машин в производственных условиях установлено, что они недостаточно полно удовлетворяют необходимым требованиям по измельчению. Прежде всего, это связано с наличием непрорезов, оплавлением и разволокнением концов нарезаемого продукта, что приводит к существенному снижению производительности труда и оборудования, увеличению количества отходов, снижению качества продукта и получаемых из него готовых изделий.

С целью улучшения внешнего вида продукции предприятиями по изготовлению композиционных нетканых материалов декоративного назначения для отделки помещений в виде настенных покрытий может использоваться добавление измельченных комплексных химических нитей.

Для измельчения нитей, отходов нитей и пряжи различного состава, с возможностью регулирования длины нарезки и удовлетворительным качеством реза предлагается устройство (рисунок 2.1) [67, 72].

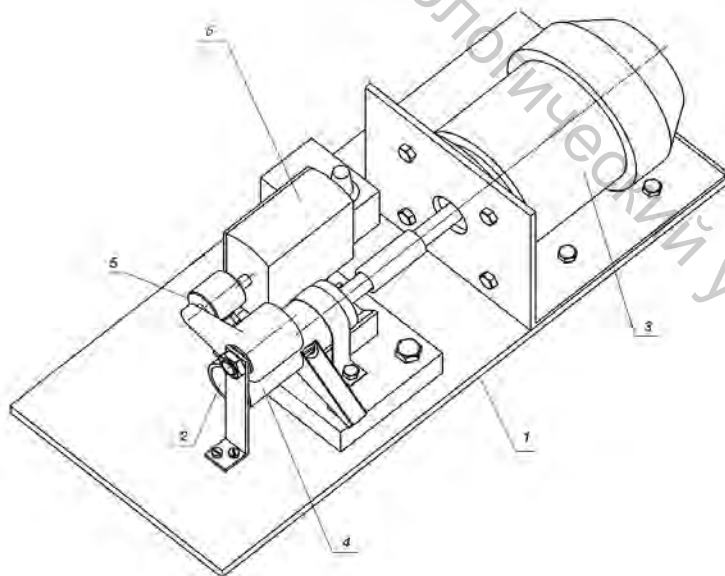


Рисунок 2.1 – Устройство для измельчения отходов химических нитей:
1 – опорная станина, 2 – фреза, 3 – электродвигатель механизма резания,
4 – резальная втулка, 5 – прижимной валик, 6 – электродвигатель механизма подачи

Устройство в сборке представляет собой конструкцию, состоящую из узла нарезки и узла подачи материала в зону резания, представленную на рисунке 2.1. Устройство, расположенное на опорной станине 1, состоит из фрезы 2, которая установлена на приводном валу двигателя 3 и смонтирована в резальной втулке 4; направляющих втулок для подачи материала в зону резания, одна из которых закреплена на опорной станине, а другая смонтирована в резальной втулке; прижимных валиков 5, один из которых закреплён на приводном валу двигателя 6, а второй установлен на опорной станине устройства [67, 72].

При оптимизации режимов резания и выборе принципа работы устройства учитываются: данные по обрабатываемому материалу – линейная плотность, жесткость нитей; данные по измельчителю – размерная характеристика, диапазоны частот вращения, подачи, максимальная толщина резания, мощность резания, тип режущего инструмента, геометрические параметры режущей кромки [67, 72].

Резание материала представляет процесс, определяемый физико-механическими свойствами разрезаемого материала, геометрией режущего инструмента и взаимным движением материала и инструмента. В процессе резания происходит раздвигание материала режущим инструментом, имеющим заточку в форме клина. В зависимости от характера движения инструмента угол резания может быть равен углу заточки инструмента или меньше его. Соотношение этих углов влияет на чистоту срезанного слоя материала и величину усилия резания [67, 72].

Выбор принципа резания определяется его возможностью обеспечить выполнение технических требований, предъявляемых к измельченному материалу по длине нарезки и качеству реза. Для удовлетворения всех предъявляемых требований к готовому продукту, согласно используемому устройству, выбран принцип комбинированного резания цилиндрической фрезой с вращательным движением фрезы и поступательным движением материала, схожий с принципом разрезания материалов методом ножниц.

Устройство (рисунок 2.1) осуществляет резание нитей на длину в диапазоне 0,5–15 мм. Регулирование длины нарезки производится изменением скорости вращения подающих валиков или скорости вращения режущего инструмента.

2.2.2 Теоретические исследования процесса резания химических нитей

2.2.2.1 Узел резания химических нитей

При комбинированном резании осевая цилиндрическая фреза работает в условиях свободного резания, поэтому на каждом ее зубе имеется только одно лезвие, являющееся главным. Главные лезвия фрезы являются винтовыми линиями, накрученными на цилиндр диаметром D_ϕ , а γ – угол наклона винтовой канавки. Число ножей ножевого барабана выбирают в зависимости от его диаметра D_ϕ (м) по эмпирической формуле [81]

$$z = k\sqrt{D_\phi}, \text{ шт.}, \quad (2.1)$$

где k – коэффициент пропорциональности, зависящий от назначения и конструкции ножей (прямые или спиралеобразные).

Согласно В.Ф. Боброву [81] установлено, что при резании материала толщиной t_m (м) и подачей на зуб S_z максимальное число ножей z может быть определено по формуле

$$z = \frac{0,2D_\phi}{t_{m \max}^{0.5} S_{z \max}^{0.5}}. \quad (2.2)$$

Из формулы следует, что при увеличении толщины материала и скорости подачи число ножей ножевого барабана должно быть уменьшено. В этом случае t_m – расстояние между двумя зубьями по торцу – торцевой шаг равен

$$t_m = \frac{\pi D_\phi}{z}, \text{ м.} \quad (2.3)$$

Расстояние t_0 между двумя зубьями вдоль оси фрезы – осевой шаг. Связь между осевым и торцевым шагами выражается формулой

$$t_0 = t_m \operatorname{ctg} \gamma, \text{ м.} \quad (2.4)$$

Передняя поверхность зуба фрезы является линейчатой винтовой поверхностью. На рисунке 2.2 представлены основные геометрические параметры осевой цилиндрической фрезы.

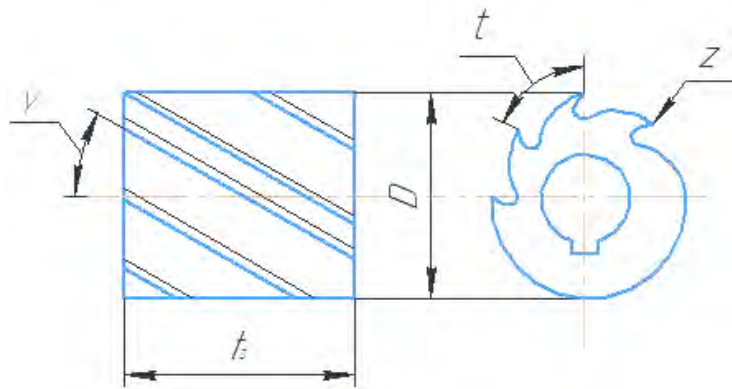


Рисунок 2.2 – Геометрические параметры осевой цилиндрической фрезы:

γ – угол наклона винтовой канавки ($25-35^\circ$), t_m – торцевой шаг,
 t_0 – осевой шаг, z – число ножей (4 шт.)

Узел резания в готовом виде представлен на рисунке 2.3.

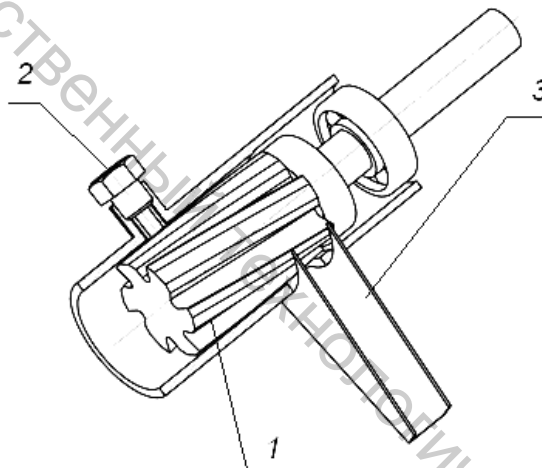


Рисунок 2.3 – Узел резания:

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

Каждый зуб фрезы в процессе резания совершает циклоидальное движение [81]. Траекторией относительного рабочего движения любой точки лезвия является циклоида. Вращение фрезы является движением резания. Скорость резания определяется по формуле [81]

$$V_{рез} = \frac{\pi D_{\phi} n_{\phi}}{1000}, \text{ м/с}, \quad (2.5)$$

где n_{ϕ} – частота вращения фрезы, с^{-1} .

Скорость резания равна окружной скорости вращения фрезы.

2.2.2.2 Узел подачи материала в зону резания

Перемещение материала по касательной к окружности фрезы является движением подачи. Так как фреза является многозубым инструментом, то различают минутную подачу S_m (мм/мин, м/с), подачу на оборот и подачу на зуб S_z (рисунок 2.4). При резании происходит сочетание направлений вращения фрезы и перемещение материала, так как в нашем случае векторы скорости резания и подачи направлены в одну сторону, резание будет попутным [72].

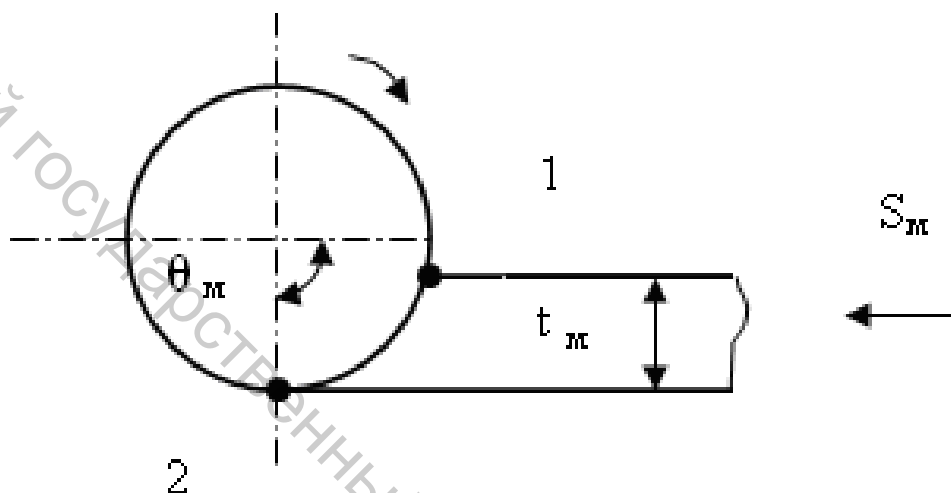


Рисунок 2.4 – Элементы резания

Из рисунка 2.4 видно, что зуб фрезы вступает в работу в точке 1 и выходит из соприкосновения со срезаемым материалом в точке 2. Таким образом, за один оборот фрезы зуб совершает два цикла: рабочий, соответствующий дуге 1,2, и холостой, соответствующий дуге 2,1. Периодически повторяющиеся чередования рабочего и холостого циклов зуба фрезы (циклическая прерывистость процесса резания) являются особенностью такого вида резания. Угол θ_m , соответствующий началу и концу рабочего цикла зуба фрезы, – максимальный угол контакта.

Мгновенная толщина срезаемого слоя не зависит от угла наклона винтовой канавки. Мгновенную толщину срезаемого слоя a^* можно определить по формуле [81]

$$a^* = S_z \sin \theta_m, \text{ м.} \quad (2.6)$$

С целью измельчения нитей различного состава, поверхностной плотности, длины и толщины используется узел подачи материала в зону резания (рисунок 2.5) [72].

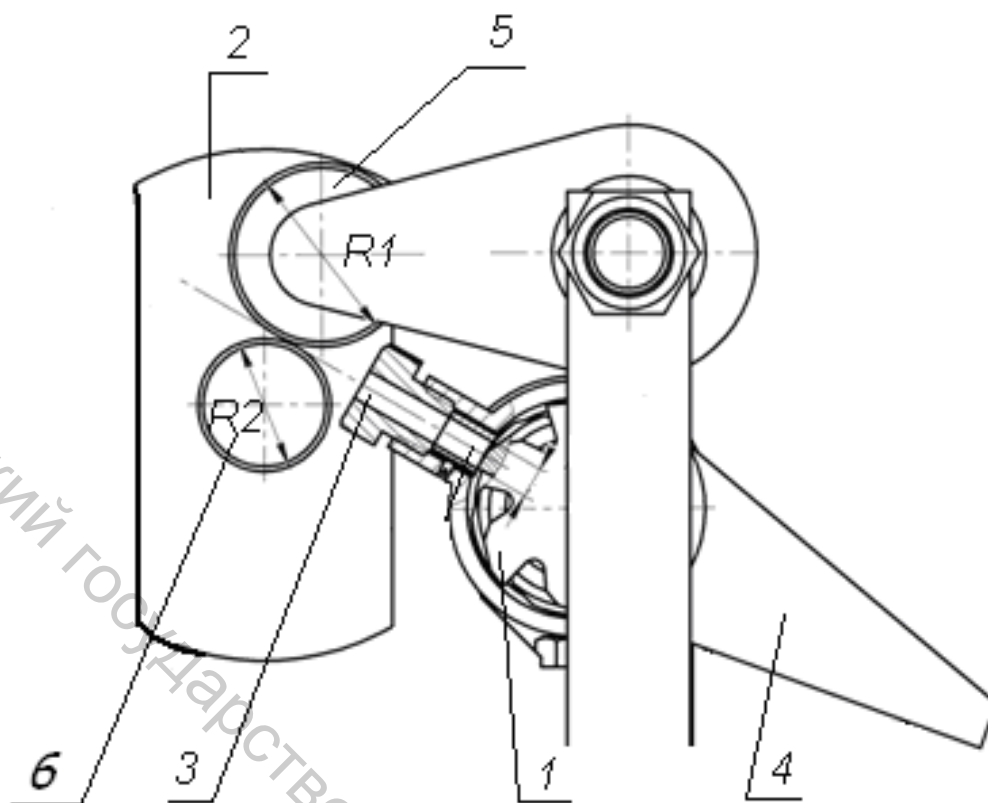


Рисунок 2.5 – Устройство подачи материала в зону резания:
1 – фреза, 2 – двигатель, 3 – направляющая для подачи материала в зону резания, 4 – направляющая для выхода продукта, 6, 7 – прижимные валики

Фреза 1 установлена на приводном валу двигателя и смонтирована в резальной втулке; направляющая втулка для подачи материала в зону резания 3, которая смонтирована в резальной втулке; прижимные валики 5, 6, один из которых закреплен на приводном валу двигателя 2, а второй установлен на опорной станине устройства [72].

Режимом резания является совокупность значений скорости резания $V_{рез}$ и скорости подачи $V_{под}$. Возможны три варианта регулирования процесса резания: изменение одной скорости подачи или одной скорости резания; одновременное, зависимое и прямо пропорциональное изменение скорости резания и подачи; зависимое непропорциональное изменение скоростей резания и подачи [81].

Подача – относительное перемещение жгута нитей к ножевому барабану при его вращении, осуществляется в горизонтальной плоскости. При заданной длине нарезки – l (м)

$$V_{под} = \frac{l}{t}, \text{ м/с,} \quad (2.7)$$

где t – время продвижения материала на длину l , с.

Угловая скорость ножевого барабана

$$W_{\phi} = \frac{2\pi}{zt} \quad \text{или} \quad W = \frac{2\pi V_{\text{под}}}{zl}, \quad \text{с}^{-1}, \quad (2.8)$$

где z – количество зубьев фрезы (ножей), шт.

Следовательно, скорость подачи равна

$$V_{\text{под}} = \frac{zlW_{\phi}}{2\pi}, \quad \text{или} \quad V_{\text{под}} = \frac{l n_{\phi} z}{2\pi}, \quad \text{м/с}.$$

Тогда длина нарезки равна

$$l = \frac{V_{\text{под}}}{n_{\phi} z}, \quad \text{м}. \quad (2.9)$$

Значение подачи материала на один зуб фрезы связано с подачей материала в минуту S_m соотношением

$$S_z = \frac{S_m}{n_{\phi} z}. \quad (2.10)$$

Так как $n_{\phi} = \frac{30W_{\phi}}{\pi}$, получаем

$$S_z = \frac{S_m \pi}{30W_{\phi} z}. \quad (2.11)$$

Тогда мгновенная толщина срезаемого слоя равна

$$a = \frac{S_m \pi}{30W_z} \sin \theta_m. \quad (2.12)$$

Максимальная длина нарезки зависит от высоты зуба фрезы.

Формула (2.9) может быть использована для определения длины резки при заданных параметрах работы устройства. На рисунке 2.6 представлены зависимости длины нарезки от скорости подачи и частоты вращения ротора [80].

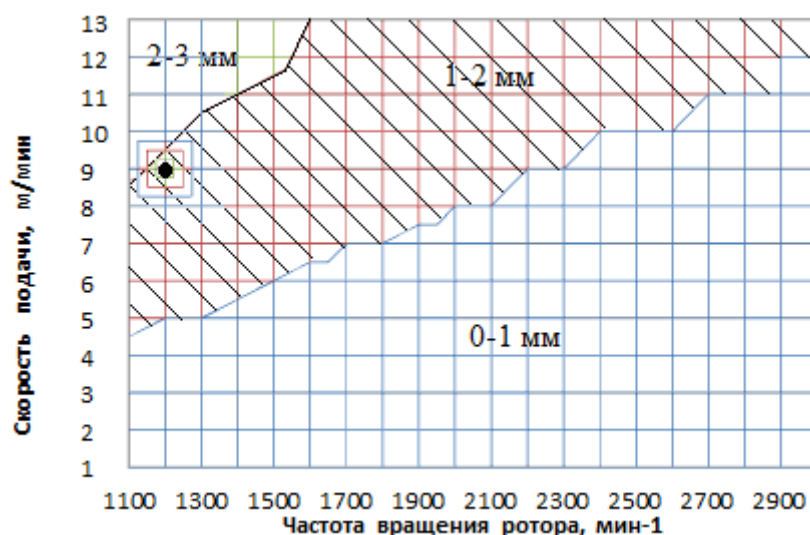


Рисунок 2.6 – График зависимости длины резки от параметров работы устройства для измельчения

2.2.3 Экспериментальные исследования процесса резания химических нитей

Для подтверждения расчетных значений был проведен эксперимент. Принятые при проведении эксперимента параметры работы измельчающего устройства выбраны на основании расчетных данных и представлены в таблице 2.5 [72].

Таблица 2.5 – Основные конструктивные параметры устройства для измельчения при проведении испытаний

Показатель	Единицы измерения	Значение
Конечный продукт	-	волокнистая масса
Зазор ротора во втулке	мм	0,02-0,04
Частота вращения ротора	мин ⁻¹	1200
Скорость подачи	м/мин	9

Судить о характере распределения волокон в волокнистой массе по длине можно по диаграмме распределения, представленной на рисунке 2.7.

Для волокон рассчитана среднеарифметическая длина – L_a [38]

$$L_a = \frac{l_1 n_1 + l_2 n_2 + l_i n_i}{n_1 + n_2 + n_i} = \frac{197,1}{100} = 1,971 \text{ , мм,} \quad (2.13)$$

где $n_1, n_2 \dots n_i$ – количество отрезков длиной $l_1, l_2 \dots l_i$ соответственно.

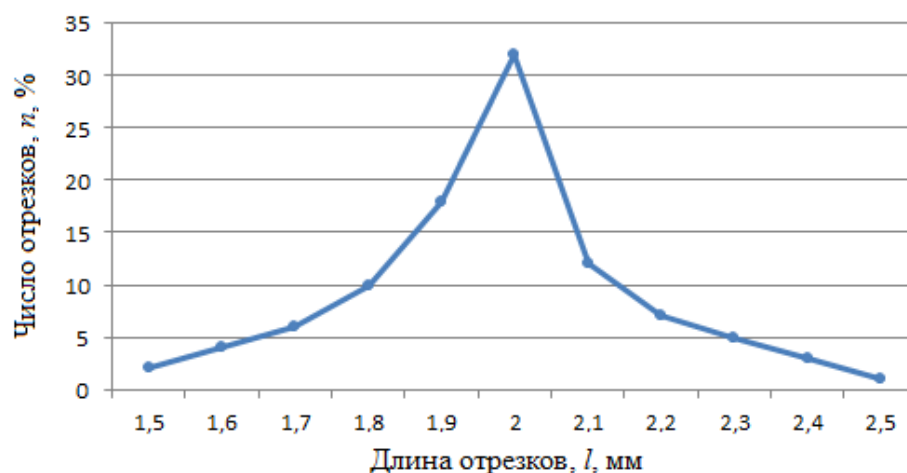


Рисунок 2.7 – Диаграмма распределения длин волокон в волокнистой массе

Анализ диаграммы распределения (рисунок 2.7) свидетельствует о том, что в процессе измельчения получена волокнистая масса необходимой длины резки 1,5–2,5 мм, что подтверждает расчеты (рисунок 2.6). Теоретически при используемых параметрах работы оборудования длина резки равна 1,9 мм (рисунок 2.6).

С целью определения оптимальной длины нарезки отходов нитей для использования их в КМ декоративного назначения в виде покрывного слоя бумажного полотна был проведен эксперимент. Исследовалась зависимость стойкости покрытия к истиранию от длины нарезки. Были наработаны 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 2.8). При увеличении длины частиц стойкость к истиранию готового полотна снижается, а потери покрытия увеличиваются [72].

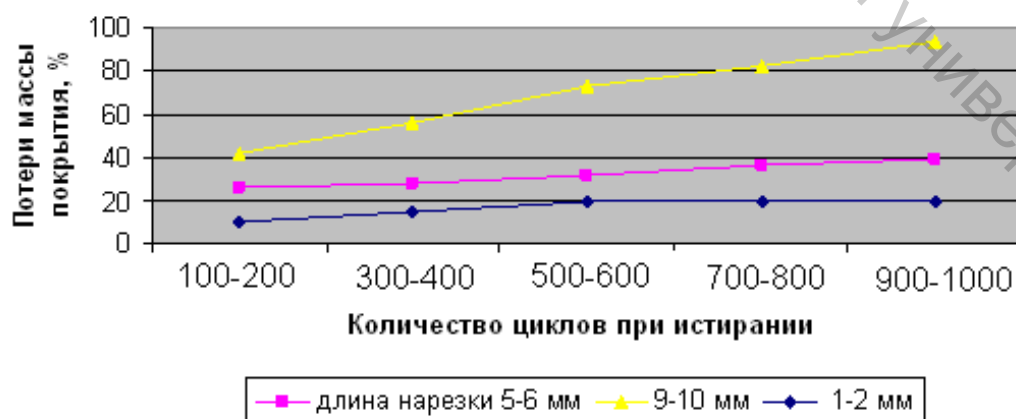


Рисунок 2.8 – Потеря массы покрытия при истирании полотна в зависимости от длины нарезки

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. В производстве настенных покрытий на линии предусмотрена укатка покрытия, в этом случае длина частиц не влияет на стойкость к истиранию, а обуславливает только внешний вид готового полотна [72].

2.3 Технологический процесс подготовки текстильных отходов в виде межлекальных выпадов, отходов кромки грунтовой ткани и лоскута материалов повышенной плотности и жесткости

2.3.1 Характеристика оборудования для измельчения

Подготовка текстильных отходов в виде межлекальных выпадов, отходов кромки грунтовой ткани и лоскута материалов повышенной плотности и жесткости заключается в их измельчении. Так отходы имеют различные размеры, для их измельчения чаще всего используют ножевые дробилки и барабанные мельницы (роторные дробилки). Для подготовки текстильных отходов предлагается использовать универсальный роторный измельчитель ИУР 200 производства «Металлополимер» г. Гомель (рисунок 2.9). Устройство роторного измельчителя представлено на рисунке 2.10 [82].



Рисунок 2.9 –
Универсальный роторный
измельчитель ИУР 200

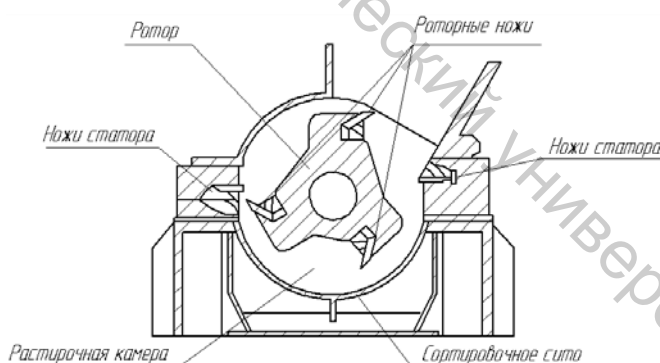


Рисунок 2.10 – Устройство роторного
измельчителя ИУР 200

Характеристика предлагаемого для измельчения оборудования представлена в таблице 2.6 [82].

Таблица 2.6 – Универсальный роторный измельчитель ИУР 200

Наименование параметра	Величина параметра
Производительность, кг/ч (в зависимости от измельчаемого материала)	до 200
Частота вращения ножевого ротора, об/мин	900
Число ножей ротора, шт.	3
Число неподвижных ножей, шт.	2
Диаметр ножевого ротора по кромкам ножей, мм	200
Рабочая длина ножей, мм	250
Привод ножевого ротора двигатель АИР132S4У3	N = 7,5 кВт, n = 1440 об/мин
Габаритные размеры измельчителя, мм	
- длина	410,5
- ширина	610
- высота	1395
Масса, кг	400±20

Основные параметры измельчительного оборудования, которые представлены в таблице 2.6, обеспечивают принципиальную возможность получать частицы волокнистого материала необходимого размера, однако не дают полного представления о процессе подготовки текстильных отходов к вторичной переработке.

Актуальными остаются вопросы продолжительности процесса резания, повышения производительности работы измельчителя за счет увеличения частоты вращения ротора и качества получаемой смеси частиц при определенных параметрах процесса резания.

Для решения перечисленных вопросов необходимо решить следующие задачи:

- исследовать технологический процесс получения однородной волокнистой массы из текстильных отходов;
- установить степень влияния исследуемых технологических параметров процесса подготовки на качество получаемой волокнистой массы;
- определить оптимальные технологические параметры работы измельчителя для получения волокнистой массы с заданными показателями качества.

2.3.2 Теоретические исследования процесса резания текстильных отходов в виде лоскута

Эффективность и качество полученного волокнистого материала в процессе измельчения текстильных отходов в виде межлекальных выпадов, отходов кромки грунтовой ткани и лоскута зависят от

рационального проведения процессов обработки их резанием, которое достигается в том случае, если:

- режущая часть инструмента имеет оптимальные геометрические параметры и качественную заточку лезвий;
- резание материалов осуществляется с технически и экономически обоснованными подачами материала и скоростями резания;
- максимально используются возможности механизмов оборудования для измельчения [79].

Современные тенденции развития машиностроения, связанные с автоматизацией производственных процессов, созданием новых видов материалов с еще недостаточно изученными свойствами, требуют поиска новых подходов к исследованию процесса резания, основанных на достижениях фундаментальных наук, разработки новых видов обработки резанием, режущих инструментов и станков [83].

На практике для определения режимов резания пользуются одним из методов расчета:

- 1) табличным (выбор параметров режима резания по специальным таблицам);
- 2) аналитическим (расчет по эмпирическим зависимостям);
- 3) графическим (построением графических зависимостей номограмм в логарифмической системе координат).

Аналитическое описание процесса резания текстильных материалов возможно лишь при выявлении взаимосвязи между следующими группами факторов, влияющих на ход процесса и определяющих его результаты: технологическими требованиями к процессу, деформационно-прочностными свойствами материалов, типом и характеристиками режущего инструмента и оборудования, характером и параметрами деформационно-разрушающего воздействия, особенностями силового взаимодействия лезвия с объектом обработки [80].

Целью исследований является разработка аналитических выражений и математических моделей расчета технологических параметров оборудования для измельчения текстильных отходов. Как отмечалось ранее, текстильные отходы в виде кромок, обрезки, межлекальных выпадов имеют различные размеры, для их измельчения чаще всего используют ножевые дробилки и барабанные мельницы (роторные дробилки).

Основной характеристикой процесса измельчения является степень измельчения (i), которая определяется соотношением средневзвешенных размеров частиц материала до и после измельчения:

$$i = \frac{d_n}{d_k}, \quad (2.14)$$

где d_n – размер частиц до измельчения, мм; d_k – размер частиц после измельчения, мм.

Степень измельчения отражает технологию и определяет параметры измельчителей. Требуемый размер частиц после измельчения зависит от области их дальнейшего применения.

Производительность роторных дробилок Q определяют по формуле:

$$Q = W \frac{(D-d)^2}{8} h \cdot z, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.15)$$

где h – высота ножа, м; D – диаметр ротора по кромке ножей, м; W – угловая скорость ротора (ножевого барабана), с^{-1} ; d – диаметр ротора у основания ножей, м; z – количество ножей.

Тогда производительность по массе равна

$$Q_m = Q \cdot \rho, \text{ кг/с}, \quad (2.16)$$

где ρ – плотность материала, кг/м^3 .

$$Q_m = W \frac{(D-d)^2}{8} h \cdot z \cdot \rho. \quad (2.17)$$

Большой диаметр ротора позволяет:

- установить большое количество ножей при постоянном шаге, благодаря чему минутная подача на нож возрастает, а, следовательно, повышается производительность;
- увеличить массу ротора и длину дуги контакта ротора с материалом, что улучшает теплоотвод, а, следовательно, увеличивается стойкость ножей и самого ротора к износу;
- сделать большое посадочное отверстие, т. е. применить более жесткую оправку, что позволит вращаться ротору на высоких скоростях без вибрации [80].

Однако увеличение диаметра ротора повышает крутящий момент, а, следовательно, и расход энергии; увеличивает расход стали для изготовления режущего инструмента. Поэтому необходимо подбирать конструкцию ротора с наибольшим диаметром посадочного отверстия и возможно меньшим наружным диаметром. Число ножей – важный элемент ротора в измельчителе, от которого зависит торцевой шаг и работоспособность ротора. Чем меньше количество ножей у ротора одного и того же диаметра, тем больше объем канавок для размещения волокнистого материала. Также чем больше ножей, тем меньше величина сил резания, приходящаяся на один нож. Поэтому число

ножей должно быть оптимальным. Следовательно, расчет конструктивных элементов ротора сводится к определению его диаметра, числа ножей, диаметра оправки ротора, а также расчету элементов ножей – их высоты [80].

Особенности процесса резания с помощью роторного измельчителя:

- каждый нож работает с перерывами, периодически цепляя материал (рисунок 2.11). Отрицательным в данном случае является то, что врезание ножа в материал происходит с ударом;
- срезаемый материал должен свободно размещаться во впадине между ножами, а поэтому объем впадины должен быть больше объема срезаемого материала.

Для анализа толщины и площади сечения среза материала сначала определим значение угла контакта δ , т.е. центрального угла, соответствующего дуге контакта ротора с материалом.

Из треугольника OBC

$$\cos \delta = \frac{OC}{OB} = \frac{\frac{D}{2} - t_m}{\frac{D}{2}} = 1 - \frac{2t_m}{D}; \quad \delta = \arccos \left(1 - \frac{2t_m}{D} \right). \quad (2.18)$$

Толщина слоя срезаемого материала a – это расстояние между двумя последовательными положениями траекторий двух смежных ножей, измеренное по нормали, т.е. в радиальном направлении, t_m – толщина материала.

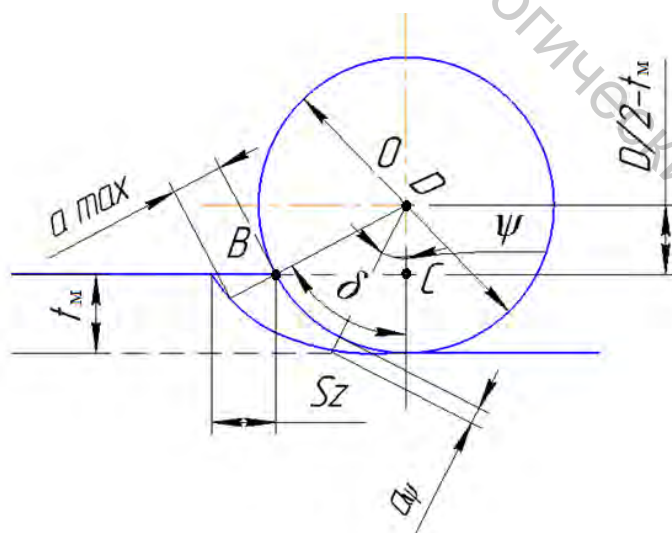


Рисунок 2.11 – Схема срезания материала одним ножом ротора

На рисунке 2.12 точка B соответствует моменту выхода первого ножа из зоны контакта с материалом, точка E – то же для второго ножа, δ – угол контакта [80].

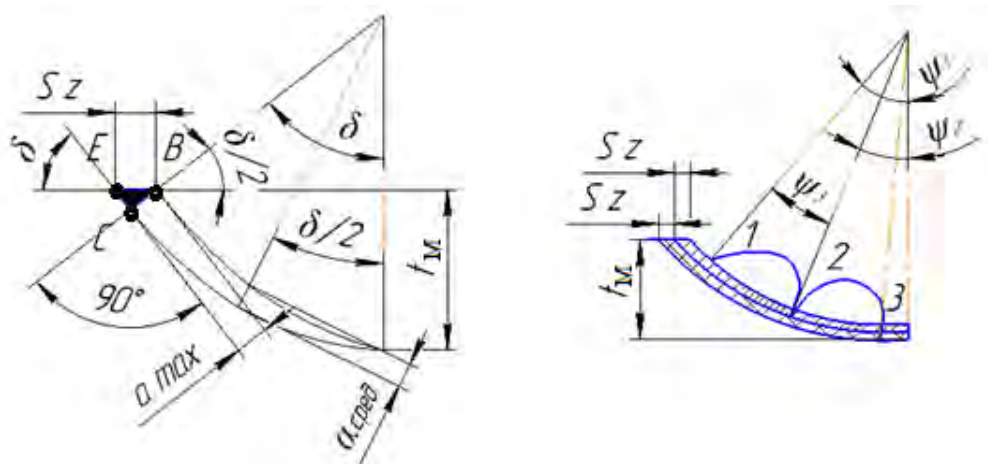


Рисунок 2.12 – Схема определения толщины среза и суммарной площади срезаемого слоя

Из треугольника BCE имеем

$$BC = a_{\max} = S_z \cdot \sin \delta. \quad (2.19)$$

В общем случае

$$a_{\psi} = S_z \cdot \sin \psi. \quad (2.20)$$

где ψ – мгновенный угол контакта, заключенный между вертикалью и радиусом, проведенным в точку контакта вершины ножа с материалом.

Зная ширину среза B (ширина материала, попадающая под нож) и $a_{\max}$, можно определить площадь поперечного сечения среза, снимаемого одним ножом f

$$f = B \cdot a; \quad (2.21)$$

$$f_{\max} = B \cdot a_{\max} = B \cdot S_z \cdot \sin \delta. \quad (2.22)$$

Так как

$$\sin \delta = \sqrt{1 - \cos^2 \delta} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{2t_m}{D}\right)^2} = 2\sqrt{\frac{t_m}{D} - \frac{t_m^2}{D^2}}, \quad (2.23)$$

получаем

$$f_{\max} = 2B \cdot S_z \sqrt{\frac{t_m}{D} - \frac{t_m^2}{D^2}}. \quad (2.24)$$

Учитывая, что при измельчении одновременно работают несколько ножей, вводится понятие суммарной площади поперечного

сечения срезаемого слоя. Для ее определения необходимо знать, сколько ножей одновременно находится в работе и мгновенный угол контакта для каждого ножа [80].

Количество одновременно работающих ножей m будет равно

$$m = \frac{\delta}{\eta}, \quad (2.25)$$

где $\eta = \frac{360}{z}$ – центральный угол между двумя соседними ножами.

Учитывая формулу (2.25)

$$m = \frac{\arccos\left(1 - \frac{2t_m}{D}\right) \cdot z}{360}. \quad (2.26)$$

Следовательно, значение m будет тем больше, чем больше t_m , число ножей и чем меньше диаметр ротора по кромкам ножей.

Мгновенные углы контакта для ножей 1, 2, 3 (рисунок 2.13) соответственно равны

$$\psi_1 = \delta; \quad \psi_2 = \delta - \eta; \quad \psi_3 = \delta - 2\eta \quad \text{и т. д.}$$

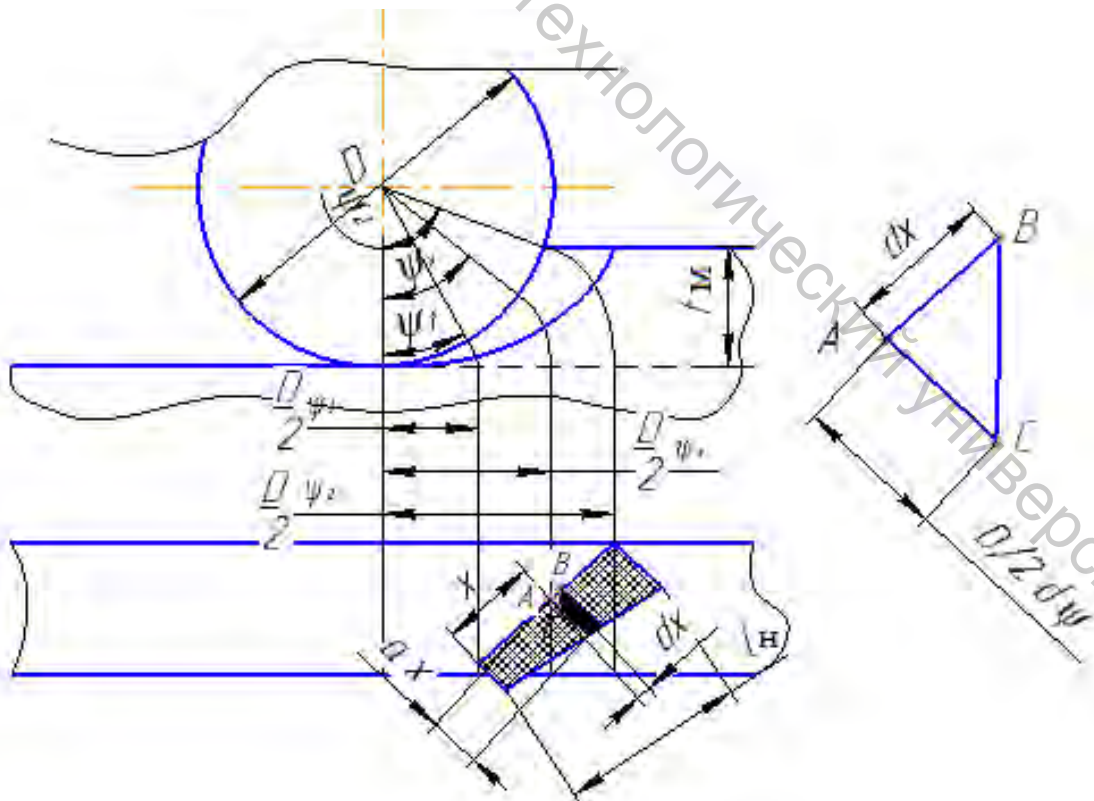


Рисунок 2.13 – Схема определения площади среза

Так как для каждого ножа площадь срезаемого слоя равна

$$f_i = B \cdot S_z \cdot \sin \psi_i, \quad (2.27)$$

суммарная площадь сечения среза

$$F = \sum f_i = B \cdot S_z (\sin \psi_1 + \sin \psi_2 + \dots + \sin \psi_m) = B \cdot S_z \sum_1^m \sin \psi_i. \quad (2.28)$$

Так как f – это сечение среза, снимаемое одним ножом, а l_n – длина ножа, элементарный участок лезвия ножа dx срезает слой толщиной a_x и поперечным сечением

$$df = a_x dx, \quad (2.29)$$

$$dx = \frac{D}{2} \cdot \frac{d\psi}{\sin \gamma^*}, \quad (2.30)$$

где γ^* – угол наклона ножей.
Тогда

$$df = a_x \frac{D}{2} \cdot \frac{d\psi}{\sin \gamma^*} = S_z \sin \psi \frac{D}{2} \cdot \frac{d\psi}{\sin \gamma^*}. \quad (2.31)$$

Следовательно, площадь среза равна

$$f = \int_{\psi_1}^{\psi_2} df = \frac{D}{2} \cdot \frac{S_z}{\sin \gamma^*} \int_{\psi_1}^{\psi_2} \sin \psi d\psi = \frac{D}{2} \cdot \frac{S_z}{\sin \gamma^*} (\cos \psi_1 - \cos \psi_2), \quad (2.32)$$

а для количества ножей равным m

$$F = \sum f = \frac{D}{2} \cdot \frac{S_z}{\sin \gamma^*} \sum_1^m (\cos \psi_1 - \cos \psi_2). \quad (2.33)$$

При мгновенной толщине срезаемого слоя, равной

$$S_z = \frac{S_m \cdot \pi}{30 \cdot W \cdot z} \sin \psi, \quad (2.34)$$

где S_m – подача материала в минуту, мм.

При условии, что материал подается под действием собственной силы тяжести

$$S_z = \frac{\frac{gt_m^2}{2} \cdot \pi}{30 \cdot W \cdot z} \sin \psi = \frac{\frac{mt_m^2}{\rho^* \cdot a^* \cdot t_m^2} \cdot \pi}{30 \cdot W \cdot z} \sin \psi = \frac{m \cdot \pi}{\rho^* \cdot a^* \cdot 60 \cdot W \cdot z} \sin \psi, \quad (2.35)$$

где ρ^* – поверхностная плотность материала, г/м²; a^* – ширина подаваемого материала, м.

Тогда формула (2.33) примет вид

$$F = \frac{D \cdot m \cdot \pi}{120 \cdot \rho^* \cdot a^* \cdot W \cdot z \cdot \sin \gamma} \sum_1^m (\cos \psi_1 - \cos \psi_2). \quad (2.36)$$

2.3.3 Экспериментальные исследования процесса резания текстильных отходов в виде лоскута

Для подтверждения расчетных значений был проведен эксперимент. Принятые при проведении эксперимента параметры работы измельчающего устройства (рисунок 2.9) представлены в таблице 2.7. Поверхностная плотность испытуемых образцов равна 200 г/м².

Таблица 2.7 – Основные параметры устройства для измельчения при проведении испытаний

Показатель	Единицы измерения	Значение
Диаметр ножевого ротора по кромкам ножей	мм	200
Рабочая длина ножей	мм	250
Частота вращения ротора	мин ⁻¹	900
Число ножей	шт	3
Угол наклона ножей	град	45

Значения площади частиц, полученные экспериментальным и теоретическим путем, представлены на рисунке 2.14.

Из рисунка 2.14 видно, что значение площади частицы, полученной расчетным путем, – 4,6 мм², попадает в интервал 4,0–5,8 мм² размеров частиц, полученных в результате проведенного эксперимента [80].

В результате произведен анализ основных закономерностей процесса резания текстильных материалов в виде лоскута. Установлено, что, варьируя технологическими параметрами режущего инструмента: количеством ножей, диаметром ротора, высотой, длиной ножей и углом их наклона волокнистая масса достигает равномерной консистенции, а размеры частиц измельчаются до требуемой величины. Получена математическая модель (формула 2.36) для определения показателей измельчения материалов с позиции размера частиц в общей волокнистой массе.

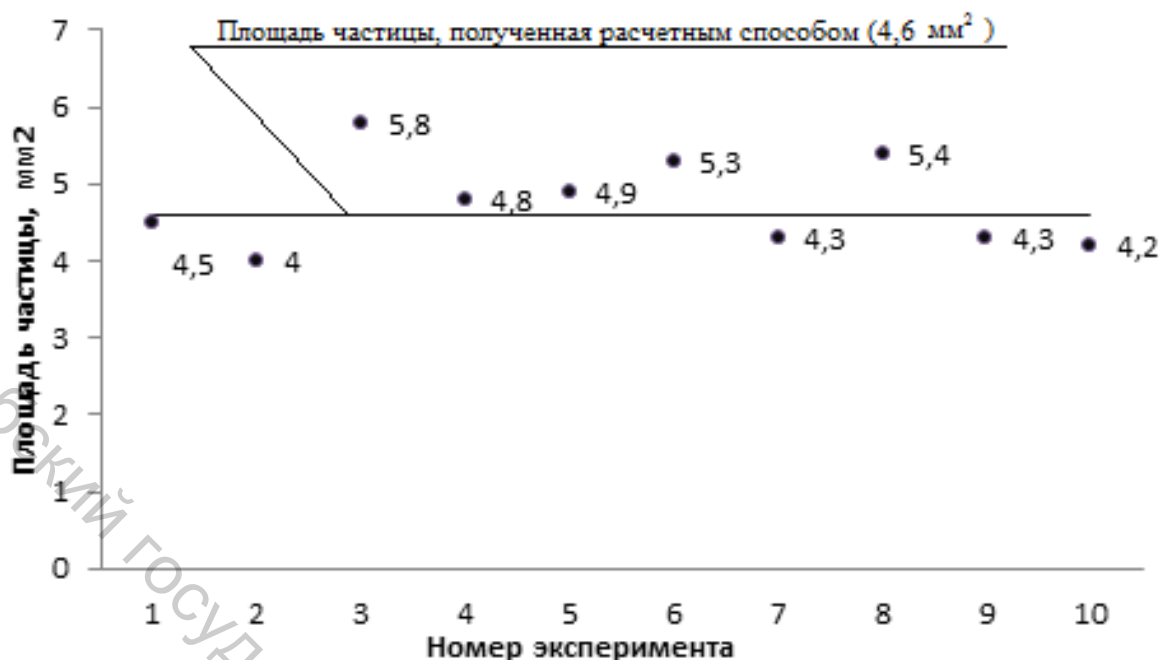


Рисунок 2.14 – Результаты замеров частиц, полученные расчетным и экспериментальным способами

2.3.4 Теоретические исследования процесса резания текстильных отходов в виде лоскута материалов повышенной плотности и жесткости

Проблемами математического описания процессов разрушения, происходящих при измельчении материалов, занимаются ученые в области механики контактного взаимодействия, в прикладной и строительной механике. В данном случае речь идёт о дроблении отходов прокладочных материалов повышенной жесткости и плотности – анизотропного материала, физико-механические свойства которого варьируются в широком диапазоне.

Под законом дробления понимают зависимость между работой, затраченной на измельчение, и степенью измельчения продукта. Риттингер рассмотрел задачу о разделении одиночного куба на более мелкие. Согласно предположению Риттингера, работа дробления прямо пропорциональна площади вновь образованной поверхности [81]:

$$A = \sigma' \Delta s, \quad (2.37)$$

где σ' – коэффициент пропорциональности, Дж/м²; Δs – площадь вновь образованной поверхности, м².

Степень измельчения i :

$$i = \frac{D'}{d'} , \quad (2.38)$$

где D' – размер измельчаемого куска, м; d' – размер куска продукта измельчения, м.

Размеры D' , d' в теории определяются несколькими способами, например, как среднее арифметическое либо среднее геометрическое граней тела (куска). В этом случае для куба размер куска совпадёт по значению с длиной одной грани.

Очевидно, что число вновь образованных кусков кубической формы размером d' , образующихся при измельчении кубического куска размером D' , определится из соотношения:

$$n' = \frac{D'^3}{d'^3} . \quad (2.39)$$

Тогда, с учётом обозначения (2.38), при дроблении идеального куба число вновь образованных кусков кубической формы также определится по формуле:

$$n' = \frac{D'^3}{\left(\frac{D'}{i}\right)^3} . \quad (2.40)$$

При разрушении куска кубической формы с размером D , площадь вновь образованной поверхности определится по формуле:

$$\Delta s = 6d'^2 n' - 6D'^2 . \quad (2.41)$$

С учётом формул (2.38), (2.40) представим выражение (2.41) следующим образом:

$$\Delta s = 6 \left(\frac{D'}{i}\right)^2 \frac{D'^3}{\left(\frac{D'}{i}\right)^3} - 6D'^2 = 6D'^2(i-1) . \quad (2.42)$$

Вновь обратимся к формулировке Риттингера (2.37), в которую подставим выражение для площади по (2.42):

$$A = 6\sigma' D'^2(i-1) . \quad (2.43)$$

Упростим запись формулы (2.43):

$$A = k_R D'^2, \quad (2.44)$$

где k_R – коэффициент пропорциональности.

Также известен закон Кирпичева-Кика, который основан на законе подобия, известном из сопротивления материалов: подобным деформациям геометрически подобных и физически одинаковых тел соответствуют работы, пропорциональные объемам тел [84]. Математическое выражение закона следующее:

$$A = k_K V' = k_K D'^3, \quad (2.45)$$

где k_K – коэффициент пропорциональности; V' – объем куска в форме куба с ребром D .

П.А. Ребиндер предположил, что, поскольку разрушение наступает после деформации куска, полная работа дробления складывается из работы по образованию новых поверхностей и разрушения тела [84]:

$$A = k_R D'^2 + k_K D'^3. \quad (2.46)$$

Ф. Бонд предложил считать работу дробления одного куска среднему геометрическому из объема и площади поверхности куска [84]:

$$A = k_B \sqrt{D'^2 D'^3} = k_B D'^{2.5}, \quad (2.47)$$

где k_B – коэффициент пропорциональности.

Формулы (2.44), (2.45), (2.47) отличаются между собой коэффициентами пропорциональности и показателями степени при размере куска, подлежащего дроблению. В общем виде законы дробления можно представить формулой [85]:

$$A = k D'^{m'}, \quad (2.48)$$

где k – коэффициент пропорциональности; m' – показатель степени при размере куска, подлежащего дроблению.

Если у нас осуществляется дробление материала массой Q , который состоит из кусков N , тогда формула (2.12) примет вид:

$$A_{Q'} = kD'^{m'} N = kD'^{m'} \frac{Q'}{\rho D'^3} = k_1 D'^{m'-3} Q' , \quad (2.49)$$

где ρ – плотность материала; k_1 – коэффициент пропорциональности $k_1 = \frac{k}{\rho}$.

Для дальнейшего решения реальный материал, состоящий из кусков до и после дробления, заменяется идеальным, состоящим из кусков правильной кубической формы и одинаковых по размеру.

Обозначим средние размеры кусков исходного материала и продукта измельчения D'_{cp} и d'_{cp} соответственно. Условимся также, что материал измельчается в n'' стадий, после каждой из которых степень дробления равна r' . Тогда общая степень измельчения за n'' стадий равна:

$$i = r'^{n''} . \quad (2.50)$$

Размеры кусков, поступающих в последовательные стадии дробления, таким образом, представятся следующим рядом:

$$D'_{cp}, \frac{D'_{cp}}{r'^1}, \frac{D'_{cp}}{r'^2}, \dots, \frac{D'_{cp}}{r'^{n''-1}} . \quad (2.51)$$

Тогда, по формуле (2.49) и (2.51) работа измельчения материала массой Q' на каждой стадии будет составлять:

$$A_1 = k_1 D'^{m'-3}_{cp} Q' , \dots, A_{n''} = k_1 \left(\frac{D'_{cp}}{r'^{n''-1}} \right)^{m'-3} Q' . \quad (2.52)$$

В итоге работа измельчения материала определится как сумма работ по стадиям, то есть:

$$\begin{aligned} A_{Q'} &= k_1 D'^{m'-3}_{cp} Q' + k_1 \left(\frac{D'_{cp}}{r'^1} \right)^{m'-3} + \dots + k_1 \left(\frac{D'_{cp}}{r'^{n''-1}} \right)^{m'-3} = \\ &= k_1 Q' D'^{m'-3}_{cp} \left\{ 1 + \left(\frac{1}{r'^1} \right)^{m'-3} + \dots + \left(\frac{1}{r'^{n''-1}} \right)^{m'-3} \right\} . \end{aligned} \quad (2.53)$$

Сумма членов прогрессии в формуле (2.53) равна:

$$\begin{aligned}
& \frac{\left(\frac{1}{r'^{m'-3}}\right)^{n''-1} \frac{1}{r'^{m'-3}} - 1}{\frac{1}{r^{m-3}} - 1} = \frac{\left(\frac{1}{r'^{m'-3}}\right)^{n''} - 1}{\frac{1}{r'^{m'-3}} - 1} = \frac{\left(\frac{1}{r'^{n''}}\right)^{m'-3} - 1}{\frac{1}{r'^{m'-3}} - 1} = \frac{r'^{m'-3}}{1 - r'^{m'-3}} \cdot \frac{1 - r'^{n'' m'-3}}{r'^{n'' m'-3}} = \\
& = \frac{r'^{m'-3}}{1 - r'^{m'-3}} \cdot \frac{1 - \left(\frac{D'_{cp}}{d'_{cp}}\right)^{m'-3}}{\left(\frac{D'_{cp}}{d'_{cp}}\right)^{m'-3}}
\end{aligned} \tag{2.54}$$

Перепишем формулу (2.53) с учётом выражения (2.54):

$$A_{Q'} = k_1 D'^{m'-3}_{cp} Q' \cdot \frac{r'^{m'-3}}{1 - r'^{m'-3}} \cdot \frac{1 - \left(\frac{D'_{cp}}{d'_{cp}}\right)^{m'-3}}{\left(\frac{D'_{cp}}{d'_{cp}}\right)^{m'-3}}. \tag{2.55}$$

Введём обозначение: $K_1 = k_1 \cdot \frac{r'^{m'-3}}{1 - r'^{m'-3}}$.

Тогда, после ряда преобразований и сокращений, получим по формуле (2.55)

$$A_{Q'} = K_1 Q' \left(d'^{m'-3}_{cp} - D'^{m'-3}_{cp} \right) = K_1 Q' \left(\frac{1}{d'^{3-m'}_{cp}} - \frac{1}{D'^{3-m'}_{cp}} \right). \tag{2.56}$$

Обратим внимание, что величина K_1 включает в себя коэффициент пропорциональности k_1 , обозначающий в общем виде коэффициенты k_R , k_K и k_B , а также величины r' , m' , ρ , не связанные напрямую с параметрами d'_{cp} , D'_{cp} и i . С учётом этого будет корректным при выводе формул для законов измельчения Риттингера, Кирпичева-Кика и Бонда по формуле (2.56) использовать обозначения K_R , K_K , K_B вместо K_1 .

Из формул (2.44), (2.45), (2.47) следует, что показатель степени m' принимает значения 2,3 и 2,5 для законов Риттингера, Кирпичева-Кика и Бонда соответственно [85].

С учетом этого, при $m' = 2$ для закона Риттингера по формуле (2.56) запишем:

$$A_{Q'} = K_R Q' \left(\frac{1}{d'_{cp}} - \frac{1}{D'_{cp}} \right), \quad (2.57)$$

или

$$A_{Q'} = K_R Q' \frac{i-1}{D'_{cp}}. \quad (2.58)$$

Заметим, что, поскольку точную геометрию кусков дробимого материала и продукта его дробления на практике определить затруднительно, в экспериментальных исследованиях в качестве размеров D'_{cp} , d'_{cp} выступают расчётные величины, полученные с использованием диаметров ячеек сит, на которых материал задерживается при сепарации по одной из представленных методик. Так, средние размеры кусков для закона Риттингера вычисляются по формулам:

$$d'_{cp} = \frac{\sum \omega_j}{\sum \frac{\omega_j}{d'_j}}, \quad D'_{cp} = \frac{\sum \omega_j}{\sum \frac{\omega_j}{D'_j}},$$

где ω_j – процент кусков определенной фракции; d'_j , D'_j – средние размеры кусков определенной фракции; j – порядковый номер.

Принимая $m' = 3$ по формуле (2.57), для закона Кирпичева-Кика получим после ряда преобразований для раскрытия неопределённости:

$$A_{Q'} = K_K Q' \left(\ln \frac{1}{d'_{cp}} - \ln \frac{1}{D'_{cp}} \right). \quad (2.59)$$

или

$$A_{Q'} = K_K Q' \cdot \ln i. \quad (2.60)$$

Средние диаметры в этом случае рассчитываются по формулам:

$$d'_{cp} = \frac{\sum \omega_j \ln d'_j}{\sum \omega_j}, \quad D'_{cp} = \frac{\sum \omega_j \ln D'_j}{\sum \omega_j}$$

Наконец, для закона Бонда при $m' = 2,5$ по формуле (2.56) запишем:

$$A_{Q'} = K_B Q' \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{d'_{cp}}} - \frac{1}{\sqrt{D'_{cp}}} \right). \quad (2.61)$$

Средние диаметры в этом случае рассчитываются по формулам:

$$d'_{cp} = \left(\frac{\sum \omega_j}{\sum \frac{\omega_j}{\sqrt{d'_j}}} \right)^2, \quad D'_{cp} = \left(\frac{\sum \omega_j}{\sum \frac{\omega_j}{\sqrt{D'_j}}} \right)^2.$$

Итак, формулы (2.58), (2.60), (2.61) представляют собой математические выражения, предположительно связывающие работу измельчения с массой, крупностью и степенью измельчения кусков материала.

В научной и технической литературе отмечается [128], что три закона измельчения являются приближёнными, и использование каждого из них в тех или иных условиях позволяет описать наблюдаемый процесс измельчения конкретного материала на конкретном оборудовании с разной точностью.

Математические модели (2.58), (2.60), (2.61) содержат в себе неизвестные коэффициенты пропорциональности K_R , K_K и K_B , которые подлежат экспериментальному определению.

Заметим, что в законе измельчения Риттингера (модель 2.58) используется не только очевидный показатель – степень измельчения, но и начальная крупность кусков материала. Таким образом, в число управляемых факторов эксперимента следует включить начальную крупность кусков измельчаемого продукта.

В законе измельчения Бонда (модель 2.61), помимо начальной крупности кусков материала, используется также и крупность продукта измельчения. Таким образом, эксперимент следует провести с учётом необходимости получить возможно больший диапазон крупности частиц измельчённого продукта.

2.3.5 Экспериментальные исследования процесса дробления текстильных отходов в виде лоскута материалов повышенной плотности и жесткости

В экспериментальных исследованиях необходимо проверить соответствие показателей энергоёмкости измельчения текстильных отходов в виде лоскута материалов повышенной плотности и жесткости закону дробления Риттингера, Кирпичева-Кика и Бонда, связывающих работу измельчения и степень измельчения продукта. Для закона дробления, наиболее адекватного процессу измельчения таких отходов, необходимо определить коэффициент пропорциональности, и тогда будет получена научная база для описания процесса их измельчения.

Цель экспериментальных исследований – установить закономерность для оценки затрат энергии, требующейся для измельчения текстильных отходов в виде лоскута материалов повышенной плотности и жесткости в зависимости от степени измельчения i и их относительной влажности W .

Первый этап подготовки экспериментального материала заключался в создании нужной относительной влажности отходов. Использовали три группы влажности: отходы в чистом виде при сборе в раскройных цехах ($W \approx 70\%$), подсушенные на воздухе ($W \approx 65\%$) и подсушенные в сушильной камере ($W \approx 50\%$). Влажность определяли весовым методом.

Затем осуществлялся сам процесс дробления. Для измельчения использовали дробилку фрезерную ДФК256/600У1, установленную в УО «ВГТУ», характеристика которой представлена в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Характеристики дробилки фрезерной – модель ДФК256/600У1

Наименование параметра	Величина параметра
Производительность, кг/ч	50-100
Мощность привода вращения фрезы, кВт	15
Диаметр фрезы, мм	256
Частота вращения фрезы, мин ⁻¹	60
Ход толкателя, мм	600
Скорость перемещения толкателя, мм/мин	100-600

Таблица 2.9 – Матрица планирования эксперимента при определении влияния степени измельчения отходов и их относительной влажности на затраты энергии

Номер опыта	Кодированные значения		Натуральные значения			
			влажность, %	степень измельчения, раз		
	X ₁	X ₂		70±5 см	50±5 см	30±5 см
1	1	1	80	70	50	30
2	1	0	80	35	25	15
3	1	-1	80	23	17	10
4	0	1	65	70	50	30
5	0	0	65	35	25	15
6	0	-1	65	23	17	10
7	-1	1	50	70	50	30
8	-1	0	50	35	25	15
9	-1	-1	50	23	17	10

Дробление проводилось с набором различных по диаметру сит. Куски отходов подбирали приблизительно одинакового размера. Отбирали отходы таким образом, чтобы средняя крупность кусков до измельчения D составляла 70±5 см, 50±5 см и 30±5 см. Для измельчения

брали $10 \pm 0,2$ кг отходов. Степень измельчения оценивали по размеру частиц 3,0 2,0 и 1,0 см (ячейкам сита).

Работу A , совершенную во время измельчения отходов, рассчитывали по графикам потребляемой силы тока при известном напряжении в сети (380 В).

Результаты эксперимента представлены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Результаты проведения эксперимента по измельчению

Номер опыта	Кодированные значения		Экспериментальные значения времени измельчения, с			Затраты энергии, Дж/кг		
	X_1	X_2	70 ± 5 см	50 ± 5 см	30 ± 5 см	70 ± 5 см	50 ± 5 см	30 ± 5 см
1	1	1	965	740	523	402	308	218
2	1	0	929	660	510	387	275	213
3	1	-1	908	660	498	378	275	208
4	0	1	950	730	489	396	304	204
5	0	0	910	690	480	379	288	200
6	0	-1	820	626	465	342	261	194
7	-1	1	836	628	436	348	262	182
8	-1	0	810	610	420	338	254	175
9	-1	-1	785	610	396	327	254	165

Полученные графики зависимости и уравнения представлены на рисунках 2.15–2.17.

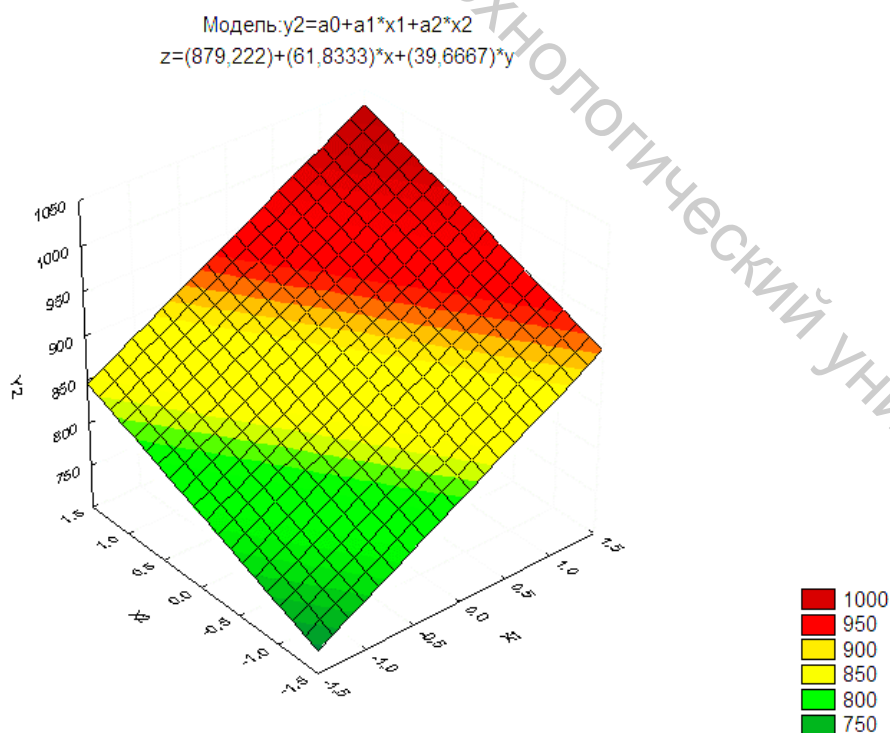


Рисунок 2.15 – График зависимости затрат энергии при дроблении древесных отходов от степени дробления и их влажности при размере отходов 70 ± 5 см

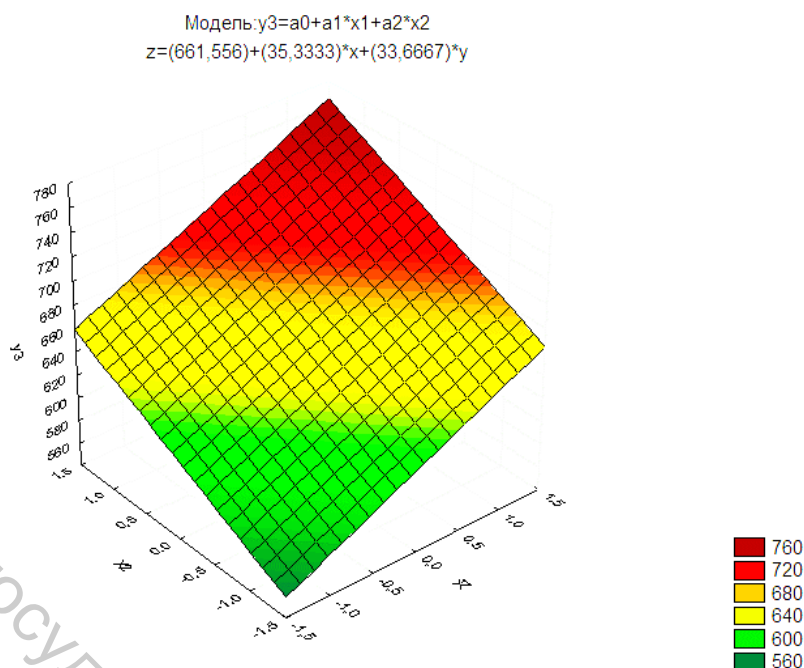


Рисунок 2.16 – График зависимости затрат энергии при дроблении древесных отходов от степени дробления и их влажности при размере отходов 50 ± 5 см

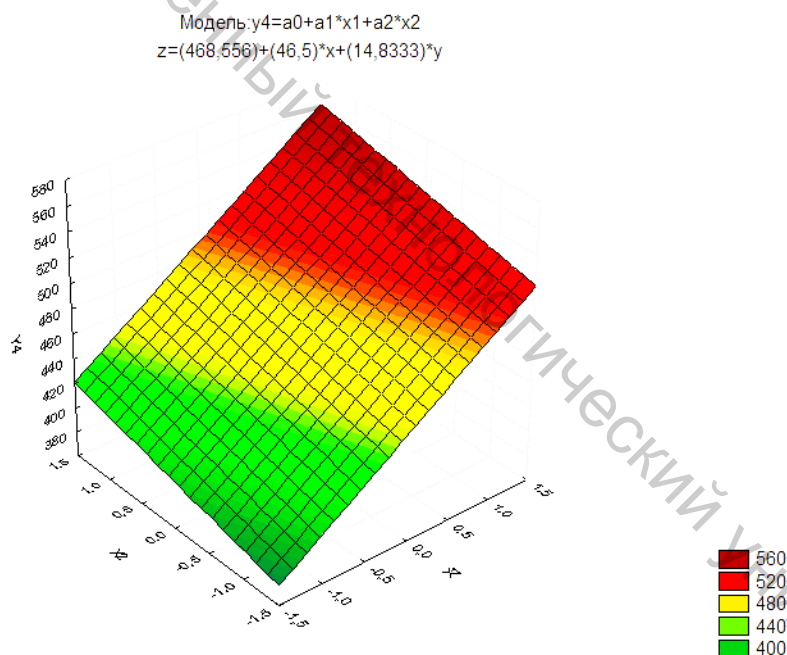


Рисунок 2.17 – График зависимости затрат энергии при дроблении древесных отходов от степени дробления и их влажности при размере отходов 30 ± 5 см

Таким образом, из графиков и полученных уравнений очевидна зависимость от степени измельчения и влажности отходов. Составим уравнение зависимости данных показателей на основании средневзвешенных коэффициентов пропорциональности входных параметров (таблица 2.11).

Таблица 2.11 – Значения коэффициентов

Коэффициент	Экспериментальные значения			Средневзвешанное значение коэффициента
	70±5 см	50±5 см	30±5 см	
a ₀	879,222	661,556	468,556	724,5
a ₁	61,833	35,333	46,500	49,9
a ₂	39,667	33,667	14,833	32,7

$$a_{0_{\text{средневз}}} = \frac{879,222 \cdot 70 + 661,556 \cdot 50 + 468,556 \cdot 30}{70 + 50 + 30} = 724,5$$

$$a_{1_{\text{средневз}}} = \frac{61,833 \cdot 70 + 35,333 \cdot 50 + 46,500 \cdot 30}{70 + 50 + 30} = 49,9$$

$$a_{2_{\text{средневз}}} = \frac{39,667 \cdot 70 + 33,667 \cdot 50 + 14,833 \cdot 30}{70 + 50 + 30} = 32,7.$$

Тогда уравнение зависимости примет вид:

$$Y' = 724,5 + 49,9X_1' + 32,7X_2' \quad (2.62)$$

где Y' – это энергозатраты, Дж/кг; X_1' – влажность отходов, %; X_2' – степень измельчения отходов.

Из полученной формулы (2.62) видно, что влажность отходов имеет большее значение, чем степень измельчения. Для проверки адекватности полученных экспериментальных значений энергозатрат закону дробления Риттингера, Кирпичева-Кика и Бонда построим графики зависимости энергозатрат от степени измельчения по результатам эксперимента при нормальной влажности, равной 65 % (таблица 2.12).

Таблица 2.12 – Данные для однофакторного эксперимента

№ опыта	Размер отходов до измельчения, см	Степень измельчения, раз	Затраты энергии, Дж/кг
1	70±5	23	820
2		35	910
3		70	950
4	50±5	17	626
5		25	690
6		50	730
7	30±5	10	465
8		15	480
9		30	489

Из графиков, представленных в таблице 2.13, видно, что наиболее точно процесс описывают логарифмическая, степенная и полиномиальная модели.

Следовательно, можно сделать вывод, что полученный процесс дробления материалов повышенной жесткости, согласно полученным экспериментальным значениям энергозатрат, соответствует закону дробления Кирпичева-Кика.

2.4 Анализ силового взаимодействия ножа с материалом в процессе резания

Основополагающей в теории механического резания продолжает оставаться задача наиболее полного описания процессов взаимодействия лезвий с обрабатываемыми материалами, в которую входили бы показатели физико-механических свойств этих материалов и основные технологические параметры управления процессом. Важной задачей является исследование силовых факторов процесса резания, определение влияния основных технологических и конструктивных параметров оборудования на качество обработанной режущим инструментом поверхности (или поверхности реза) и стабильность выполнения технологических операций механического резания.

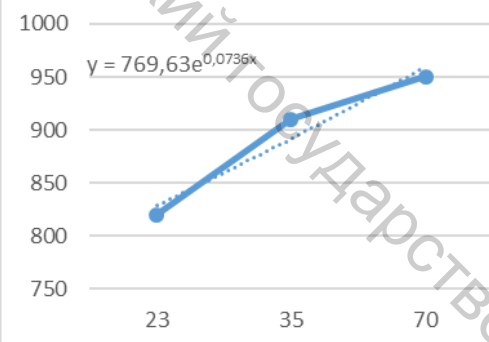
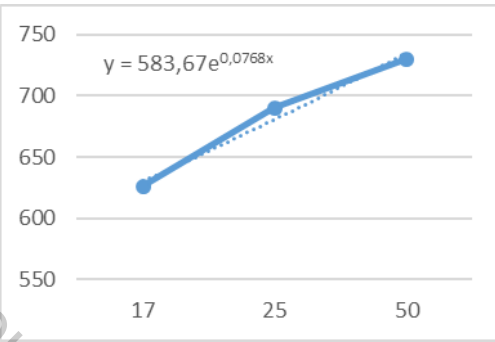
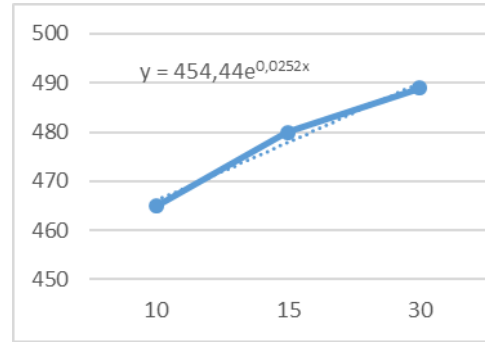
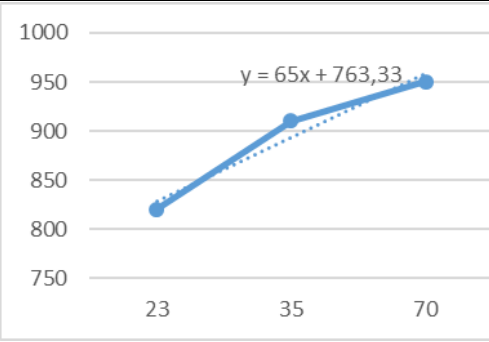
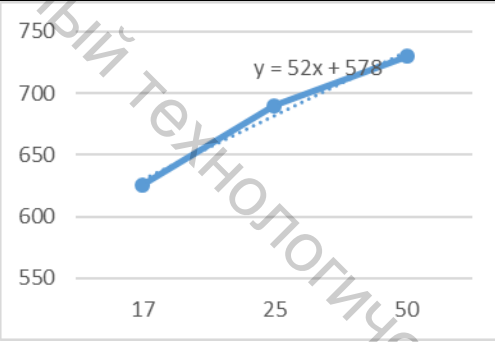
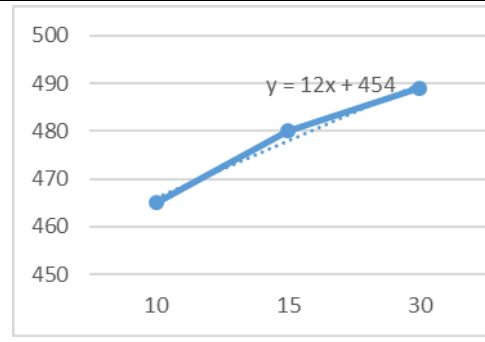
Разделению материала на части под воздействием лезвийного инструмента предшествует процесс предварительного сжатия до возникновения на кромке ножа разрушающего контактного напряжения G_p [86].

Момент возникновения G_p (Па) определяется значением усилия P , прикладываемого к ножу. При резании упругопластических материалов усилие P , при котором завершается процесс сжатия и начинается резание, является максимальным или критическим.

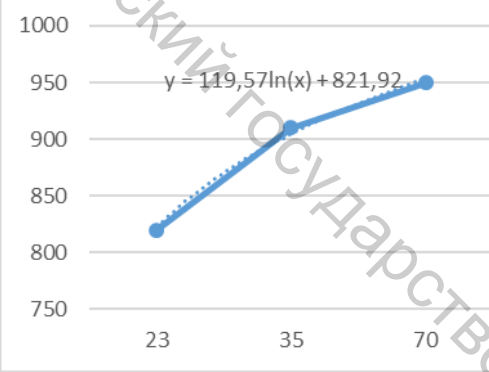
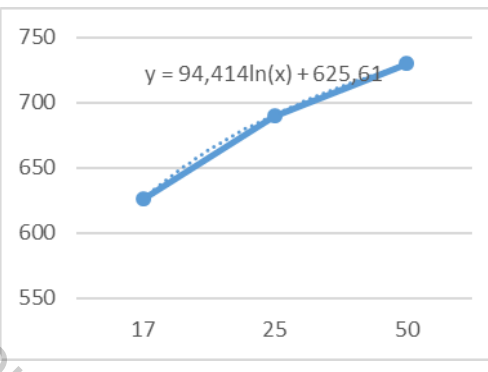
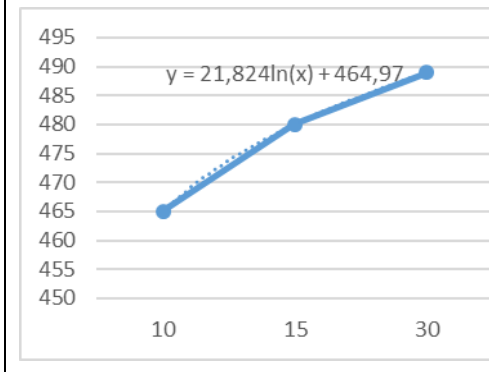
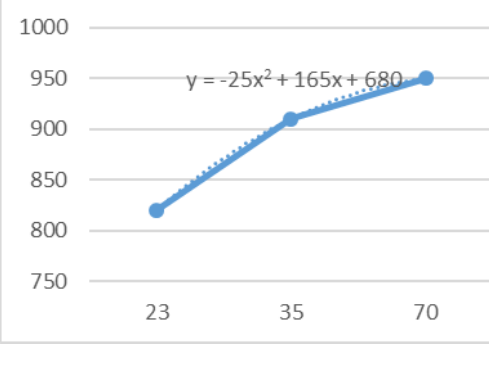
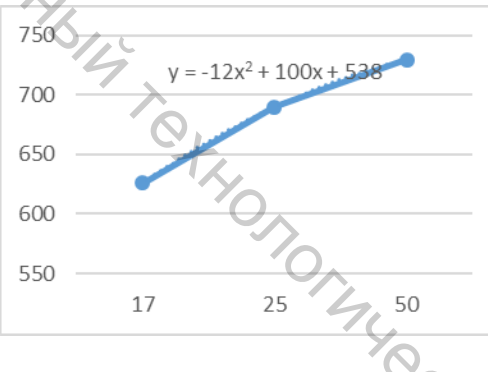
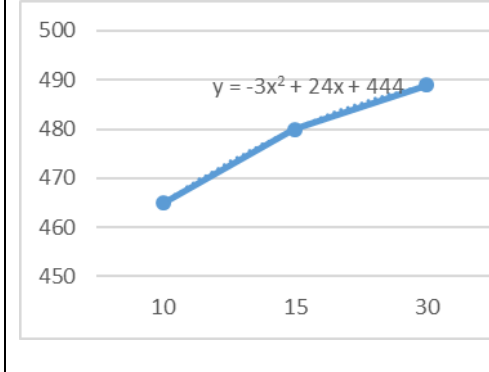
Рассмотрим взаимодействие ножа с односторонней заточкой с разрезаемой нитью (рисунок 2.18). При углублении ножа в нить диаметром d_H (м) на некоторую величину $h_{с.ж}$ (м) на режущей кромке ножа возникает разрушающее контактное напряжение G_p и начинается процесс разрушения нити. На нож действуют следующие силы: $P_{рез}$ – сила сопротивления разрушению материала под кромкой лезвия; $P_{обж}$ – сила обжатия материалом, имеющая горизонтальное направление и действующая на боковую грань лезвия [50, 67].

На наклонную грань ножа действует сила нормального давления N и силы трения T_1 и T_2 .

Таблица 2.13 – Графики зависимости затрат энергии на дробление отходов от степени измельчения

Зависимость	Размер отходов до измельчения, см		
	70±5	50±5	30±5
1	2	3	4
Экспоненциальная			
			

Продолжение таблицы 2.13

1	2	3	4
Логарифмическая	 $y = 119,57\ln(x) + 821,92$	 $y = 94,414\ln(x) + 625,61$	 $y = 21,824\ln(x) + 464,97$
Полиномиальная	 $y = -25x^2 + 165x + 680$	 $y = -12x^2 + 100x + 538$	 $y = -3x^2 + 24x + 444$

Окончание таблицы 2.13

1	2	3	4
Степенная	Graph 2 shows a power-law regression line $y = 822,23x^{0,1357}$ fitted to three data points: (23, 820), (35, 910), and (70, 950). The x-axis ranges from 23 to 70, and the y-axis ranges from 750 to 1000.	Graph 3 shows a power-law regression line $y = 626,06x^{0,14}$ fitted to three data points: (17, 630), (25, 690), and (50, 730). The x-axis ranges from 17 to 50, and the y-axis ranges from 550 to 750.	Graph 4 shows a power-law regression line $y = 465x^{0,0458}$ fitted to three data points: (10, 465), (15, 480), and (30, 490). The x-axis ranges from 10 to 30, and the y-axis ranges from 450 to 495.

Подставив в уравнение (2.68) значение силы N (2.64) и силы трения T_2 (2.65), получим

$$T_2' = \left(\frac{P_z \sin \beta + P_\epsilon \cos \beta}{\sin 2\beta} \right) f \cos \beta, \quad (2.69)$$

$$T_2' = \frac{f}{\sin 2\beta} (0.5 P_z \sin 2\beta + P_\epsilon \cos^2 \beta). \quad (2.70)$$

В момент начала резания сила резания P , приложенная к ножу, равна

$$P = P_{рез} + P_\epsilon + T_1 + T_2', \text{ Н.} \quad (2.71)$$

Определим каждую из составляющих уравнения (2.71)

$$P_{рез} = G_p \delta d_H, \text{ Н} \quad (2.72)$$

или

$$P_{рез} = E \frac{h_{сж}}{d_H} \delta d_H = E h_{сж} \delta, \quad (2.73)$$

где E – модуль упругости нити ($6500-7000 \text{ Н/м}^2$); δ – острота лезвия ($((0,5-1,5)10^{-3})$, м; $h_{сж}$ – величина сжатия материала ($((0,3-0,5)d_H)$, м.

Вертикальная составляющая P_ϵ является сжимающей силой и равна

$$P_\epsilon = E \epsilon h_{сж} \delta, \quad (2.74)$$

где ϵ – относительная деформация в вертикальном направлении

или

$$P_\epsilon = E \frac{h_{сж}^2}{d_H} \delta. \quad (2.75)$$

Сила трения T_1 определяется по формуле (2.67) и равна

$$T_1 = \sqrt{P_z^2 + P_\epsilon^2} \cos \varphi, \quad (2.76)$$

$$P_z = \frac{E}{2(1+\mu)} h_{сж} \delta \cos \beta, \quad (2.77)$$

где μ – коэффициент Пуассона ($0,6 \div 0,7$).

Тогда

$$T_1 = \sqrt{\left(\frac{Eh_{сж}\delta \cos \beta}{2(1+\mu)}\right)^2 + \left(\frac{Eh_{сж}^2\delta}{d_H}\right)^2} \cos \varphi . \quad (2.78)$$

Угол трения φ определяется как $\varphi = \arctg f, f \approx 0,2 \div 0,21$, тогда $\varphi = 6^\circ$, $\cos \varphi = 0,995$.

Вертикальная составляющая силы трения T_2 определяется по формуле (2.70) и равна

$$T_2' = \frac{f}{\sin 2\beta} \left(\frac{0,25Eh_{сж}\delta \cos \beta \sin 2\beta}{1+\mu} + \frac{Eh_{сж}^2\delta \cos^2 \beta}{d_H} \right) \quad (2.79)$$

или

$$T_2' = f \left(\frac{0,25Eh_{сж}\delta \cos \beta}{1+\mu} + \frac{Eh_{сж}^2\delta \cos^2 \beta}{\sin 2\beta} \right), \quad (2.80)$$

$$T_2' = fEh_{сж}\delta \cos \beta \left(\frac{0,25}{1+\mu} + \frac{h_{сж} \cos \beta}{\sin 2\beta} \right) = fEh_{сж} \cos \beta \left(0,145 + \frac{h_{сж}}{2 \sin \beta} \right)$$

или

$$T_2' = fEh_{сж} \left(\frac{0,3 \sin \beta + h_{сж}}{2 \tg \beta} \right). \quad (2.81)$$

Тогда результирующая сила P определяется по формуле

$$P = Eh_{сж}\delta + \frac{Eh_{сж}^2\delta}{d_H} + \sqrt{\left(\frac{Eh_{сж}\delta \cos \beta}{2(1+\mu)}\right)^2 + \left(\frac{Eh_{сж}^2\delta}{d_H}\right)^2} \cos \varphi + fEh_{сж} \left(\frac{0,3 \sin \beta + h_{сж}}{2 \tg \beta} \right). \quad (2.82)$$

При двухсторонней заточке ножа (рисунок 2.19)

$$P = P_{рез} + 2P_{\sigma} + 2T' \quad (2.83)$$

или

$$P = Eh_{сж}\delta + \frac{2Eh_{сж}^2\delta}{d_H} + fEh_{сж} \left(\frac{0,3 \sin \beta + h_{сж}}{\tg \beta} \right). \quad (2.84)$$

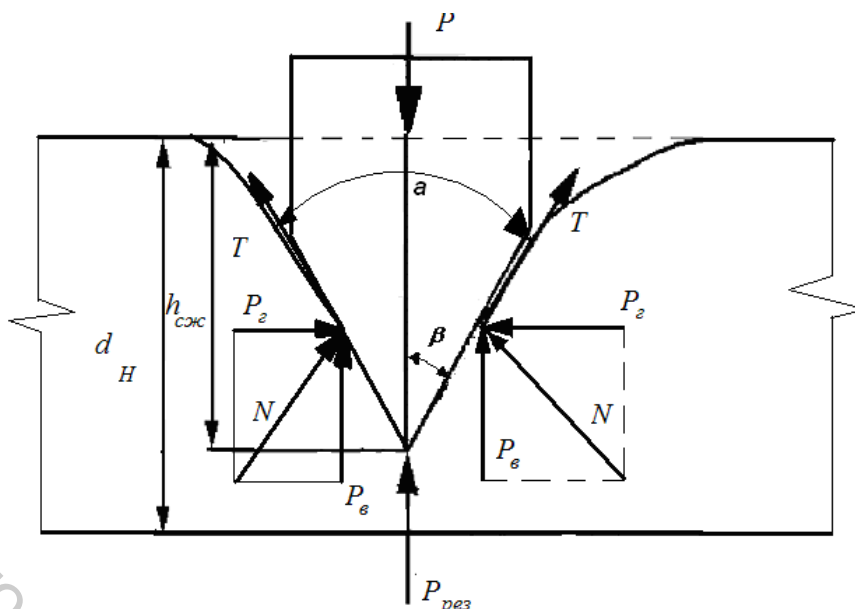


Рисунок 2.19 – Схема взаимодействия ножа с двухсторонней заточкой с нитью в процессе резания

Полученные зависимости (2.82) и (2.84) применимы для описания статического взаимодействия лезвия срезаемого материала (например, нити). Для динамического взаимодействия необходимо учесть эффект «трансформации» угла резания. Соотношение между углом заточки β и углом резания α при известных линейных скоростях подачи $V_{под}$ и скорости резания $V_{рез}$ определяется [86] по формуле

$$\frac{\operatorname{tg} \frac{\beta}{2}}{\sqrt{1 + \frac{V_{рез}^2}{V_{под}^2}}} = \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \quad (2.85)$$

Тогда формулы (2.82) и (2.84) принимают вид:

– для односторонней заточки

$$P = Eh_{сжс} \delta + \frac{Eh_{сжс}^2 \delta}{d_H} + \sqrt{\left(\frac{Eh_{сжс} \delta \cos \alpha}{2(1 + \mu)} \right)^2 + \left(\frac{Eh_{сжс}^2 \delta}{d_H} \right)^2} \cos \varphi + fEh_{сжс} \left(\frac{0,3 \sin \alpha + h_{сжс}}{2 \operatorname{tg} \alpha} \right); \quad (2.86)$$

– для двухсторонней заточки

$$P = Eh_{сжс} \delta + \frac{2Eh_{сжс}^2 \delta}{d_H} + fEh_{сжс} \left(\frac{0,3 \sin \alpha + h_{сжс}}{\operatorname{tg} \alpha} \right). \quad (2.87)$$

Сила трения зависит от вида трущихся поверхностей и свойств материала. При резании нитей в несколько сложенный нож вначале сжимает слои. После предельного сдавливания материала ножом начинается процесс резания. Затем рост сил резания прекращается, что объясняется отсутствием связи между нитями. Профессор Капустин И.И. в своих исследованиях приводит экспериментальные значения усилий резания текстильных материалов [37]. Известные экспериментальные и полученные по формуле (2.86) расчетные значения усилий резания представлены на рисунке 2.20 [50, 67].

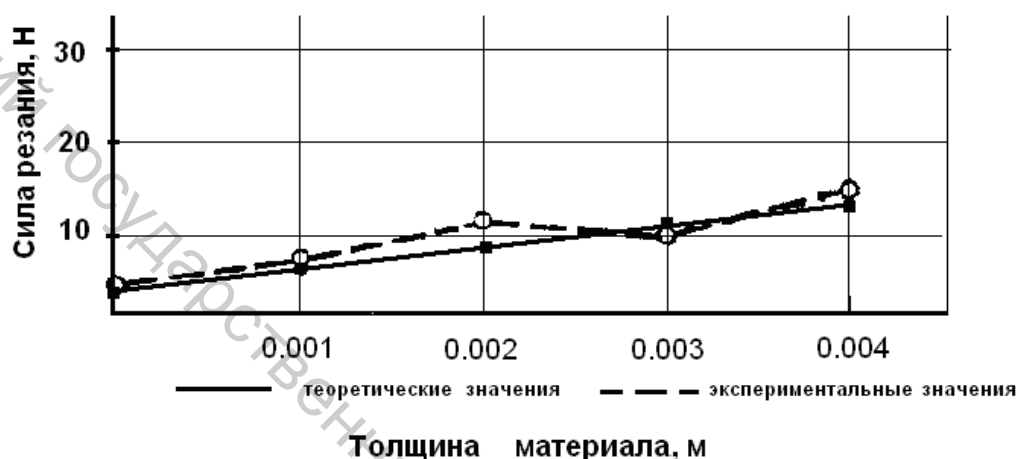


Рисунок 2.20 – Зависимость сил резания от толщины материала для ножа с односторонней заточкой

Отклонение экспериментальных значений от полученных расчетных не превышает 5 %, что дает возможность использовать математические модели (2.86, 2.87) для определения усилий резания материалов, учитывая их свойства. Разработанные математические модели применимы для описания динамического взаимодействия лезвия с нитью и позволяют определять параметры процесса резания текстильных материалов [50].

2.5 Оптимизация процесса измельчения отходов кромки грунтовой ткани в роторном измельчителе

Основная цель многофакторного эксперимента — получение математической модели исследуемого процесса в условиях помех со стороны неизвестных или малоизвестных факторов, кроме того, оптимизация управляемого процесса с использованием метода последовательного поиска и оценки эффективности каждого этапа исследования.

Предполагается, что в общем случае получаемая модель будет иметь вид:

$$Y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \dots + \sum b_{ii} x_i^2. \quad (2.88)$$

Во время определения оптимальных параметров подготовки необходимой по степени равномерности волокнистой массы основной целью является получение продукта, в котором частицы будут определенных размеров. Так как форма получаемых при резании кромки грунтовой ткани частиц имеет неправильную форму и вычислить их точную площадь не всегда получается возможным, равномерность процесса подготовки будем оценивать по массе частиц и ее вариации.

В результате анализа измельчителя установлено, что частота вращения ножевого ротора – не менее 900 об/мин, количество ножей – 3 шт., неподвижных ножей – 2 шт.

Минимальный размер частиц определяется разводкой между подвижными и стационарными ножами. Следовательно, с учетом анализа влияния различных факторов свойства волокнистой массы при проведении эксперимента в качестве входных параметров были приняты:

- длительность процесса обработки, мин, X_1 ;
- частота вращения ротора, мин^{-1} , X_2 .

В качестве критериев оптимизации были приняты следующие качественные показатели измельченных отходов:

- Y_1 – средняя масса частиц, мм;
- Y_2 – коэффициент вариации по массе, %.

Для исследования технологического процесса подготовки волокнистой смеси был использован план-матрица Коно. Уровни и интервалы варьирования факторов были установлены с учетом анализа литературных источников, а также проведенных предварительно расчетов, и приведены в таблице 2.14. Исследования и оптимизация процесса подготовки коротковолокнистых отходов к вторичной переработке проводились в условиях опытной лаборатории УО «ВГТУ». По каждому варианту был проведен опыт из 30 испытаний, определены средние значения [69].

Таблица 2.14 – Интервалы и уровни варьирования факторов

Наименование фактора	Обозначение	Уровни варьирования			Интервал варьирования
		-1	0	1	
Длительность процесса обработки, мин	X_1	1	2	3	1
Частота вращения ротора, мин^{-1}	X_2	900	1000	1100	100

Значимость коэффициентов регрессии в каждой модели установлена по стандартной методике путем сравнения расчетного значения критерия Стьюдента (t_R) с табличным (t_T). Если расчетное значение критерия Стьюдента больше табличного ($t_R > t_T$), то коэффициент регрессии значим. Оценка значимости коэффициентов регрессии определялась и по значению уровня Р-фактора (P-level). Коэффициент считается значимым, если уровень Р-фактора меньше 0,05.

Таким образом, математические модели исследуемых параметров подготовки отходов кромки грунтовой ткани имеют следующий вид:

средняя масса частиц после измельчения

$$Y_1 = 1,53 - 0,43X_1 - 0,15X_2. \quad (2.89)$$

Анализ полученных данных показал (2.2), что средняя масса частиц после подготовки (Y_1) находится в линейной зависимости от длительности процесса обработки (X_1) и от частоты вращения ротора (X_2). Масса частиц уменьшается при увеличении длительности процесса измельчения, но до определенного предела. Разводка между подвижными и неподвижными ножами является пределом измельчения. Уменьшение массы можно объяснить увеличением числа ударов подвижных ножей на одну и ту же частицу в течение установленного времени. При увеличении частоты вращения ротора увеличивается скорость ножей и, следовательно, сила воздействия подвижных ножей на материал. Чем больше это воздействие, тем меньше средняя масса частиц [69].

Масса частиц определялась путем их взвешивания при помощи весов аналитических ХА120/250/У, характеристика которых представлена в таблице 2.15.

Таблица 2.15 – Характеристика весов марки ХА120/250/У

Показатель	Значение
Наибольший предел взвешивания	120/250 г
Наименьший предел взвешивания	1 мг
Дискретность	0,01 мг/0,1 мг
Диапазон тарирования	250 г
Цена поверочного деления	1 мг
Пределы допускаемой погрешности	От НмПВ до 50 г вкл. $\pm 0,5$ мг
Среднее время стабилизации	4 с
Размеры камеры взвешивания	170x200x220 мм

Коэффициент вариации по массе

$$Y_2 = 16,56 - 16,5X_1 - 6,5X_2 + 5,17X_1^2 + 2,17X_2^2 + 3,5X_1^2X_2. \quad (2.90)$$

Коэффициент вариации по массе частиц (2.90) после процесса подготовки уменьшается при увеличении длительности обработки исходного материала (воздействие ножей на материал) (X_1). Это объясняется тем, что увеличивается кратность воздействия измельчающих органов на частицы. С увеличением частоты вращения ротора (X_2) увеличивается количество массы, которая заполняет пространство между ножами, подвижными и неподвижными. Центробежная сила увеличивается и заставляет движущийся волокнистый поток прижиматься к стенке дробилки и неподвижным ножам. Вследствие чего, в большей степени увеличивается доля волокон, которые подвергаются обработке рабочими органами машины [69].

С помощью полученной математической модели возможно определить характер влияния каждого фактора на свойства получаемой волокнистой массы. А при их рассмотрении в совокупности определить допустимые уровни факторов, которые обеспечивают возможность получения волокнистой массы с заданными свойствами.

Результаты эксперимента по исследованию процесса подготовки отходов кромки грунтовой ткани в однородную волокнистую массу представлены в таблице 2.16.

Таблица 2.16 – План и результаты эксперимента для волокнистой массы

№	Кодированные значения		Натуральные значения		Средняя масса частицы, г	Коэффициент вариации по массе, %
	X_1 ,	X_2 ,	X_1 мин	X_2 мин-1		
1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	3	1100	1,0	4
2	-1	1	1	1100	1,8	36
3	1	-1	3	900	1,2	11
4	-1	-1	1	900	2,2	43
5	1	0	3	1000	1,1	9
6	-1	0	1	1000	1,9	38
7	0	1	2	1100	1,3	7
8	0	-1	2	900	1,6	24
9	0	0	2	1000	1,7	17

В таблицах 2.17, 2.18 представлены коэффициенты полиномиальных моделей и оценка их значимости [69].

Таблица 2.17 – Коэффициенты полиномиальных моделей и оценка их значимости для оценки значимости влияния показателей на среднюю массу частиц

Model is: $Y1=a0+a1*x1+a2*x2$ (Spreadsheet12) Dep. Var. : Y1 Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard - error	t-value - df = 6	p-level	Lo. Conf - Limit	Up. Conf - Limit
a0	1,533333	0,032867	46,6525	0,000000	1,452910	1,613756
a1	-0,433333	0,040254	-10,7650	0,000038	-0,531831	-0,334836
a2	-0,150000	0,040254	-3,7264	0,009779	-0,248498	-0,051502

Таблица 2.18 – Коэффициенты полиномиальных моделей и оценка их значимости влияния показателей на коэффициент вариации массы частиц

Model is: $Y2=a0+a1*x1+a2*x2+a11*x1*x1$ (Spreadsheet12) Dep. Var. : Y2 Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard - error	t-value - df = 5	p-level	Lo. Conf - Limit	Up. Conf - Limit
a0	16,0000	1,588151	10,0746	0,000165	11,9175	20,0825
a1	-15,5000	1,122992	-13,8024	0,000036	-18,3867	-12,6133
a2	-5,1667	1,122992	-4,6008	0,005836	-8,0534	-2,2799
a11	7,5000	1,945079	3,8559	0,011930	2,5000	12,5000

На рисунках 2.21, 2.22 представлены графики полученных зависимостей.

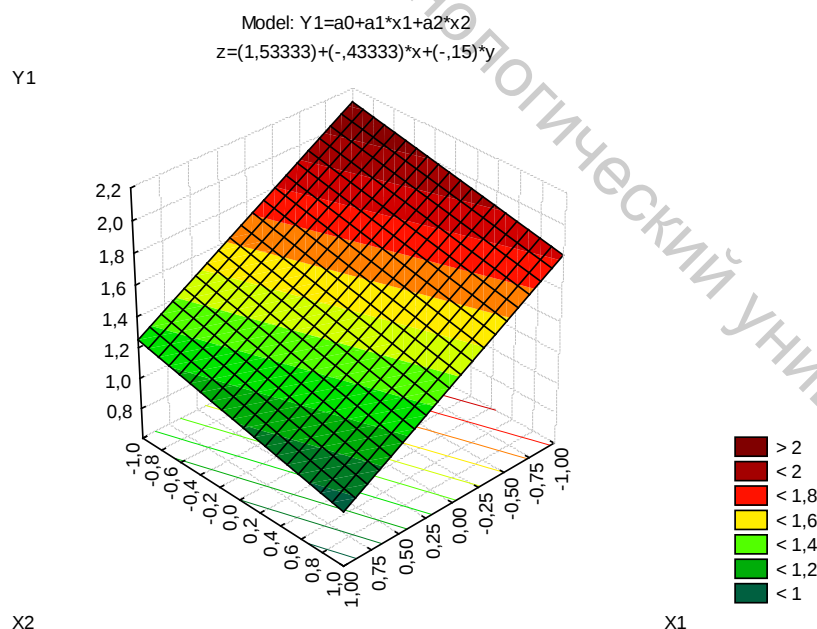


Рисунок 2.21 – Зависимость средней массы волокон Y_1 от длительности воздействия ножей на материал X_1 и частоты вращения ротора X_2

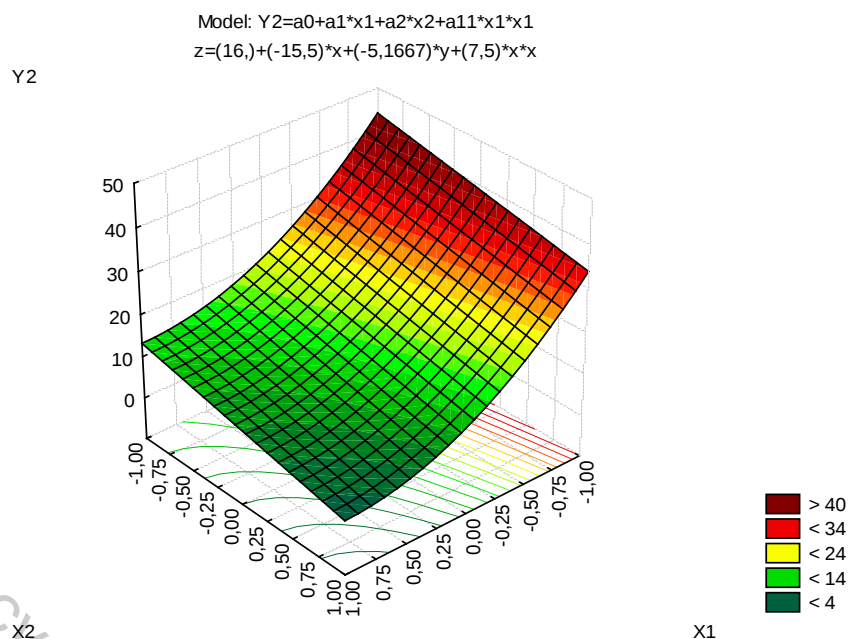


Рисунок 2.22 – Зависимость коэффициента вариации по массе волокон Y_2 от времени воздействия на материал X_1 и частоты вращения ротора X_2

Поставленная задача нахождения допустимых параметров технологического процесса подготовки отходов кромки грунтовой ткани к вторичной переработке (режимов работы дробильного оборудования) решили с помощью графических интерпретаций результатов проведенного эксперимента путем построения линий равных уровней показателей качества в осях координат независимых факторов (длительности процесса обработки X_1 и частоты вращения ротора X_2), представленных на рисунке 2.23.

В зависимости от требуемых показателей качества получаемой волокнистой смеси с необходимой длиной волокон следует вырабатывать ее с определенным сочетанием длительности обработки и частоты вращения ротора дробилки. Задачу нахождения оптимальных параметров решили методом полного перебора с помощью программы, разработанной в математическом редакторе Maple V. В результате оптимизации получена область оптимальных значений. Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что при частоте вращения ротора 1050 мин^{-1} в течение 1,3 минуты получили дробленый материал, в которой химические волокна равномерны по массе 1,53 г, с коэффициентом вариации 22 %. В результате измельчения количество аппретирующей смеси в отходах снижается приблизительно в два раза вследствие потерь в воздуховоде дробилки.

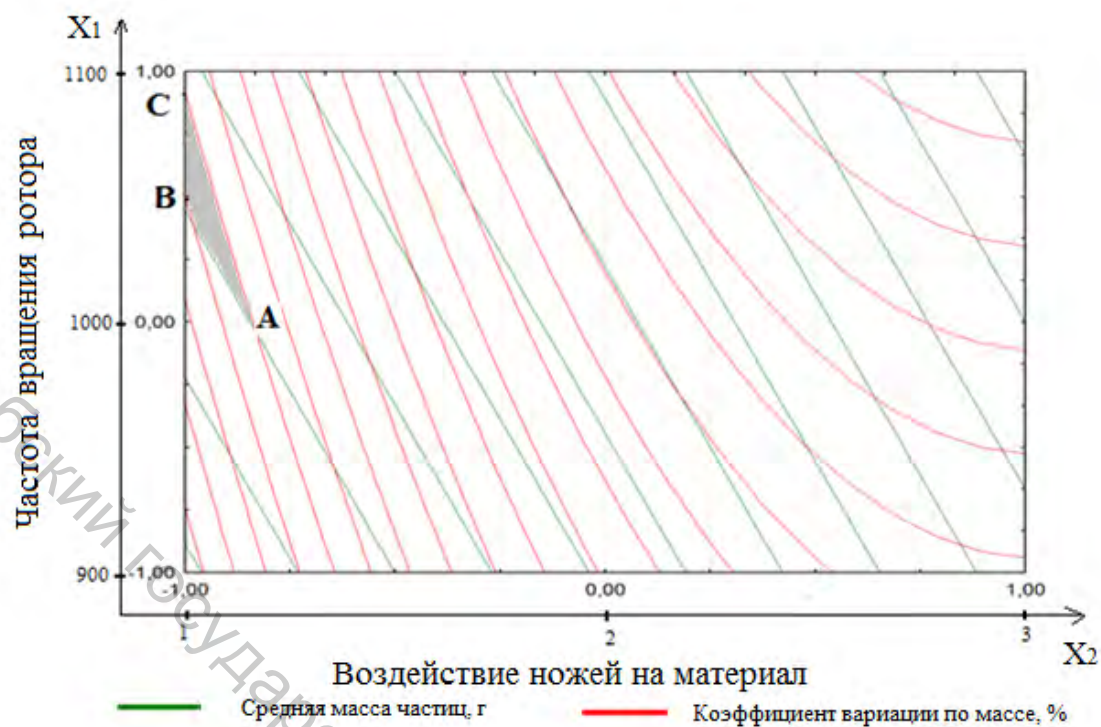


Рисунок 2.23 – Совмещенные графики моделей средней массы частиц и коэффициента вариации по массе

Свойства отходов кромки грунтовой ткани (таблица 2.3) после измельчения представлены в таблице 2.19 [67].

Таблица 2.19 – Свойства смеси после измельчения

Объемная плотность, г/м^3	Коэффициент вариации частиц по массе, не более, %	Средняя масса 1-ой частицы, г	Процентное содержание, %			
			полипропилен	полиамид	полиэфир	аппретирующая смесь
$242/0,016=15125$ $\text{г/м}^3=15,1 \text{ кг/м}^3$	22	1,53	31,0	19,0	23,0	27,0

Представленные результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса измельчения текстильных отходов могут быть использованы в производстве нетканых композиционных материалов с целью выбора режимов работы оборудования и прогнозирования свойств готовых полотен.

3 НЕТКАНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВТОРИЧНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Производство нетканых текстильных материалов различного ассортимента осуществляется по технологиям, представленным на рисунке 3.1.

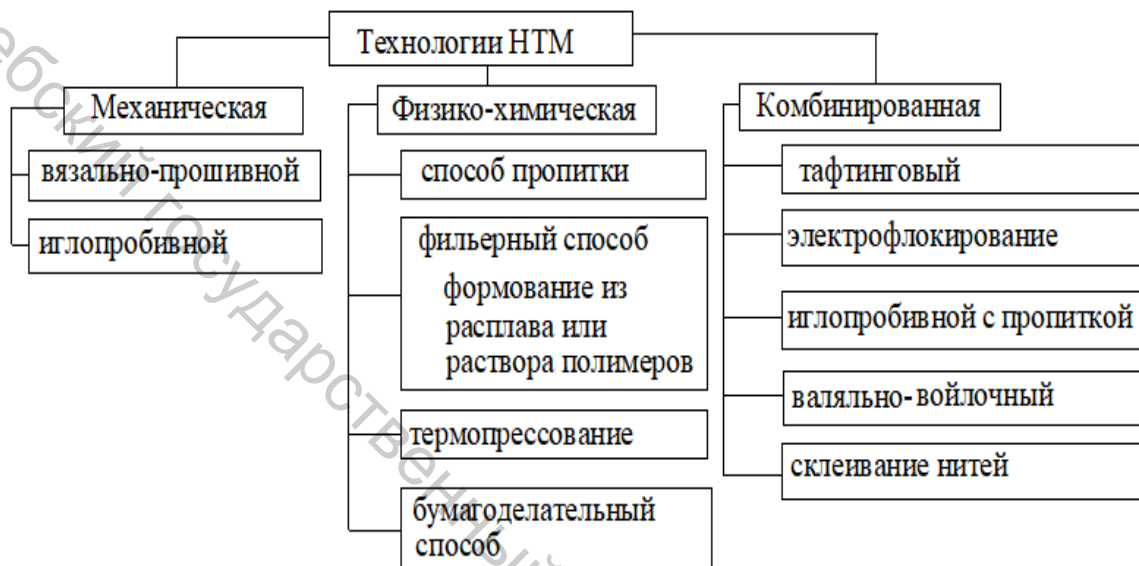


Рисунок 3.1 – Способы производства нетканых текстильных материалов

Перспективным направлением в использовании текстильных отходов (раздел 2.1), как вторичного сырья, является изготовление нетканых композиционных материалов способом термоскрепления. Данный способ имеет три модификации: горячего прессования, сварки и аутгезионный [87]. Полученные таким способом материалы могут использоваться

- в строительстве:
 - в качестве тепло- и шумоизоляционных полотен,
 - подложки под ламинат и линолеум;
- в машиностроении:
 - в качестве шумоизоляционного полотна для автомобилей.

3.1 Технологический процесс производства нетканых тепло- и шумоизоляционных материалов с использованием текстильных отходов

В общем виде технологический процесс производства нетканых тепло- и шумоизоляционных материалов состоит из стадий, представленных на рисунке 3.2, осуществление которого возможно на

ООО «Акотерм Флакс», г. Ореховск. Предприятие оснащено линией по производству нетканых материалов компании Cormatex, системой Airlay, получившую также название Lap FormAir (рисунок 3.3).

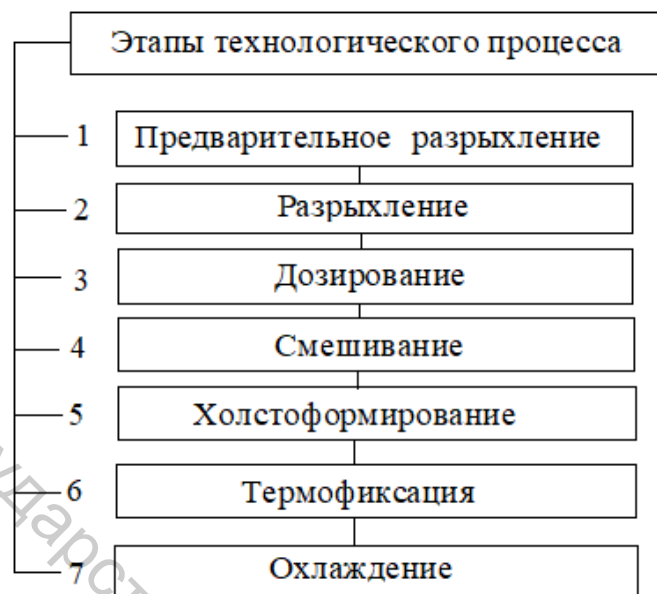


Рисунок 3.2 – Технологический процесс производства нетканых тепло- и шумоизоляционных материалов

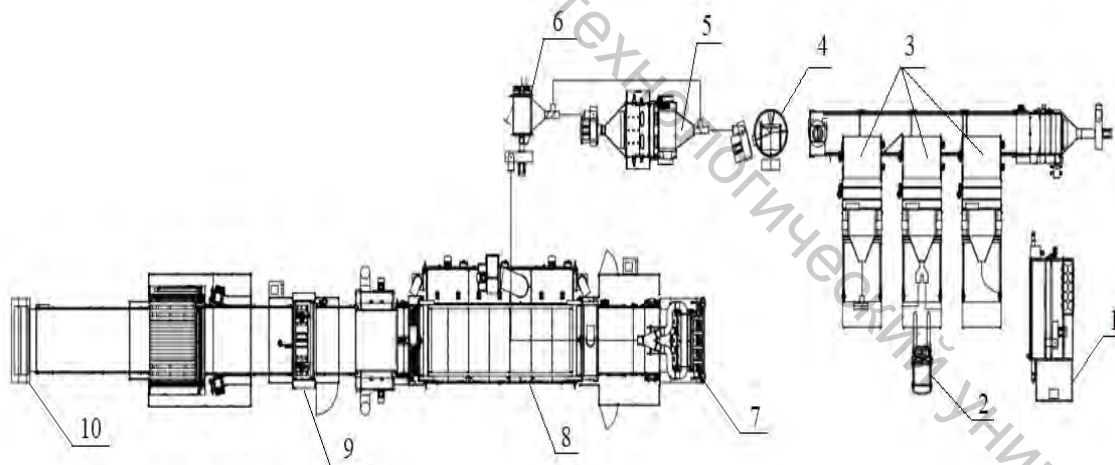


Рисунок 3.3 – Линия по производству нетканых материалов Lap FormAir компании Cormatex:

1 – кипоразрыхлитель, 2 – электроштабелер, 3 – поперечный накопительный конвейер с разрыхлителем, 4 – замасливающая камера, 5 – тонкий разрыхлитель, 6 – промежуточный башенный питатель, 7 – lap formair, 8 – термосвязывающая печь, 9 – продольный и поперечный резак, 10 – намотчик

Система имеет базовые отличия от существующих аэродинамических установок, поскольку основана на принципе формирования холста в камерах повышенного давления, в отличие от традиционных декомпрессионных систем, использующих разрежение воздуха внутри перфорированных рабочих органов, на поверхности которых накапливаются слои материала. Система Lap FormAir относится к установкам вертикального типа, в то время как традиционные технологии используют горизонтальный принцип формирования холста [67].

Преимуществом технологии Cormatex является исключительная однородность получаемого холста в трех измерениях благодаря качественному поэтапному перемешиванию различных, в том числе абсолютно разнородных компонентов, до финальной стадии накопления смеси в конденсирующей камере повышенного давления при поддержании автоматического контроля равномерного заполнения на каждом квадратном сантиметре площади материала [67].

Также преимуществом технологии Lap FormAir является возможность перерабатывать как однородные волокна любого качества, так и смеси, состоящие из волокон и любых неволокнистых материалов, длина и форма которых не оказывает никакого отрицательного влияния на качество получаемого материала. Это возможно благодаря отсутствию в Lap FormAir каких-либо расчесывающих рабочих органов, обычно применяющихся в традиционных системах Airlay [67].

Общая технологическая схема производства полотна теплошумоизоляционного из регенерированных волокон в соответствии производственной линии (рисунок 3.3) представлена на рисунке 3.4 [88].

3.1.1 Особенности технологического процесса производства нетканых материалов способом термоскрепления с использованием текстильных отходов

Отходы швейного производства поступают в виде межлекальных выпадов и подвергаются измельчению с помощью кипоразрыхлителя, представленного на рисунке 3.5. Кипоразрыхлитель состоит из 1 подающей ленты, 2 цилиндра, 3 секции подачи, 4 режущего цилиндра, 5 выпускного бункера. Кипоразрыхлитель работает по принципу роторной дробилки, измельчение в которой достигается за счет вращающегося режущего цилиндра. Задача машины заключается в выполнении первого разрыхления волокна, называемого предварительным разрыхлением. Волокнистый материал вручную загружается на ленточный транспортер, прижимается прессовым цилиндром для уменьшения объема перед загрузкой в машину. Загрузка выполняется с помощью набивных (питающих) цилиндров.



Рисунок 3.4 – Технологическая схема производства полотна тепло- и шумоизоляционного из регенерированных волокон

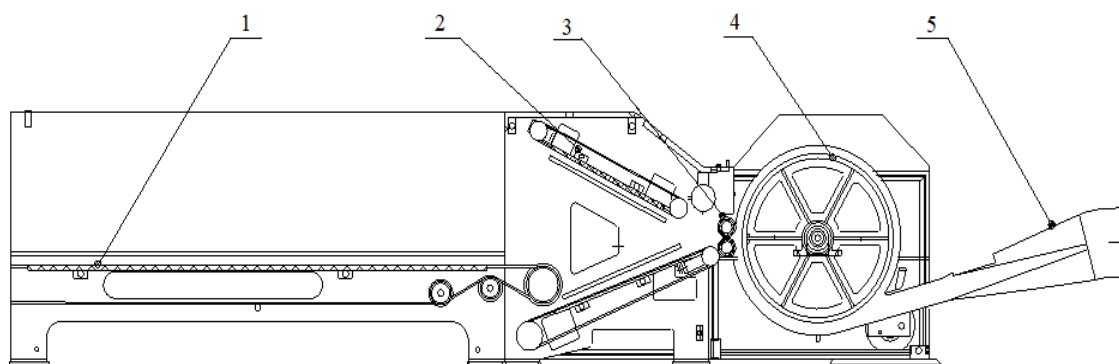


Рисунок 3.5 – Кипоразрыхлитель

Операция разрыхления осуществляется благодаря тому, что разрыхлительный (режущий) цилиндр 4, вращающийся на периферийной скорости около 1000 мин^{-1} и облицованный снаружи металлическими иглами, старается разорвать материал, который подается и одновременно удерживается питающими цилиндрами. Разрыхленный таким образом материал затем всасывается вентилятором через канал и направляется на последующую обработку [67].

Характеристика кипоразрыхлителя представлена в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Характеристика кипоразрыхлителя

Наименование показателя	Значение показателя
Тип, марка	SM
Длина, мм	5695
Ширина, мм	2278
Высота, мм	1479
Мощность, кВт	65

Данный процесс представился возможным для отходов в виде лоскута. Для отходов кромки грунтовой ткани процесс предварительного разрыхления не дал положительных результатов. Кромка из-за ее свойств (длины, жесткости) наматывалась на барабан кипоразрыхлителя, иглы проскальзывали и не захватывали материал. Поэтому было принято решение рассмотреть теоретически процесс воздействия игл режущего барабана на волокнистый материал и предложить решения данной проблемы, чтобы исключить процесс предварительного измельчения отходов кромки грунтовой ткани с целью сокращения технологической цепочки.

Сущность разрыхления заключается в уменьшении плотности волокнистого материала и разделении его на мелкие клочки. Цель разрыхления – обеспечение в дальнейшем лучшего смешивания всех компонентов смеси [6, 38].

Схема взаимодействия валиков подачи и режущего инструмента представлена на рисунке 3.6.

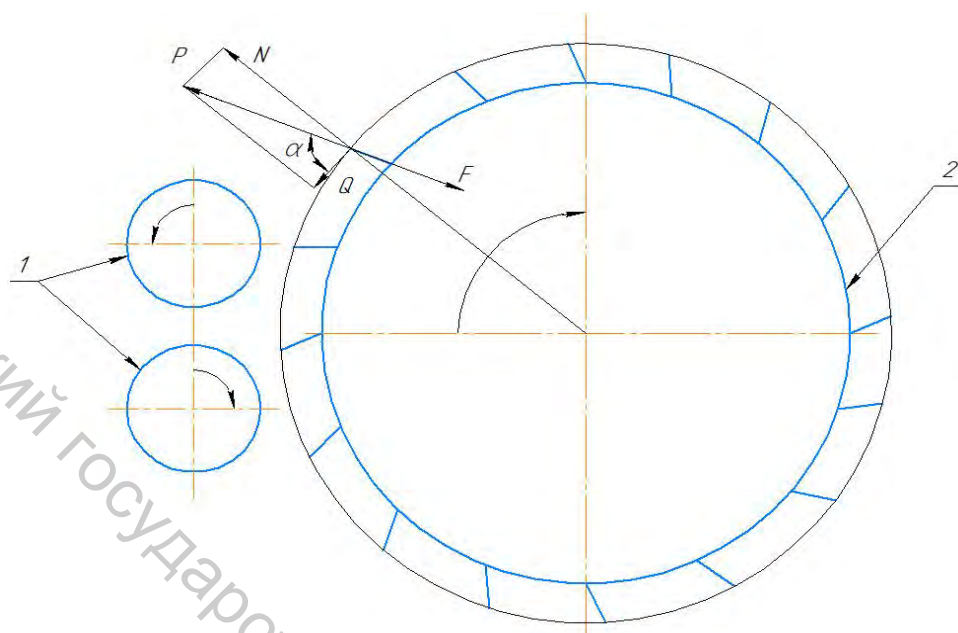


Рисунок 3.6 – Схема взаимодействия валиков подачи и режущего инструмента:

1 – питающие цилиндры, 2 – режущий цилиндр

Иглы режущего цилиндра взаимодействуют с материалом, который подают питающие цилиндры, сжимая его и разделяют клочки текстильных отходов на мелкие клочки волокнистой массы.

Верхний питающий цилиндр может двигаться вверх, несмотря на противодействие винтовой пружины, установленной над ним. Сила, передаваемая пружиной, регулируется по интенсивности и представляет способность питающих цилиндров удерживать материал перед тем, как он войдет в контакт иглами режущего цилиндра (разрыхлительного барабана), положение которого может регулироваться по горизонтали.

Угол наклона игл режущего цилиндра α влияет на разделение волокнистого материала. В литературе [87, 89] указано, что с уменьшением угла наклона иглы обеспечивается лучший захват клочков волокон и их удержание, благодаря чему создаются условия для лучшего разрыхления волокнистой массы.

Рассмотрим взаимодействие сил со стороны иглы на волокнистый материал (рисунок 3.7). Сила P , действующая на клочок материала, углубляет его к основанию иглы и преодолевает возникающую силу трения F , препятствующую движению волокон к основанию иглы. Также на клочок волокнистого материала действует касательная Q и нормальная N силы инерции.

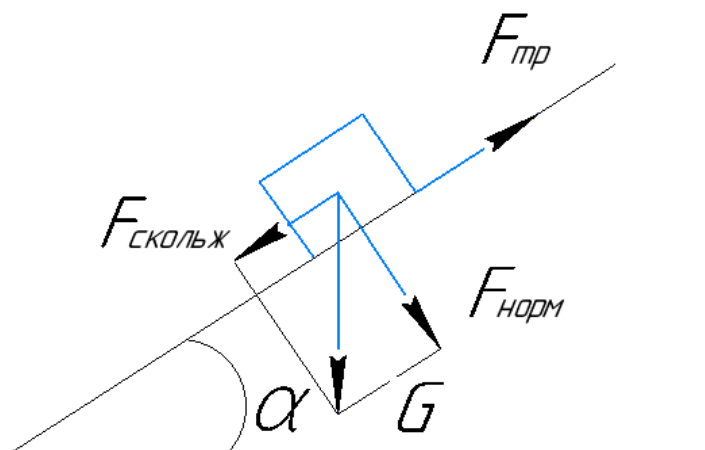


Рисунок 3.7 – Схема определения силы трения волокнистой массы о поверхность

Согласно закону Амонтона-Кулона сила трения пропорциональна нормальной силе инерции:

$$F = fN, \quad (3.1)$$

где f – безразмерный коэффициент пропорциональности, который называется коэффициентом трения (статический коэффициент трения, коэффициент сцепления) [90].

Коэффициент трения зависит от материала и физического состояния поверхностей контактирующих тел (степени и характера обработки поверхностей, температуры, влажности и т.д.).

Из рисунка 3.5 очевидно, что

$$Q = P \sin \alpha, \quad \text{а} \quad N = P \cos \alpha, \quad \text{тогда}$$

$$F = fP \cos \alpha, \quad (3.2)$$

При условии равновесия $P = F$, тогда

$$P \sin \alpha = fP \cos \alpha. \quad (3.3)$$

Следовательно

$$\operatorname{tg} \alpha = f. \quad (3.4)$$

Процесс разрыхления будет протекать успешно, если соблюдается условие: $P > F$, т.е.

$$\operatorname{tg} \alpha > f. \quad (3.5)$$

Из формулы (3.5) следует, что угол наклона иглы на режущем цилиндре напрямую зависит от коэффициента трения.

Коэффициент трения согласно литературным источникам [89] для волокнистых материалов в среднем равен 0,23. Для определения угла наклона иглы необходимо найти $\arctg(f)$, следовательно, при таком значении коэффициента трения угол наклона равен 13° . Необходимо отметить, что на предприятии в рассматриваемом узле угол $\alpha = 0^{\circ}$.

Для установления оптимального наклона иглы режущего цилиндра экспериментально определяли коэффициент трения волокнистых частиц о стальную поверхность. Для этого помещали волокнистую массу из отходов на наклонную плоскость и определяли угол наклона, при котором они начинали двигаться (рисунок 3.7). Все отходы были одинаковой массы – 200 г.

$$fG \cos \alpha = G \sin \alpha, \text{ следовательно, } f = \operatorname{tg} \alpha,$$

где f – коэффициент трения; α – угол наклона плоскости (иглы).

Результаты испытаний по видам отходов и расчеты представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты испытаний определения коэффициента трения

Наименование текстильных отходов	Средняя величина угла наклона плоскости из 10 испытаний, $^{\circ}$	Значение коэффициента трения		
		расчётное	среднее	отклонение от среднего
Лоскут швейный	15	0,27	0,31	-0,04
Отходы кромки грунтовой ткани	26	0,49		+0,18
Лоскут нетканых полотен	9	0,16		-0,15-

Для определения угла наклона иглы режущего цилиндра подставим в формулу (3.5) результаты испытаний (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Результаты расчета угла наклона игл режущего барабана

Наименование текстильных отходов	Значение тангенса	Угол наклона, $^{\circ}$	Принимаемое значение угла наклона, $^{\circ}$
Лоскут швейный	0,27	15	не менее 26
Отходы кромки грунтовой ткани	0,49	26	
Лоскут нетканых полотен	0,16	9	

Результаты расчетов и эксперимента подтверждаются реальными условиями разрыхления, иглы в режущем цилиндре расположены перпендикулярно плоскости основания, поэтому отходы кромки грунтовой ткани не захватывались. Следовательно, согласно формуле (3.5) угол наклона игл должен быть не менее 26° . Для наработки опытной партии выставлен угол наклона игл режущего цилиндра – 30° .

Таким образом, иглы режущего цилиндра, вращающегося со скоростью 1000 мин^{-1} , расщипывают волокнистый материал. Одновременно в результате ударных действий происходит сдвиг волокон относительно друг друга. В результате ослабления связей между волокнами крупные клочки разделяются на более мелкие, уменьшая объемную массу волокнистого материала.

Процесс разрыхления характеризуется интенсивностью и эффективностью разрыхления.

Интенсивность разрыхления определяет степень воздействия на волокнистый материал рабочих органов машины. Интенсивность разрыхления повышается, как уже отмечено ранее, за счет угла наклона игл режущего цилиндра и при уменьшении разводов между рабочими органами машины. В нашем случае (рисунок 3.6) – разводки между питающими и режущим цилиндрами. При этом скорость подачи на питающие цилиндры и скорость вращения рабочих цилиндров остается неизменной.

Эффективность разрыхления определяет степень разрыхления волокнистого материала. Эффективность разрыхления можно оценить двумя способами [89]:

1) рассчитать изменение объемной массы волокнистого материала

$$m_1 = \frac{G_1}{G_2}, \text{ кг/м}^3, \quad (3.6)$$

где G_1 – объемная масса материала до разрыхления, кг/м^3 ; G_2 – объемная масса материала после разрыхления, кг/м^3 ;

2) рассчитать изменение средней массы волокнистых клочков

$$m_2 = \frac{p_1 - p_2}{p_1} 100, \%, \quad (3.7)$$

где p_1 – средняя масса волокнистых клочков в 1 кг волокнистого материала до разрыхления, г; p_2 – средняя масса волокнистых клочков в 1 кг волокнистого материала после разрыхления, г.

В нашем случае формула (3.6) не будет отражать эффективность процесса разрыхления, так как например, при дроблении кромки

грунтовой ткани установлено, что объемная масса измельченного материала равна $14,8 \text{ кг/м}^3$, а до дробления – $15,1 \text{ кг/м}^3$. Следовательно, для оценки эффективности разрыхления на кипоразрыхлителе (рисунок 3.4) воспользуемся формулой (3.7). Результаты замеров и вычислений представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты замеров волокнистых клочков после предварительного разрыхления

Наименование текстильных отходов	Средняя масса волокнистых клочков в 1 кг волокнистого материала, г		Изменение средней массы волокнистых клочков, %
	до разрыхления	после разрыхления	
Лоскут швейный	30,00	0,12	99
Отходы кромки	21,38	0,46	98
Лоскут нетканых полотен	9,20	0,04	99

Таким образом, результаты замеров показали, что при установке игл режущего цилиндра под углом 30° изменение средней массы клочков после уже предварительного разрыхления составило 98–99 %.

После предварительного кипоразрыхлителя все компоненты подаются на поперечный накопительный конвейер с разрыхлителем (рисунок 3.8) – кипоразрыхлитель № 1, № 2 и № 3 в комплекте с конденсатором и ленточным транспортером модели CDN – секция дозирования. Количество используемых кипоразрыхлителей зависит от состава холстообразующей смеси. Характеристика накопительного конвейера представлена в таблице 3.5 [67].

Таблица 3.5 – Характеристика кипоразрыхлителя

Наименование показателя	Значение показателя
Тип, марка	AB
Длина, мм	7256
Ширина, мм	2600
Высота, мм	3700
Мощность, кВт	5,95
Ширина загрузочной поверхности, мм	от 2000 до 4000
Длина загрузочной поверхности, мм	до 15000
Производительность, кг/час	до 3000

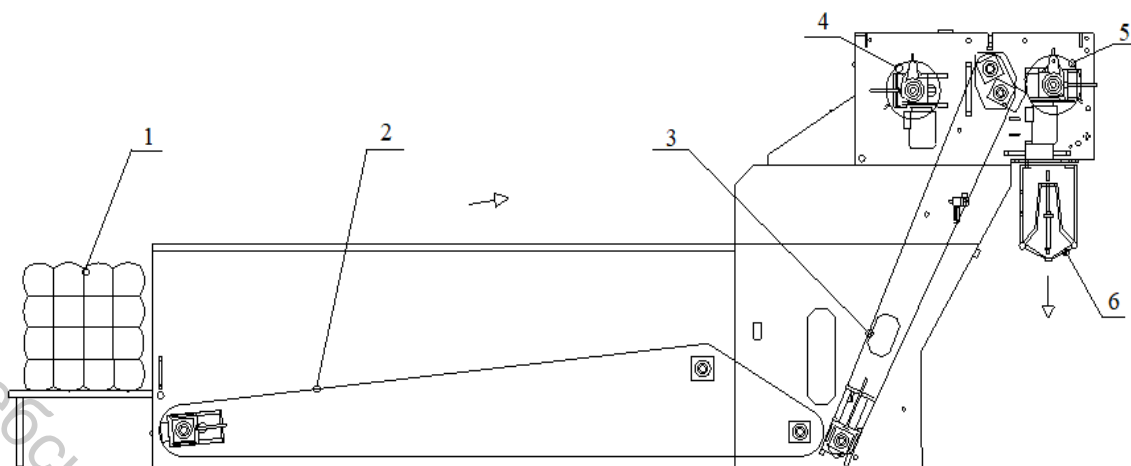


Рисунок 3.8 – Поперечный накопительный конвейер с разрыхлителем:

- 1 – прессованные тюки, 2 – питающий ленточный передний транспортер, 3 – загрузочный игольчатый ленточный транспортер, 4 – дозирующий цилиндр, 5 – выпускной цилиндр, 6 – весы

Машина имеет весовую станцию для взвешивания материала перед подачей на ленточный поперечный накопительный транспортер. Питающий ленточный передний транспортер изготовлен из пластикового материала, усиленного пластиковыми поперечными планками. Весы состоят из камеры с нижней частью, открываемой с помощью механизма, управляемого пневматическим цилиндром. Они крепятся под верхней частью машины с помощью пары стальных тросов, которые в свою очередь прикреплены к паре тензодатчиков. Материал, поступающий с игольчатого ленточного транспортера, подается внутрь бункера до достижения желаемого веса. Только после достижения этого момента весы могут открыться и выполнить подачу материала в дальнейшую обработку. Таким образом, в секции дозирования осуществляется подача материала в необходимом процентном соотношении, которое задается с помощью ПЭУ [67].

На данном этапе при использовании измельченных отходов кромки грунтовой ткани за счет содержания в них аппретирующей смеси, которая при последующем разрыхлении приобретает порошкообразную массу и при подаче на игольчатый транспортер не захватывается, а отсеивается как примесь. Состав отходов кромки, подающийся на весы, изменяется (таблица 3.6). Волокнистый состав остальных отходов после разрыхления не меняется и зависит только от состава отходов [67].

Таблица 3.6 – Свойства отходов кромки грунтовой ткани при подаче на весы

Процентное содержание, %			
полипропилен	полиамид	полиэфир	аппретирующая смесь
39,0	24,0	30,0	7,0

При необходимости используется разрыхлитель-смеситель № 2 и 3, характеристика которого представлена в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Характеристика рыхлителя-смесителя № 2 и 3

Наименование показателя	Значение показателя
Тип, марка	SMF
Длина, мм	1930
Ширина, мм	1750
Высота, мм	1300
Мощность, кВт	12,5
Ширина загрузочной поверхности, мм	от 2000 до 4000

Машина встраивается в оборудование по подготовке волокон. Ее функцией является тонкое разрыхление обрабатываемого материала.

Затем по воздухопроводу материал поступает в замасливающую камеру (рисунок 3.9), характеристика которой представлена в таблице 3.8 [67].

Таблица 3.8 – Характеристика замасливающей камеры

Наименование показателя	Значение показателя
Тип, марка	SU
Диаметр, мм	1990
Высота, мм	2200
Мощность, кВт	0,75

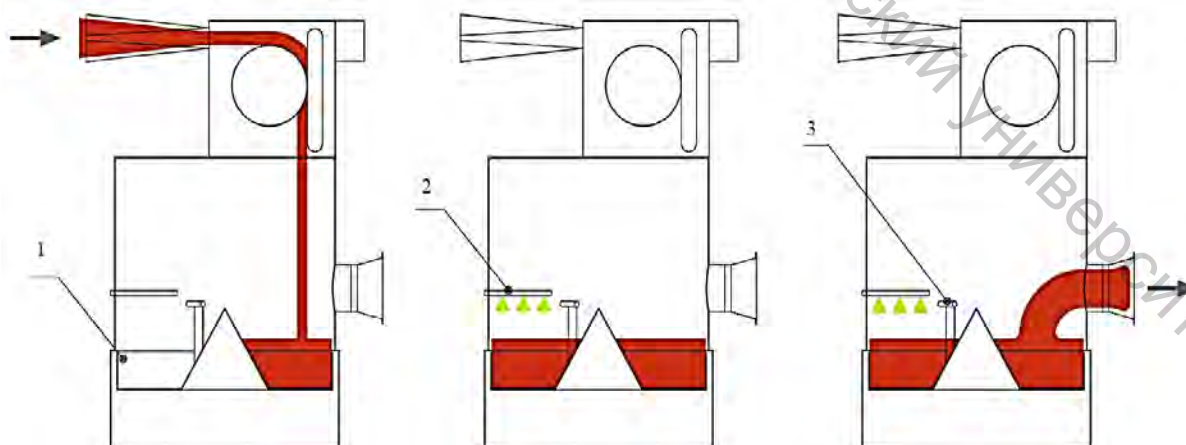


Рисунок 3.9 – Замасливающая камера:

1 – конденсор питания, 2 – вращающаяся пластина из нержавеющей стали, 3 – распыляющие сопла

Волокно подается в замасливающую камеру циклоном или конденсором питания 1 и падает на вращающуюся пластину 2, которая перемещает его под распыляющими соплами 3. Детектор волокон определяет наличие волокна и приводит в действие распыляющие сопла, после этого волокно подается пневмотранспортом на последующие стадии процесса [67].

Замасливание волокнистых материалов обеспечивает нормальное протекание процесса кардочесания. Применительно к шерстяным волокнам цель замасливания заключается в том, чтобы путем гидратации и пластификации добиться уменьшения жесткости, повышения гибкости и удлинения при растяжении, уменьшения электризуемости. Хлопковые волокна замасливают для сохранения природных воскообразных веществ в наружной оболочке, придающих волокну гибкость и эластичность и для уменьшения электризуемости. Для химических волокон применяют эмульсирование, при котором на поверхности волокон образуется эластичная пленка, повышающая их электропроводность и тем самым способствующая снижению электризуемости волокон при кардочесании. При эмульсировании снижение электризуемости волокон достигается тем, что в состав эмульсии вводят антистатические вещества.

Так как волокнистый состав текстильных отходов неоднородный для замасливания, используют эмульсию следующего состава:

- антистатические препараты – $6 \div 8$ %,
- вода – $94 \div 92$ %.

Расход эмульсии составляет $10 \div 12$ % от массы волокнистой смеси. В качестве веществ, применяемых для снижения величины заряда статического электричества, возникающего на волокнах, используют гигроскопичные неорганические и органические вещества, такие как хлориды лития, кальция и магния, гликоли, глицерин, эфиры и амиды различных кислотсодержащих кислот фосфора с аминокспиртами, гликолями и другими полиоксисоединениями, а также производные алкилфосфорных кислот. В производственных условиях используют глицерин.

Затем материал поступает в тонкий разрыхлитель (рисунок 3.10), характеристика которого представлена в таблице 3.9. Разрыхлитель предназначен для глубокого (тонкого) разрыхления и перемешивания волокон с освобождением от имеющегося в них сора и пыли [67].

Материал с конвейера, расположенного над камерой питания 1, спускается в камеру объемного типа 2, где утрамбовывается, а затем питающими валиками 3 подаётся в систему питания. Система питания набирает волокна и направляет их на главный барабан 5. Все действия выполняются на довольно небольшом пространстве, что способствует выполнению высокой степени разрыхления материала. Затем с

помощью вытяжного устройства материал выбрасывается через бункер выхода 6 [67].

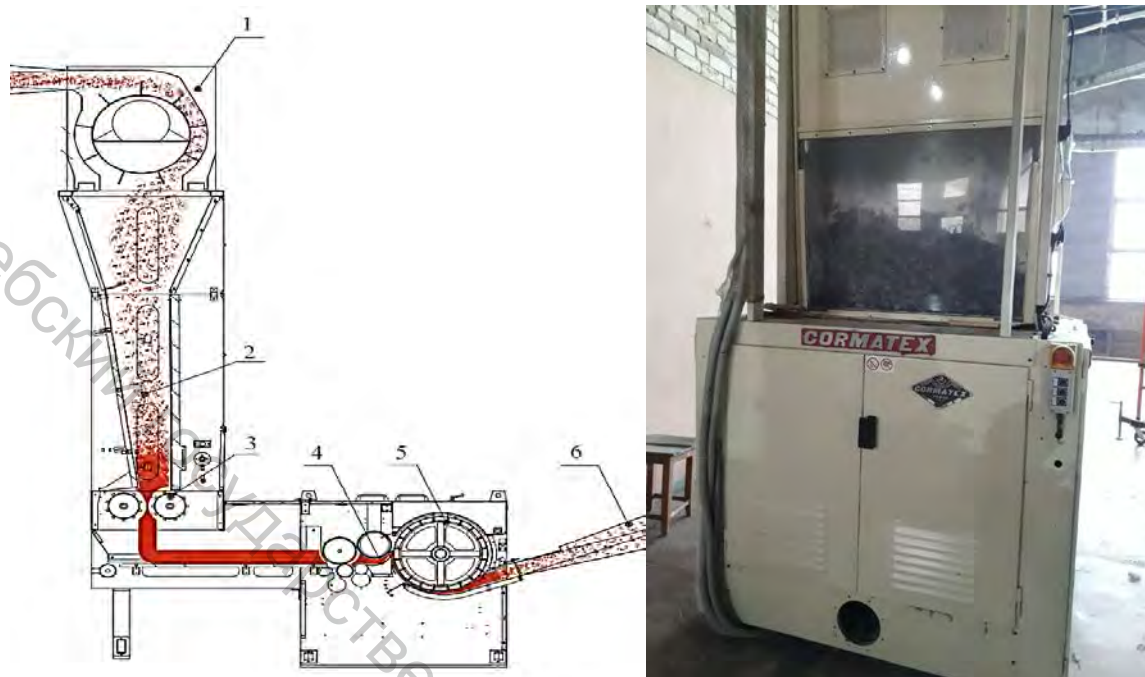


Рисунок 3.10 – Тонкий разрыхлитель

Таблица 3.9 – Характеристика тонкого разрыхлителя

Наименование показателя	Значение показателя
Тип, марка	SF-1C
Длина, мм	1400
Ширина, мм	1850
Высота, мм	3450
Мощность, кВт	15,0

Затем материал подается в загрузочный бункер башенного типа (башенный питатель) (рисунок 3.11), характеристика которого представлена в таблице 3.10. Бункер предназначен для накопления соответствующего количества волокон для дальнейшего питания холстоформирующей машины [67].

Таблица 3.10 – Характеристика башенного питателя

Наименование показателя	Значение показателя
Тип, марка	SIL
Длина, мм	700
Ширина, мм	1650
Высота, мм	3910
Мощность, кВт	4,0

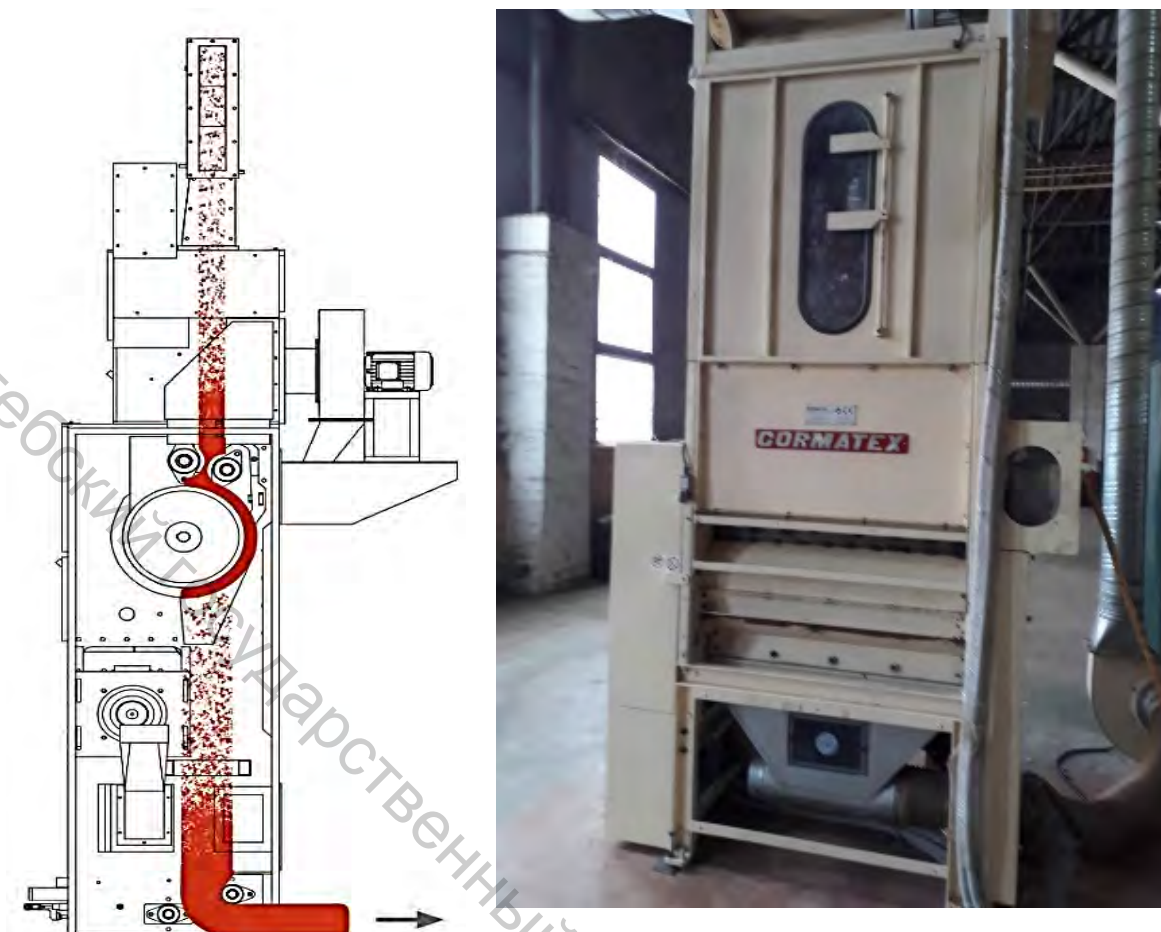


Рисунок 3.11 – Башенный питатель

Конструкция нижней камеры бункера из нержавеющей стали, верхняя и нижняя камеры с неподвижными стенками и окнами для проверки, машина имеет специальные регулируемые воздухопроводы для удаления избыточного воздуха, реле давления на канале подачи волокна для контроля количества подачи волокон, дифференциальное реле давления на нижней камере для контроля уровня наполнения волокном и его равномерного распределения вдоль рабочей ширины машины. Диапазон поверхностной плотности: до 3000 г/м^2 .

Далее волокнистая масса по воздуховоду попадает в машину Lap FormAir – холстоформирующую машину в комплекте с весовой станцией и ленточным конвейером (рисунок 3.12), характеристика которой представлена в таблице 3.11. Машина предназначена для формирования холста (полотна) из волокон по заданным параметрам, расположенного вертикально [67].

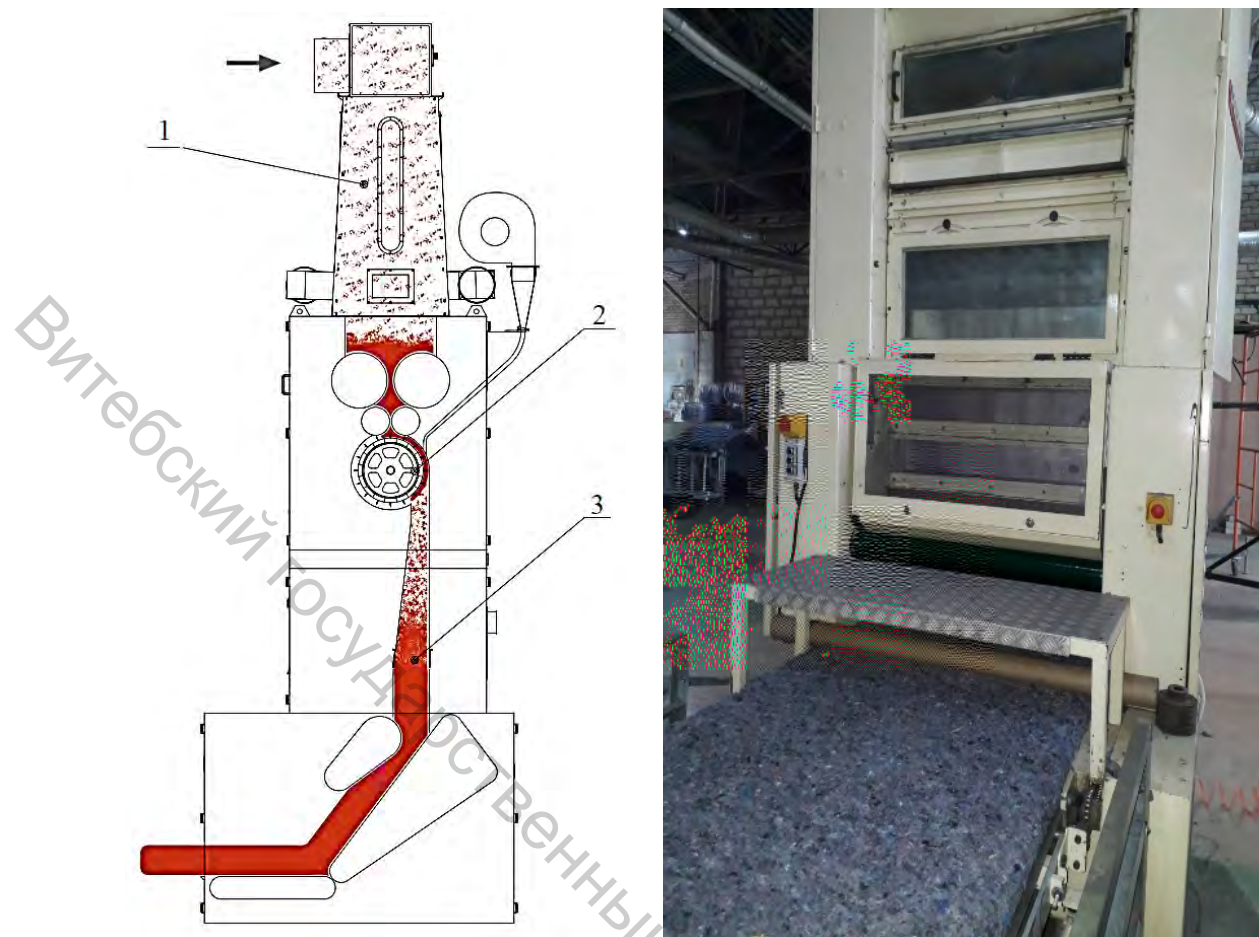


Рисунок 3.12 – Lap FormAir

Таблица 3.11 – Характеристика машины Lap FormAir

Наименование показателя	Значение показателя
1	2
Тип, марка	LPF-V
Длина, мм	1700
Ширина, мм	1700
Высота, мм	4800
Мощность, кВт	13,8
Рабочая ширина, мм	от 1000 до 4000
Производительность, кг/ч на метр ширины	до 500
Диапазон поверхностной плотности продукта, г/м ² (в зависимости от перерабатываемого материала)	от 300 и более 8000
Окончательная толщина материала, мм	до 200
Диапазон длин волокон, мм	от 20 до 150
Максимальное отклонение плотности	± 5%

Волокно пневматически подается в верхнюю формирующую камеру 1, где накапливается, формируя партию волокна, равномерно распределенную вдоль рабочей ширины машины. Специальная модулирующая система питания (промежуточный башенный питатель)

гарантирует равномерный и постоянный уровень материала в верхней формирующей камере. Затем материал подается через секцию разрыхления 2 в нижнюю формирующую камеру 3, где он равномерно наслаивается. В нижней формирующей камере создается повышенное давление воздуха электроклапанами и специальной системой автоматического контроля удаления избыточного воздуха, позволяющими точно контролировать распределение волокон и плотность окончательного продукта даже при обработке неоднородных материалов [67].

Таким образом, волокнистая масса после дозирования, пройдя все этапы разрыхления и смешивания, образует равномерный по составу волокнистый холст. Качество смеси тем выше, чем ближе состав ее компонентов заданному рецепту.

Количественная оценка качества смешивания волокнистых материалов производится сравнением фактического коэффициента неравномерности распределения волокнистых клочков компонентов в определенных по массе частях смеси с теоретическим коэффициентом неравномерности распределения клочков в идеальной смеси аналогичного состава.

Для определения качества смешивания определялась фактическая неравномерность смешивания. Для этого отбиралось 20 проб массой по 50 г из различных мест волокнистой смеси и рассортировывались на отдельные компоненты для установления фактического долевого содержания каждого компонента в каждой пробе. По значениям долевого содержания компонента определялся фактический коэффициент неравномерности распределения волокон данного компонента в смеси [89]:

$$H_{фк} = \frac{\sum [P_{фк} - P_{к}]}{P_{к} n_{пр}} 100, \%, \quad (3.8)$$

где $P_{фк}$ – фактическая доля заданного компонента в исследуемой пробе, определенная при эксперименте, %; $P_{к}$ – заданная по рецепту доля данного компонента в смеси, %; $n_{пр}$ – количество исследуемых проб; $[P_{фк} - P_{к}]$ – абсолютная разница между указанными величинами в каждой пробе.

Испытания проводились в Центре испытаний и сертификации УО «ВГТУ». Результаты представлены в таблице 3.12. Фактическая доля заданного компонента, подаваемая на весы, определялась не по видам волокон, а по содержанию в смеси количества отходов и связующего волокна (полиэфирного бикомпонентного), доля каждого компонента определялась исходя из процентного содержания вида волокон в отходах.

Известно [89], что чем меньше фактический коэффициент неравномерности распределения волокон в смеси, тем лучше проведено смешивание. Следует отметить, что неровнота в пределах 5–8 % характеризует вполне удовлетворительное смешивание волокон. Неровнота 9–11 % указывает на наличие заметной группируемости волокон одного вида, т.е. в нашем случае наблюдается удовлетворительное смешивание по всем видам компонентов смеси, кроме аппретирующей смеси, которая не просматривается в формируемом холсте. Это связано с тем, что в процессе замасливания, разрыхления, данный компонент удалился как сорная примесь. Поэтому в дальнейшем данный компонент будем игнорировать.

Для характеристики неровноты смешивания волокон всей смеси, т. е. для всех компонентов, воспользуемся формулой [91]:

$$H_{фкм} = \frac{H_{фк1} + H_{фк2} + \dots H_{фки}}{i}, \quad (3.9)$$

где $H_{фкм}$ – коэффициент неравномерности распределения волокон в смеси, %; $H_{фк1, 2, i}$ – коэффициент неравномерности распределения волокон 1-го, 2-го, i -го компонента, %; i – количество смешиваемых компонентов.

По результатам эксперимента (таблица 3.12) коэффициент неравномерности распределения волокон в смеси равен

$$H_{фкм} = \frac{3,8 + 7,5 + 4,4 + 8,3 + 0 + 0}{6} = 4,0 \, \%.$$

Согласно [92] соотношение неровнот по доле компонентов обратно пропорционально соотношению долей компонентов, однако данное утверждение несправедливо для многокомпонентных смесей. В нашем случае такой зависимости не наблюдается. Однако одним из главных критериев качества смешивания является квадратическая неровнота смешивания, определяемая по следующей формуле

$$H_{фкм}^2 = \frac{1}{K} \sum_1^i H_{фки}^2 = \frac{1}{6} (3,8^2 + 7,5^2 + 4,4^2 + 8,3^2 + 0^2 + 0^2) = 26,5. \quad (3.10)$$

Тогда
$$H_{фкм} = \sqrt{H_{фкм}^2} = \sqrt{26,5} = 5,1 \, \%.$$

Таблица 3.12 – Оценка качества смешивания компонентов в смеси (по средним показателям всех замеров)

Заданная по рецепту доля компонента в смеси						Фактическая доля компонента в исследуемой пробе		Абсолютная разница	Коэффициент неравномерности распределения волокон компонента в смеси, %
при подаче на весы		при смешивании		в готовой смеси		наименование компонента	содержание, %		
наименование компонента	содержание, %	наименование компонента	содержание, %	наименование компонента	содержание, %				
отходы кромки грунтовой ткани	40	полипропилен	39	полипропилен	15,6	полипропилен	15	0,6	3,8
		полиамид	24						
		полиэфир	30	полиэфир	40,0	полиэфир	43	3	7,5
		аппретирующая смесь	7	аппретирующая смесь	2,8	аппретирующая смесь	0	2,8	100
полиэфирное бикомпонентное волокно	20	полиэфир	20	полиамид	13,6	полиамид	13	0,6	4,4
				шерсть	12,0	шерсть	13	1	8,3
межлекальные отходы швейного производства	40	шерсть	30	вискоза	8,0	вискоза	8	0	0
		вискоза	20						
		хлопок	20	хлопок	8,0	хлопок	8	0	0
		полиамид	10						
		полиэфир	20						
итого	100				100		100		

Полученные по формулам (3.9) и (3.10) значения коэффициента неравномерности распределения волокон в смеси говорит об удовлетворительном результате процесса смешивания. Данные формулы позволяют определить неровноту смешивания реального многокомпонентного волокнистого продукта и, кроме этого, данные расчетов по этим формулам могут быть использованы для сравнения между собой нескольких e_C

Таблица 3.13 – Технические характеристики печи термоскрепления

Показатель	Значение показателя
1	2
Рабочая ширина, мм	3400
Количество камер термоскрепления	4 – общая длина 9000 мм
Нагрев	с помощью 2 газовых горелок прямого нагрева
Количество конвейеров	2 (верхний – для калибровки, нижний – для транспортировки волокон)
Максимальное расстояние между конвейерами, мм	250
Линейная скорость, м/мин	0–15
Циркуляция воздуха	контролируемый цикл вдувания/всасывания
Направление воздушного потока	двухнаправленное в каждой камере (всего 8 разных направлений)
Рабочая температура, °С	80–220



Рисунок 3.14 – Секция охлаждения

Затем готовый материал поступает на продольный и поперечный резак (узел резки) – резательную машину (рисунок 3.15), характеристика которой представлена в таблице 3.14 [67].

Таблица 3.14 – Характеристика резательной машины

Наименование показателя	Значение показателя
Тип, марка	GT2
Длина, мм	5489
Ширина, мм	2120
Высота, мм	2313

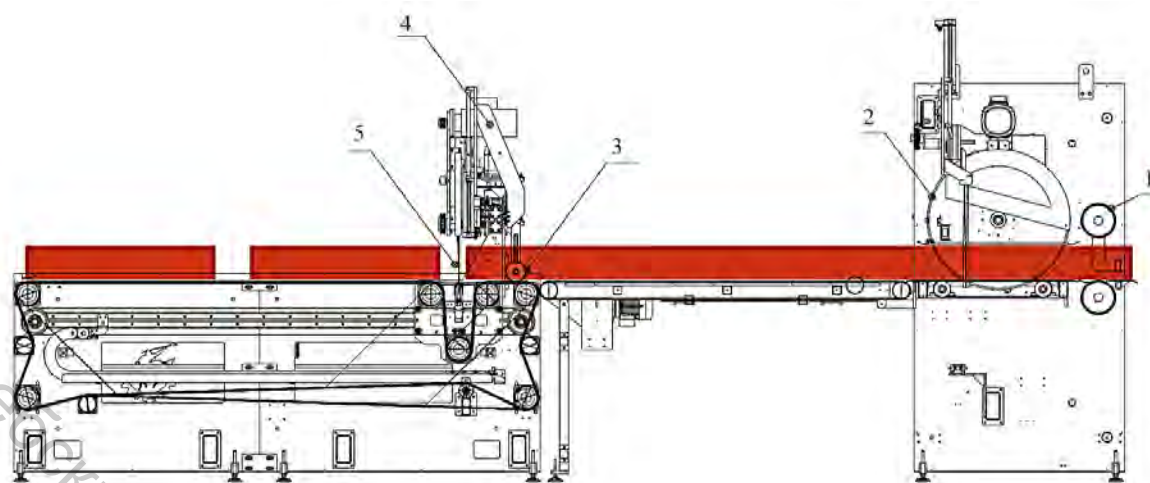


Рисунок 3.15 – Узел резки

Машина предназначена для продольной обрезки внешних краев полотна на входе с помощью моторизованных режущих дисков и/или резка данного полотна разной длины с помощью моторизованной гильотины.

Узел резки состоит из следующих основных элементов:

- боковины – две стальные пластины, соединенные двумя поперечинами, представляющими собой несущую конструкцию машины, на которых смонтированы все органы управления и передачи, необходимые для движения обрабатываемой ленты,
- узла поперечной резки, состоящего из электрического двигателя, шкива-маховика с фрикционной муфтой, пары зубчатое колесо – зубчатый венец с винтовыми зубьями, эксцентриковой системы с двумя рычагами, соединенными передаточным валом, держателей ножа, ножа и упорной поперечины,
- каландра, состоящего из нижнего и верхнего цилиндров, подвижных стальных скоб, с одной стороны соединенных с пневматическими поршнями и с другой – с опорами верхних цилиндров,
- узла продольной резки, состоящего из поперечины из трубчатого профиля, жестко соединенной с двумя боковинами, для крепления устройства продольной резки, пневматических цилиндров с двойным действием, скоб для крепления цилиндров и точек опор для рычагов суппорта ножа и дисков из обработанной и заточенной стали [67].

Материал подается на группу продольной нарезки 2 (рисунок 3.15) и направляется парой каландрирующих валиков 1 с автоматической регулировкой давления. Группа продольной нарезки может быть оснащена резаком давяльного типа. Другая пара каландрирующих валиков 3 направляет материал вперед на поперечный

резак 4 с сохранением абсолютно выправленного положения. Группа поперечной нарезки оснащена резаком гильотинного типа. Группа поперечной нарезки установлена на передвижную тележку 5 с целью выполнения идеально прямого реза без останова линии [67].

В случае задействования двух групп резки (продольной и поперечной) на выходе имеем плиты размером 600x1000 мм, т.е. поперечный нож начинает работать только при достижении длины, установленной для резки материала. При отключении ножа в узле поперечной резки материал сматывается в рулон.

Затем разрезанный на полотна материал транспортируется по конвейеру к выходу на стол ОТК и упаковки.

По требованию заказчика готовые полотна могут обрабатываться антипиренами. Для этого полотно перемещают в камеру обработки, предназначенную для нанесения антипирена на готовое изделие мелкодисперсным способом посредством краскопульта вручную. Характеристика камеры представлена в таблице 3.15.

Таблица 3.15 – Характеристика камеры обработки антипиренами

Наименование показателя	Значение показателя
Тип, марка	ООО «Акотерм-Флакс»
Длина, мм	5500
Ширина, мм	2320
Высота, мм	2310

3.1.2 Оптимизация и разработка рекомендаций работы машины Lap FormAir

Характер протекания процесса формирования холста при подаче волокнистого материала с машины Lap FormAir на ленточный транспортер можно рассматривать с позиции процесса дозирования, т.е. нижняя формирующая камера (рисунок 3.11) наполняется волокнистым материалом за счет вращения питающих и формирующего цилиндров в секции разрыхления, и материал порционно подается на транспортирующую ленту через питающую шахту, размер выходного отверстия которой регулируется прижимными пластинами (рисунок 3.16).

В процессе осуществляется непрерывное объемное дозирование, т.е. на всех этапах элементы оборудования подают поток волокнистого продукта объемом, равным [93]:

$$Q = S_{np} V_{np} \rho, \text{ кг/с}, \quad (3.11)$$

где S_{np} – поперечное сечение продукта; V_{np} – скорость потока продукта, м/с; ρ – объемная плотность продукта, кг/м³.

Изменение физико-механических свойств продукта и случайное отклонение от объема подачи являются по своей природе случайными величинами, варьируемыми во времени. Следовательно, и составляющие формулы (3.11) могут быть случайным образом изменяться. Тогда объем подаваемого продукта – это случайная функция во времени.

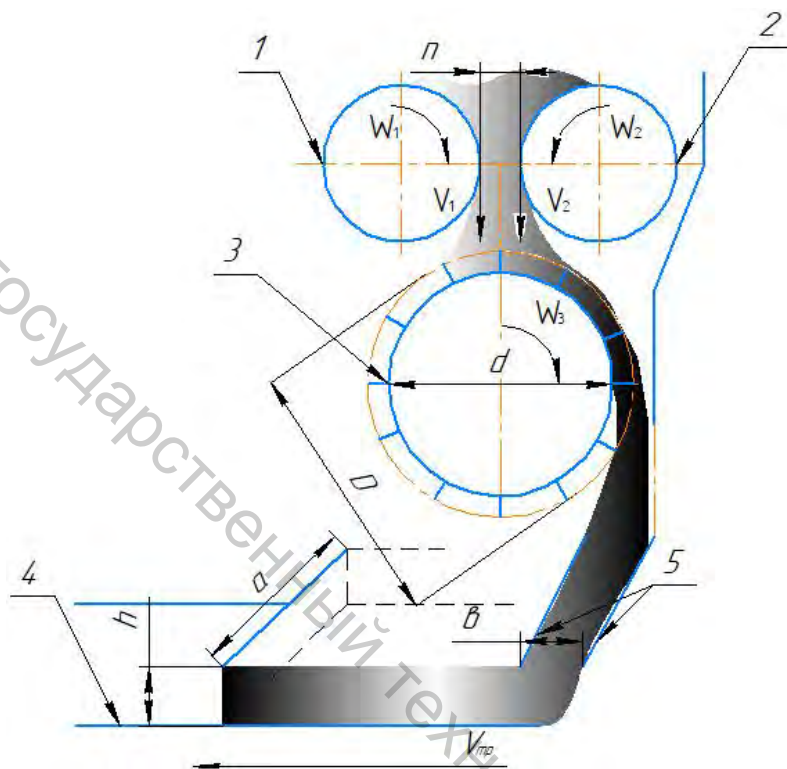


Рисунок 3.16 – Движение волокнистой массы при формировании холста:

1, 2 – питающие цилиндры, 3 – формирующий цилиндр, 4 – ленточный транспортер, 5 – наклонные стенки питающей шахты

Оценить точность объема подаваемого количества волокнистого материала можно взвешиванием проб, отобранных из потока за промежуток времени t . Масса каждой пробы равна

$$m_{np} = \int_0^t Q(t) dt. \quad (3.12)$$

В любом случае масса отобранных проб имеет отличия, что несомненно будет отражать колебания расхода продукта. Это может быть связано с изменениями физико-механических свойств волокнистого материала на каждой из стадии подачи (в связи с разрыхлением), в частности, объемной плотности.

Устройство машины Lap FormAir и режимы ее работы должны обеспечить не только малые случайные колебания производительности, но и соответствие средней массы пробы заданному по рецептуре значению пробы:

$$m_{\text{зад}} = Qt \quad (3.13)$$

Рассмотрим процесс формирования холста за счет регулировок элементов оборудования секции разрыхления и нижней формирующей камеры (рисунок 3.12) с целью прогнозирования высоты формируемого волокнистого холста (рисунок 3.16).

Массовый объем волокнистого материала, подаваемый на формирующий цилиндр (поз.3, рисунок 3.16), зависит от расстояния между питающими цилиндрами n (поз. 1 и 2, рисунок 3.16):

$$Q_{m1(2)} = \frac{60}{1000} \rho S_{\text{щ}} V_{1(2)}, \text{ кг/с}, \quad (3.14)$$

где ρ – плотность волокнистого материала, кг/м³; $S_{\text{щ}}$ – площадь щели между распределяющими валиками, м²; $V_{1(2)}$ – скорость вращения питающих цилиндров, м/с, $V_{1(2)} = W_{1(2)} R_{1(2)}$.

$$S_{\text{щ}} = mn, \quad (3.15)$$

где m – длина питающих цилиндров, м.

Длина питающих цилиндров m равна длине формирующего цилиндра и равна ширине сформированного холста a .

Далее рассмотрим массовый объем волокнистого материала, подаваемый через питающую шахту (поз. 5, рисунок 3.16) на ленту транспортера:

$$Q_{mp} = S_{c,np} \rho V_{mp}, \text{ кг/с}, \quad (3.16)$$

где ρ – объемная плотность волокнистого материала в холсте, кг/м³; $S_{c,np}$ – площадь поперечного сечения продукта, м²; V_{mp} – скорость движения ленточного транспортера, м/с.

В данном случае объем подаваемого волокнистого материала на ленту будет зависеть от площади сечения и скорости транспортирования ленты, т.е. эти два показателя являются управляющими параметрами. Площадь поперечного сечения продукта есть ничто иное, как площадь сечения волокнистого холста

$$S_{c,ex} = ah, \text{ м}, \quad (3.17)$$

где a – ширина холста (ширина ленты транспортера), м; h – высота холста, м.

Тогда

$$Q_{mp} = \rho a h V_{mp}, \text{ кг/с.} \quad (3.18)$$

Для ленточных дозаторов объем подаваемого материала равен [93]

$$Q = 3600 S_{c.вх} V_{mp} \rho = 3600 a h V_{mp} \rho, \text{ кг/с.} \quad (3.19)$$

Рассмотрим подачу волокнистого материала на формирующем цилиндре (поз. 3, рисунок 3.16). С учетом того, что формирующий цилиндр имеет иглы, установленные в ряд, можно определить его объемный расход в зависимости от количества рядов игл и наружного и внешнего диаметров, представив ряд игл в виде пластины, захватывающей при обороте волокнистый материал, что соответствует производительности барабанного дозатора [93]:

$$Q = S_{из} \delta z W \rho, \text{ кг/с,} \quad (3.20)$$

где W – угловая скорость вращения формирующего цилиндра, с^{-1} ; δ – длина ряда игл (длина формирующего цилиндра), м, $\delta = a$; z – количество рядов игл, шт.; ρ – плотность материала, кг/м^3 .

Объем материала, попадающий между рядами игл, можно определить исходя из площади канавок S_k между рядами игл, т.е.

$$S_{из} = S_k = \frac{D-d}{2} \epsilon, \quad (3.21)$$

где D – диаметр внешней окружности формирующего цилиндра, м; d – диаметр внутренней окружности формирующего цилиндра, м; ϵ – длина формирующего цилиндра, равная ширине холста, м, $\epsilon = a$.

В этом случае формула (3.20) примет вид

$$Q = W \rho a z \frac{D-d}{2} a, \text{ кг/с.} \quad (3.22)$$

Для того, чтобы формирующий цилиндр подавал необходимую для транспортирующей ленты и формирования нужной высоты холста массу волокнистого материала, объемы подачи по формулам (3.19) и (3.22) должны быть равны, или на формирующем цилиндре больше, чем

на выходе из питающей шахты. Следовательно, из системы уравнений можно выразить искомую высоту формируемого холста:

$$\begin{cases} Q = 3600ahV_{mp}\rho \\ Q = W\rho az \frac{D-d}{2}a \end{cases} \quad (3.23)$$

Тогда

$$h = \frac{W\rho az(D-d)a}{2 \cdot 3600ahV_{mp}\rho} = \frac{Wz(D-d)a}{2 \cdot 3600V_{mp}}, \text{ м.} \quad (3.24)$$

Из формулы (3.24) видно, что варьируемыми показателями при регулировании высоты холста являются: W – скорость вращения формирующего цилиндра, V_{mp} – скорость ленты транспортера. Но также установлено, что расстояние между пластинами питающей шахты равно высоте холста – h .

С помощью ПЭУ на предприятии можно задать массу одного метра квадратного (кг/м^2) пробы, что по сути является поверхностной плотностью холста. Данный параметр не дает возможности прогнозировать его высоту, поэтому на предприятии подбирают ее экспериментально. Для доказательства этого проинтегрируем выражение (3.12):

$$m_{np}t = \frac{Qt^2}{2}, \quad (3.25)$$

$$m_{np} = \frac{Qt}{2}. \quad (3.26)$$

Подставим в формулу (3.26) данные формулы (3.18)

$$m_{np} = \frac{ah\rho V_{mp}t}{2}. \quad (3.27)$$

Исходя из данных, задаваемых в параметрах машины, и зная, что поверхностная плотность равна

$$\rho_{нов} = \frac{m}{F}, \text{ кг/м}^2, \quad (3.28)$$

где F – это площадь образца, м^2 ; m – масса образца, кг.

Тогда формула (3.27) примет вид:

$$\rho_{нов} aS = \frac{ah\rho V_{mp}t}{2}, \quad (3.29)$$

где S – это расстояние, пройденное продуктом по ленте за время t , м.

Задавая в параметрах работы машины поверхностную плотность, имеем:

$$\rho_{нов} = \frac{ah\rho V_{mp}t}{2aS} = \frac{h\rho V_{mp}t}{2S}, \text{ кг/м}^2. \quad (3.30)$$

Объемная масса волокнистого материала при этом равна

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{aSh}, \quad (3.31)$$

где V – это объем волокнистого материала, м³.

Тогда

$$\rho_{нов} = \frac{mV_{mp}t}{2S^2}. \quad (3.32)$$

Из формулы (3.32) видно, что, регулируя режимы работы машины только поверхностной плотностью (на производстве $V_{mp} = const$), высоту холста прогнозировать нельзя, что и требовалось доказать. Поэтому проектирование холста определенной высоты при выборе режимов работы машины Lap FormAir можно использовать формулу (3.24). Но предварительно сравним теоретические данные и данные, полученные экспериментальным путем.

На рисунке 3.17 представлен график распределения экспериментальных данных и результатов расчетов высоты холста при варьировании W – скорости вращения формирующего цилиндра и V_{mp} – скорости движения ленты транспортера.

Как видно из рисунка 3.17 наблюдается отклонение значения высоты холста, полученное теоретически в сравнении с экспериментальными данными. Судить о величине отклонения можно по результатам, представленным в таблице 3.16. Необходимо отметить, что максимальная скорость транспортера составляет 15 м/мин – это обозначило верхний предел значений таблицы 3.16.

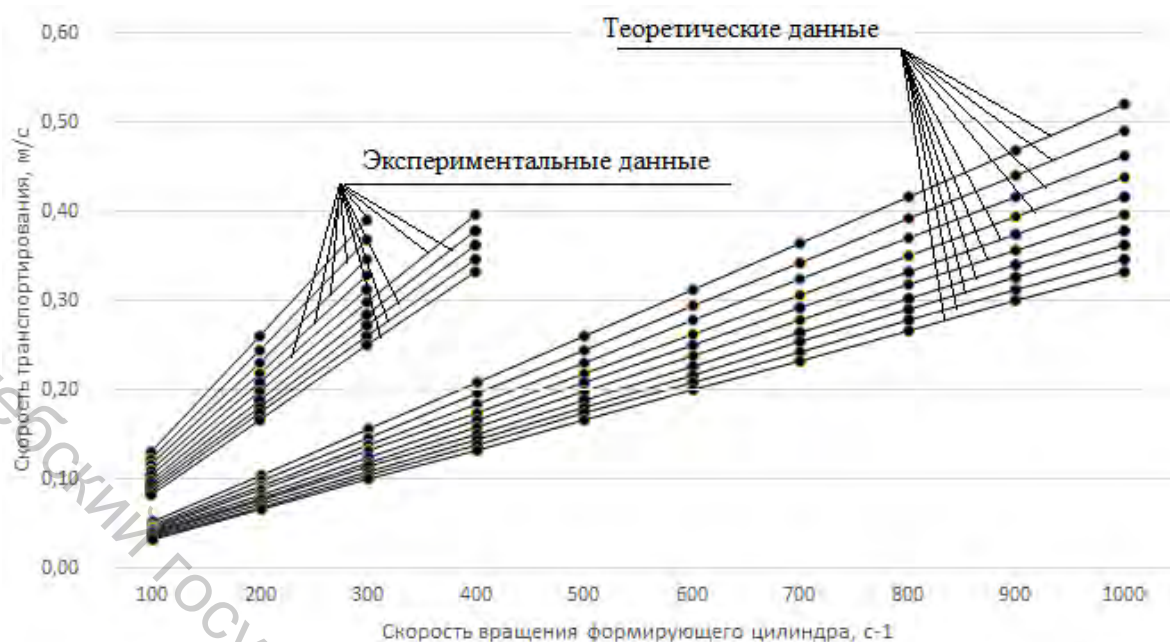


Рисунок 3.17 – Зависимость высоты холста от варьируемых параметров работы машины Lap FormAir

Таблица 3.16 – Значения высоты холста от варьируемых параметров работы машины Lap FormAir

Скорость транспортирования, м/с	Высота холста, м											
	при скорости вращения формирующего цилиндра 100 с ⁻¹			при скорости вращения формирующего цилиндра 200 с ⁻¹			при скорости вращения формирующего цилиндра 300 с ⁻¹			при скорости вращения формирующего цилиндра 400 с ⁻¹		
	отклонение		отклонение	отклонение		отклонение	отклонение		отклонение	отклонение		отклонение
	теоретическое	экспериментальное		теоретическое	экспериментальное		теоретическое	экспериментальное		теоретическое	экспериментальное	
0,16	0,07	0,05	0,7	0,13	0,10	0,8	0,20	0,16	0,8		0,21	
0,17	0,06	0,05	0,8	0,12	0,10	0,8	0,18	0,15	0,8		0,20	
0,18	0,06	0,05	0,8	0,12	0,09	0,8	0,17	0,14	0,8		0,19	
0,19	0,05	0,04	0,8	0,11	0,09	0,8	0,16	0,13	0,8		0,18	
0,2	0,05	0,04	0,8	0,10	0,08	0,8	0,16	0,13	0,8		0,17	
0,21	0,05	0,04	0,8	0,10	0,08	0,8	0,15	0,12	0,8	0,20	0,16	0,8
0,22	0,05	0,04	0,8	0,09	0,08	0,9	0,14	0,11	0,8	0,19	0,15	0,8
0,23	0,05	0,04	0,8	0,09	0,07	0,8	0,14	0,11	0,8	0,18	0,14	0,8
0,24	0,04	0,03	0,8	0,09	0,07	0,8	0,13	0,1	0,8	0,17	0,14	0,8
0,25	0,04	0,03	0,8	0,08	0,07	0,9	0,13	0,1	0,8	0,17	0,13	0,8

Как видно из таблицы 3.16, разница значений высоты холста от варьируемых параметров работы машины Lar FormAir составила 0,8. Это связано с разностью объемной плотности на каждом из этапов формирования холста. Следовательно, формула (3.24) примет вид:

$$h = \frac{Wz(D-d)a}{2 \cdot 3600V_{mp}0,8} \quad (3.33)$$

Данный коэффициент обозначим λ – это коэффициент, учитывающий степень уплотнения продукта на разных стадиях технологического процесса формирования нетканых материалов.

$$h = \frac{Wz(D-d)a}{2 \cdot 3600V_{mp}\lambda} \quad (3.34)$$

Полученная математическая зависимость (3.34) может быть использована при проектировании нетканых материалов в процессе формирования холста, при регулировании параметров работы оборудования, а именно скорости вращения формирующего цилиндра и скорости движения ленты транспортера. Для прогнозирования высоты холста можно использовать данные таблицы 3.17, рассчитанные по формуле (3.34).

Таблица 3.17 – Значения высоты формируемого холста

Скорость транспор- тирования, м/с	Скорость вращения формирующего цилиндра, с ⁻¹									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,06	0,17	0,35	0,52	0,69	0,87	1,04	1,22	1,39	1,56	1,74
0,07	0,15	0,30	0,45	0,60	0,74	0,89	1,04	1,19	1,34	1,49
0,08	0,13	0,26	0,39	0,52	0,65	0,78	0,91	1,04	1,17	1,30
0,09	0,12	0,23	0,35	0,46	0,58	0,69	0,81	0,93	1,04	1,16
0,1	0,10	0,21	0,31	0,42	0,52	0,63	0,73	0,83	0,94	1,04
0,11	0,09	0,19	0,28	0,38	0,47	0,57	0,66	0,76	0,85	0,95
0,12	0,09	0,17	0,26	0,35	0,43	0,52	0,61	0,69	0,78	0,87
0,13	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40	0,48	0,56	0,64	0,72	0,80
0,14	0,07	0,15	0,22	0,30	0,37	0,45	0,52	0,60	0,67	0,74
0,15	0,07	0,14	0,21	0,28	0,35	0,42	0,49	0,56	0,63	0,69
0,16	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	0,59	0,65
0,17	0,06	0,12	0,18	0,25	0,31	0,37	0,43	0,49	0,55	0,61
0,18	0,06	0,12	0,17	0,23	0,29	0,35	0,41	0,46	0,52	0,58
0,19	0,05	0,11	0,16	0,22	0,27	0,33	0,38	0,44	0,49	0,55
0,2	0,05	0,10	0,16	0,21	0,26	0,31	0,36	0,42	0,47	0,52
0,21	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50

Окончание таблицы 3.17

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,22	0,05	0,09	0,14	0,19	0,24	0,28	0,33	0,38	0,43	0,47
0,23	0,05	0,09	0,14	0,18	0,23	0,27	0,32	0,36	0,41	0,45
0,24	0,04	0,09	0,13	0,17	0,22	0,26	0,30	0,35	0,39	0,43
0,25	0,04	0,08	0,13	0,17	0,21	0,25	0,29	0,33	0,38	0,42

Примечание – цветом выделены значения высоты холста, которые превышают возможное значение в связи с ограничением используемого на предприятии оборудования.

3.1.3 Исследование процесса формирования нетканого полотна при воздействии температуры

Как уже отмечалось ранее, термофиксация нетканого материала в печи происходит при воздействии температуры за счет расплава связующих волокон, равномерно распределенных в холсте.

В качестве термосвязующего (скрепляющего) волокна предлагается использовать полиэфирное бикомпонентное волокно марки 4DE51, производства Корея (рисунок 3.18), и полиэфирное волокно марки 6DE64, производства Корея (рисунок 3.19) – полое высокоизвитое несиликонизированное волокно (non-Silicon polyester fiber (HCnS)).



Рисунок 3.18 – Внешний вид полиэфирного бикомпонентного волокна марки 4DE51



Рисунок 3.19 – Внешний вид полиэфирного волокна марки 6DE64

Производителем данных волокон (рисунки 3.17 и 3.18) заявлена температура плавления:

- БИК 4DE51 – 140–160 °C,
- полиэфирное волокно 6DE64 – 160–180 °C.

Бикомпонентное полиэфирное волокно марки 4DE51 имеет в своей структуре две составляющие – ядро и оболочку. За счет низкой температуры плавления оболочки бикомпонентное полиэфирное волокно (БИК), именуемое также «легкоплав», используется как

связующий элемент. Внешний вид такого волокна под микроскопом представлен на рисунке 3.20.

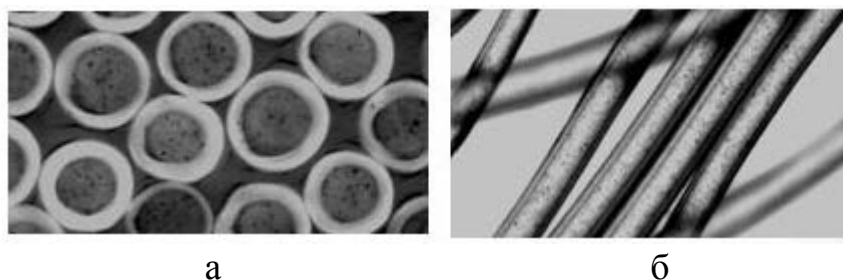


Рисунок 3.20 – Внешний вид бикомпонентного полиэфирного волокна:
а – вид поперечного сечения волокна, б – вид волокна по длине

Оболочка БИК выполнена из полиэтилена и имеет свойства повышенной мягкости, а также характеризуется низкой температурой соединения и таким образом может быть использована в качестве связующего материала в смеси волокон или с другими материалами. Материал ядра (полиэфир) обычно используется для обеспечения целостности продукта. Ядро не расплавляется во время соединения и формирует трехмерную сеть, придавая нетканому продукту прочность.

Процесс сушки (стабилизации) материала осуществляется следующим образом: материал автоматически размещается машиной на перфорированном конвейере перед печью и продвигается по ходу линии между двумя перфорированными лентами транспортера. Печь состоит из горячих камер и секции охлаждения. В горячей камере воздух сначала форсировано вдувается вентиляторами через диффузор. На горелке воздух нагревается до нужной установленной температуры обработки волокон. В секции охлаждения вентилятор работает в режиме всасывания, используя внешний воздух для охлаждения и стабилизации продукта. Затем воздух выдувается через вытяжную трубу.

При воздействии температуры все волокна волокнистой смеси претерпевают изменения. Рассмотрим поведение полотна экспериментальной смеси, представленной в таблице 3.12 в процессе стабилизации. Высота холста смеси при выходе с машины Lap FormAir составляла 0,20 м, после прохождения печи при режимах и параметрах, указанных в таблице 3.18, составила 0,16 м, ширина холста до сушки – 1,0 м, после – 0,98 м.

Таблица 3.18 – Технические характеристики печи термоскрепления

Показатель	Единица измерения	Значение показателя
Длина печи	м	9
Температура воздействия	$^{\circ}\text{C}$	180
Скорость прохождения	м/мин	15

Следовательно, усадка полотна по высоте составила 20 %, по ширине – 2 %, что говорит об анизотропии нетканого полотна.

Проведем анализ процентного содержания компонентов на выходе из печи для образца, представленного в таблице 3.12. Испытания проводились в Центре испытаний и сертификации УО «ВГТУ». Результаты, согласно протоколу испытаний, представлены в таблице 3.19.

Таблица 3.19 – Процентное содержание компонентов

Доля компонента в исследуемой пробе сформированного холста		Доля компонента в исследуемой пробе нетканого материала	
наименование компонента	содержание, %	наименование компонента	содержание, %
1	2	3	4
полипропилен	15	полиэфир	40
полиэфир	43	шерсть	10
полиамид	13	другие виды волокон (полиамид, вискоза, хлопок)	50
шерсть	13		
вискоза	8		
хлопок	8		

Примечание – доля компонента в исследуемой пробе нетканого материала находилась по двум видам волокон, так как в протоколе испытаний содержание компонента ниже 10 % не выявлялось.

Как видно из таблицы 3.19, доля компонентов в исследуемой пробе нетканого материала уменьшилась, по сравнению с данными исследуемой пробы сформированного холста. Данные изменения связаны с поведением волокон, входящих в смесь. Некоторые из свойств волокон, входящих в экспериментальную смесь, представлены в таблице 3.20 [94, 95].

Таблица 3.20 – Свойства компонентов, входящих в экспериментальную смесь

Наименование компонента		Температура, °С		Усадка при температуре плавления, %
		плавления	разрушения	
полипропилен		130-170	325	12-15
полиэфир		255-260	341	40-50
бикомпонентное полиэфирное волокно	ядро (полиэфир)	255-260	341	40-50
	оболочка (полиэтилен)	130-145	349	1-2
полиамид		254-260	355	1-2
шерсть		-	170*	2-3
вискоза		-	150-160	5-8
хлопок		-	180-220	2-6

Примечание – * при температуре 100–105 °С шерсть не разрушается, а становится жесткой и ломкой.

Из таблицы 3.20 видно, что полипропилен, полиэтилен, входящий в БИК, расплавились – в готовом материале они не распознаны, а шерсть и хлопок при температуре работы печи близки к разрушению, что объясняет снижение их доли в готовом материале.

Рассматриваемый способ получения нетканых материалов относится к физико-химическим способам, основанным на формировании склеек из полимеров, входящих в смесь и находящихся под воздействием температуры. Активация клеящей способности волокон заключается в переходе их в вязко-текучее состояние. Полимеры (полипропилен, полиэфир, полиамид) в этом состоянии подобно жидкостям способны растекаться по поверхности волокон и смачивать ее, что необходимо для формирования адгезионного контакта и получения прочной адгезионной связи.

Так как склейки создаются прослойкой связующего между волокнами в местах их пересечений, они считаются контактными [89]. Они имеют минимальные размеры и прочность, оптимальную шарнирную подвижность (рисунок 3.21).

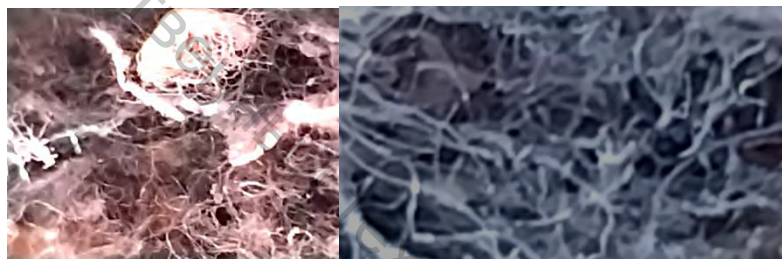


Рисунок 3.21 – Внешний вид нетканых композиционных материалов под микроскопом

Ширина готового полотна должна быть не менее 1,0 м. Усадка в 1 см по ширине нетканого материала компенсируется при прохождении через уплотняющий каландр в зоне охлаждения. При этом неровности обрезаются продольным резак.

Следовательно, при формировании нетканых материалов важной характеристикой является усадка и интервал температур, в котором она обнаруживается. Однако необходимо знать не только возможное изменение размеров полотна в результате усадки, но и скорость этого процесса при различных температурах.

Как для любого термически активируемого релаксационного процесса, скорость усадки и время усадки определяется энергией активации. Следовательно, представляет интерес определения релаксационных параметров процесса усадки полотна по данным линейной дилатометрии с целью установления механизма, кинетики процесса усадки и оценки стабильности нетканых полотен, с содержанием полимеров при различных температурах.

Таким образом, для оптимизации технологического процесса термофиксации необходимо подобрать такую температуру воздействия на материал, которая позволит создать клеи, достаточные для адгезии, при этом не изменит ширину полотна в готовом виде. Для этого проведем эксперимент, используя смеси с разным процентным содержанием связующего волокна, в одних из которых связующее БИК 4DE51, в других – полиэфирное волокно 6DE64 (таблица 3.21).

Таблица 3.21 – Состав экспериментальных смесей

№	Наименование компонента	Доля компонента в смеси, %	№	Наименование компонента	Доля компонента в смеси, %
1	2	3	4	5	6
1	БИК 4DE51	15	4	6DE64	15
	регенерированное волокно	85		регенерированное волокно	85
2	БИК 4DE51	25	5	6DE64	25
	регенерированное волокно	75		регенерированное волокно	75
3	БИК 4DE51	35	6	6DE64	35
	регенерированное волокно	65		регенерированное волокно	65

Планируемая толщина полотна – 27 мм, скорость движения ленты 15 м/мин, продолжительность воздействия температуры на образцы 36 с. Усадкой холста первоначальной высотой 0,2 м будем пренебрегать, так как в последующем материал уплотняется до 27 мм.

Результаты испытаний представлены на рисунке 3.19. Необходимо отметить, что максимально возможная усадка полотна для получения ширины готового материала, равной 1,0 м, должна быть не более 1 %.

Нижний предел температуры эксперимента выбран по температуре плавления полиэтилена, высший – по максимально возможной температуре работы печи. По результатам эксперимента (рисунок 3.22) видно, что для получения материала необходимой ширины, смеси с содержанием волокна БИК 4DE51 должны подвергаться сушке при температуре в интервале 130÷160 °С, с содержанием волокна марки 6DE64 – 130-178 °С.

В зависимости от области применения нетканых материалов к ним предъявляются различные требования по физико-механическим свойствам, например, разрывной нагрузке, поэтому нижний предел температуры воздействия на сформированный холст может быть увеличен за счет недостаточного количества образующихся склеек. Поэтому для формирования качественного, прочного, достаточного по ширине полотна, рекомендуется максимальная температура сушки:

- при использовании связующих БИК волокон марки 4DE51 – 160 °С,
- при использовании полиэфирного волокна марки 6DE64 – 178 °С.

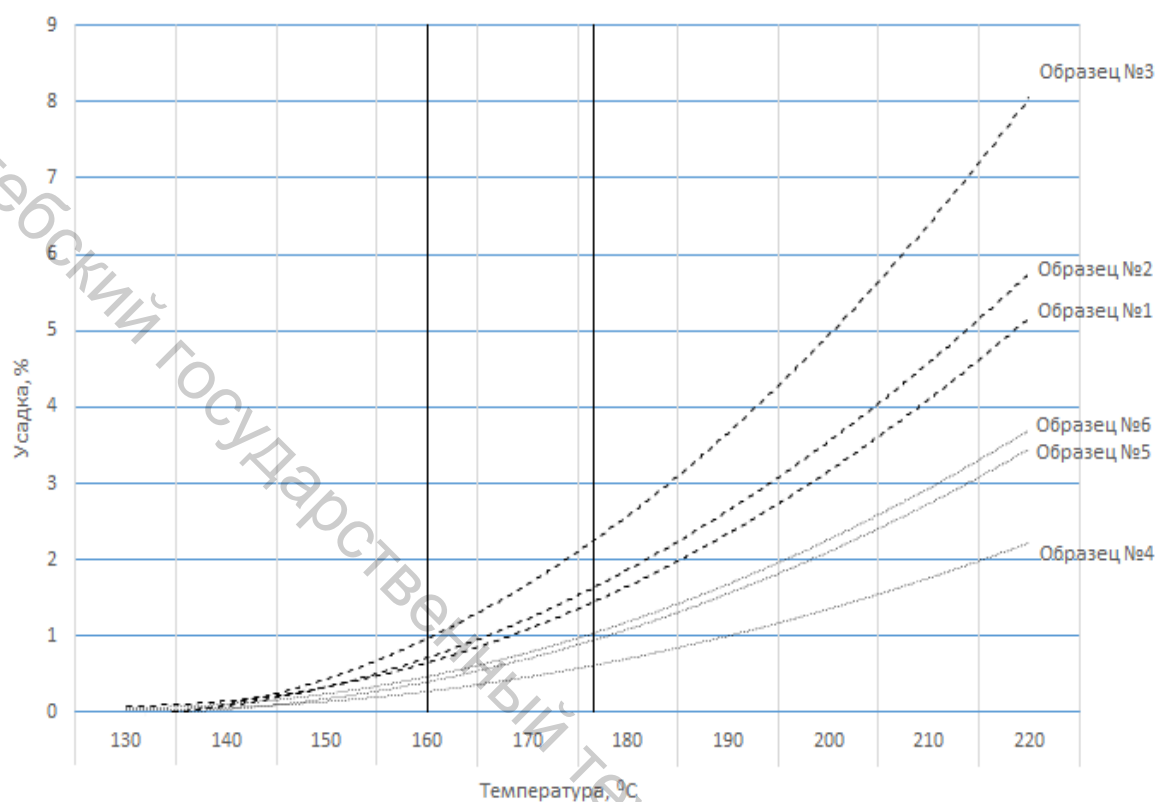


Рисунок 3.22 – Графики зависимости величины усадки образцов от температуры воздействия

3.1.4 Оптимизации технологического процесса производства нетканых материалов с использованием текстильных отходов

С целью определения оптимального состава волокнистого холста для формирования нетканых полотен и возможности использования в производстве исследуемых видов текстильных отходов был проведен ряд экспериментов [88].

Для экспериментальных исследований и наработки опытной партии нетканых материалов было выбрано три волокнистых состава смеси с различным процентным содержанием компонентов (таблица 3.22) для применения их в машиностроении в качестве шумоизоляционных полотен багажника автомобилей.

Таблица 3.22 – Экспериментальные составы смеси

№ образца	Волокнистый состав	Процентное содержание, %
1	2	3
1	отходы кромки грунтовой ткани	40
	полиэфирное бикомпонентное волокно марки 4DE51, производства Корея	15
	полиэфирное волокно марки 6DE64, производства Корея	45
2	отходы кромки грунтовой ткани	50
	полиэфирное бикомпонентное волокно марки 4DE51, производства Корея	15
	полиэфирное волокно марки 6DE64, производства Корея	35
3	отходы кромки грунтовой ткани	60
	полиэфирное бикомпонентное волокно марки 4DE51, производства Корея	15
	полиэфирное волокно марки 6DE64, производства Корея	25
4	отходы кромки грунтовой ткани	70
	полиэфирное бикомпонентное волокно марки 4DE51, производства Корея	15
	полиэфирное волокно марки 6DE64, производства Корея	15
5	отходы кромки грунтовой ткани	50
	полиэфирное бикомпонентное волокно марки 4DE51, производства Корея	5
	полиэфирное волокно марки 6DE64, производства Корея	45
6	отходы кромки грунтовой ткани	40
	полиэфирное бикомпонентное волокно марки 4DE51, производства Корея	25
	полиэфирное волокно марки 6DE64, производства Корея	35
7	отходы кромки грунтовой ткани	40
	полиэфирное бикомпонентное волокно марки 4DE51, производства Корея	5
	полиэфирное волокно марки 6DE64, производства Корея	55
8	отходы кромки грунтовой ткани	65
	полиэфирное бикомпонентное волокно марки 4DE51, производства Корея	15
	регенерированное волокно (измельченные межлекальные отходы швейного производства)	20
9	отходы кромки грунтовой ткани	40
	полиэфирное бикомпонентное волокно марки 4DE51, производства Корея	20
	регенерированное волокно (измельченные межлекальные отходы швейного производства)	40

Окончание таблицы 3.22

1	2	3
10	отходы кромки грунтовой ткани	50
	полиэфирное бикомпонентное волокно марки 4DE51, производства Корея	10
	регенерированное волокно (измельченные межлекальные отходы швейного производства)	40
11	полиэфирное бикомпонентное волокно марки 4DE51, производства Корея	15
	регенерированное волокно (измельченные межлекальные отходы швейного производства)	85
12	полиэфирное бикомпонентное волокно марки 4DE51, производства Корея	5
	регенерированное волокно (измельченные межлекальные отходы швейного производства)	95
13	полиэфирное бикомпонентное волокно марки 4DE51, производства Корея	25
	регенерированное волокно (измельченные межлекальные отходы швейного производства)	75
14	полиэфирное бикомпонентное волокно марки 4DE51, производства Корея	35
	регенерированное волокно (измельченные межлекальные отходы швейного производства)	65

Наработка образцов выполнялась в производственных условиях ООО «Акотерм-Флакс» с учетом режимов, установленных на предприятии, и режимов, полученных в ходе исследований на данной линии оборудования:

- скорость движения транспортируемой ленты – 15 м/мин,
- температура воздействия на волокнистую смесь в печи – 170 °С,
- расстояние между каландром и металлической пластиной в секции охлаждения – 25 мм.

В качестве варьируемого параметра выступал волокнистый состав смеси. Результаты испытаний наработанных образцов представлены в таблице 3.23 [88].

Таблица 3.23 – Результаты испытаний образцов

Показатель	Номер образца													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Наименование показателя	Толщина, мм													
Результат испытаний	27	28	29	30	28	27	27	26	25	27	28	29	28	28
Значение НТД	27±2													

Окончание таблицы 3.23

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Наименование показателя	Разрывная нагрузка по длине, Н													
Результат испытаний	16,8	16,7	16,8	16,9	14,2	19,8	14,2	16,7	18,7	15,4	16,7	14,3	19,8	20,6
Значение НТД	не менее 40													
Наименование показателя	Разрывная нагрузка по ширине, Н													
Результат испытаний	82,6	80,2	80,0	81,0	65,7	82,8	68,8	80,2	81,3	79,3	67,8	65,2	82,6	83,7
Значение НТД	не менее 70													
Наименование показателя	Поверхностная плотность, г/м ²													
Результат испытаний	850	910	1134	1210	920	820	830	1205	960	920	1100	1130	1020	980
Значение НТД	1000±10% (100)													
Наименование показателя	Неровнота по массе, %													
Результат испытаний	3,8	3,8	3,9	4,2	3,8	3,8	3,9	4,8	4,3	4,6	5,2	6,3	5,1	4,9
Значение НТД	не более 12													
Наименование показателя	Огнеопасность, мм/мин													
Результат испытаний	образцы погасли, не догорев до начальной мерной базы													
Значение НТД	не более 100													
Наименование показателя	Биостойкость (устойчивость к гниению)													
Результат испытаний	соответствует													
Значение НТД	на допускается появление плесени и запаха гниения													

Как видно из таблицы 3.23, ни один образец не соответствует требованиям НТД по показателю «разрывная нагрузка – по длине». Показатели НТД устанавливаются заказчиком, согласно ТТ (технологический требований), и зависят от области применения полотен. Также следует отметить, что при одной и той же толщине материала наблюдаются различия в поверхностной плотности материала. Это может быть связано с извитостью полиэфирных волокон при формировании холста [88].

Рассмотрим зависимости влияния содержания волокнистого материала в смеси на исследуемые показатели. На рисунке 3.23 представлена зависимость толщины полотна от процента содержания кромки грунтовой ткани в смеси [88].

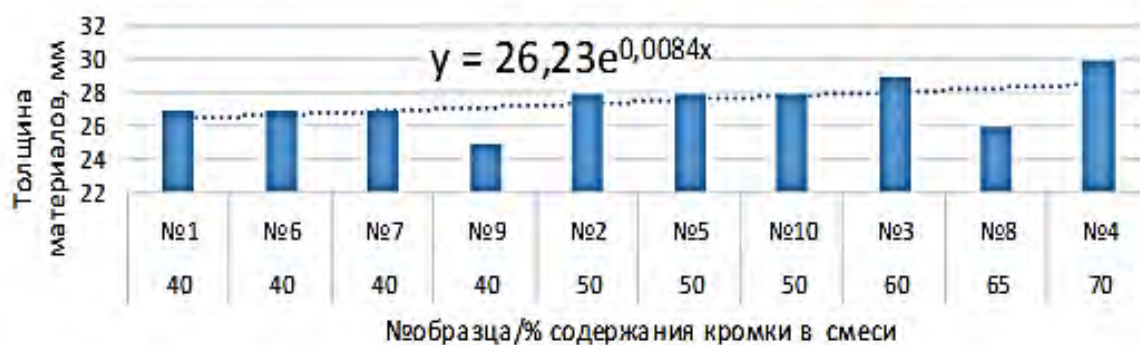


Рисунок 3.23 – Диаграмма зависимости толщины от процента содержания крошки в смеси

Как видно из рисунка 3.23 при увеличении содержания в смеси количества крошки грунтовой ткани незначительно увеличивается толщина полотна. Уравнение зависимости представлено на диаграмме. Зависимость является экспоненциальной. Отклонение толщины от нормируемого показателя по всем образцам представлено на рисунке 3.24 [88].

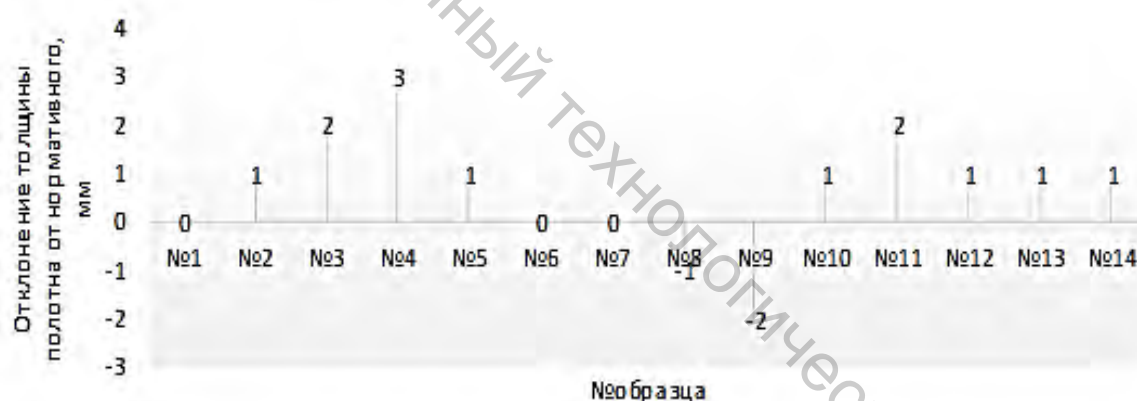


Рисунок 3.24 – Диаграмма отклонения толщины полотна от нормативного

На рисунке 3.24 видно, что наибольшее отклонение (выше нормативного) наблюдается у образца № 4. На рисунке 3.25 представлена диаграмма зависимости толщины полотна от содержания бикомпонентного волокна в смеси [88].



Рисунок 3.25 – Диаграмма зависимости толщины от процента содержания бикомпонентного волокна в смеси

Как видно из рисунка 3.25, никакой зависимости между толщиной полотна и процентом содержания бикомпонентного волокна в смеси не наблюдается, следовательно, данный параметр не оказывает влияния на такой показатель, как толщина готового полотна [88].

На диаграмме (рисунок 3.26) представлена зависимость разрывной нагрузки по длине и ширине от процентного содержания в смеси бикомпонентного волокна.

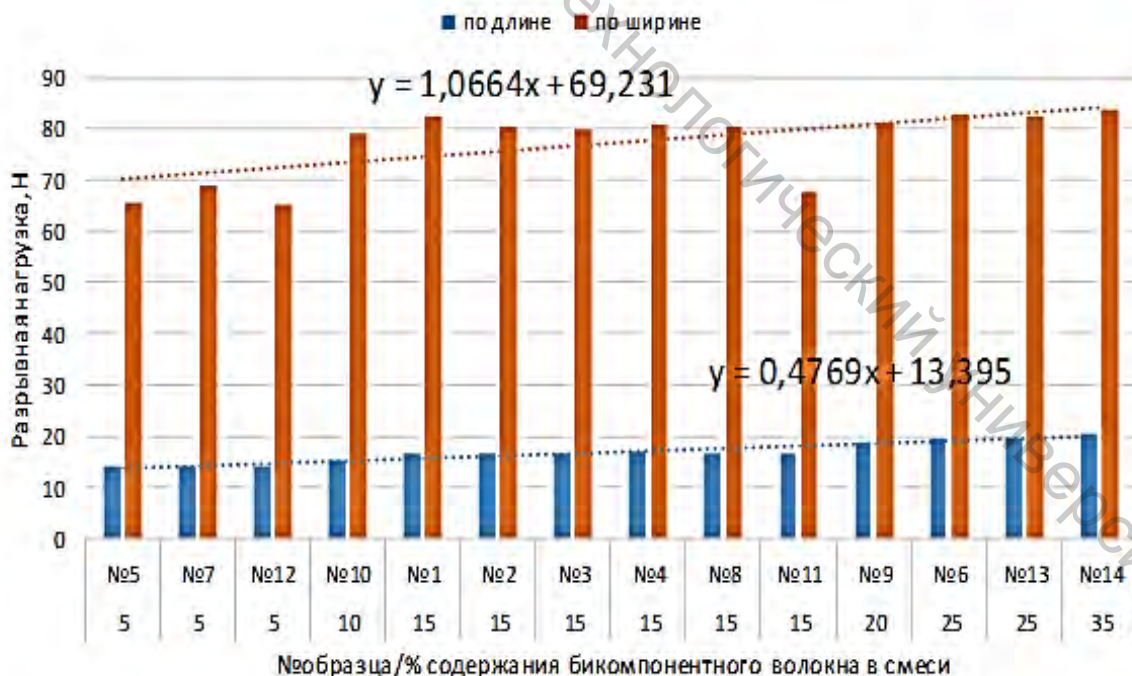


Рисунок 3.26 – Диаграмма зависимости разрывной нагрузки по длине и ширине от процентного содержания в смеси бикомпонентного волокна

Как видно из рисунка 3.26, при увеличении содержания в смеси количества бикомпонентного волокна увеличивается разрывная нагрузка полотна. Уравнения зависимости представлены на диаграмме. Зависимость является линейной. Отклонение разрывной нагрузки от нормируемого показателя по всем образцам представлено на рисунках 3.27, 3.28 [88].

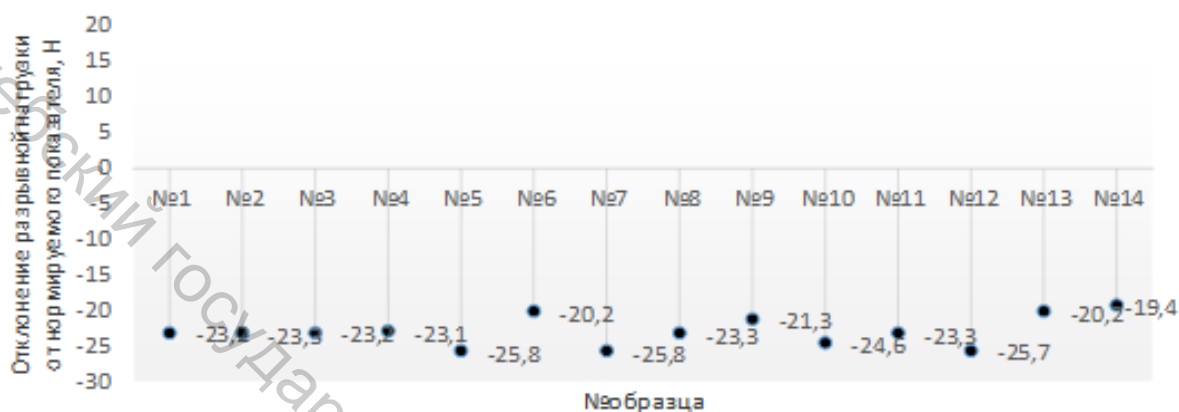


Рисунок 3.27 – Диаграмма отклонения разрывной нагрузки по длине полотен от нормируемого значения

Разрывная нагрузка по длине для всех образцов не соответствует норме, равной не менее 40 Н [88].

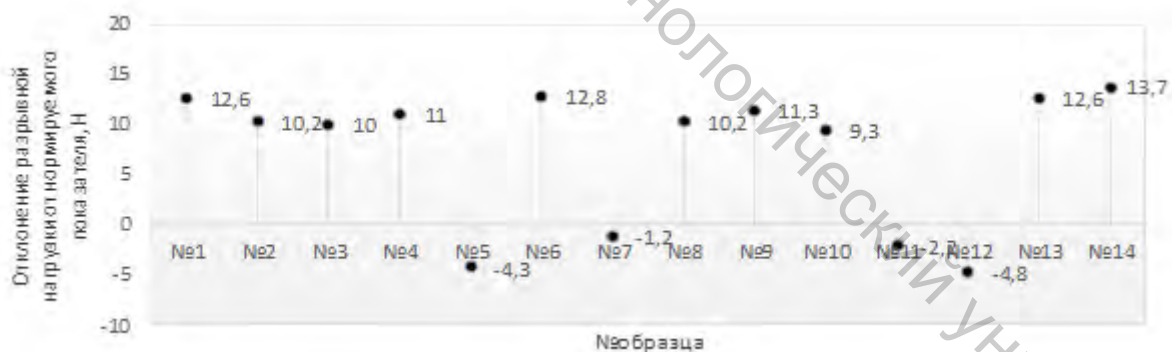


Рисунок 3.28 – Диаграмма отклонения разрывной нагрузки по ширине полотен от нормируемого значения

По ширине полотна разрывная нагрузка должна быть не менее 70, следовательно, как видно из диаграммы на рисунке 3.28, образцы № 5, 7, 11 и 12 не соответствуют требованиям ТТ Заказчика.

Рассмотрим зависимость поверхностной плотности полотен от содержания в них текстильных отходов в виде лоскута (рисунок 3.29).

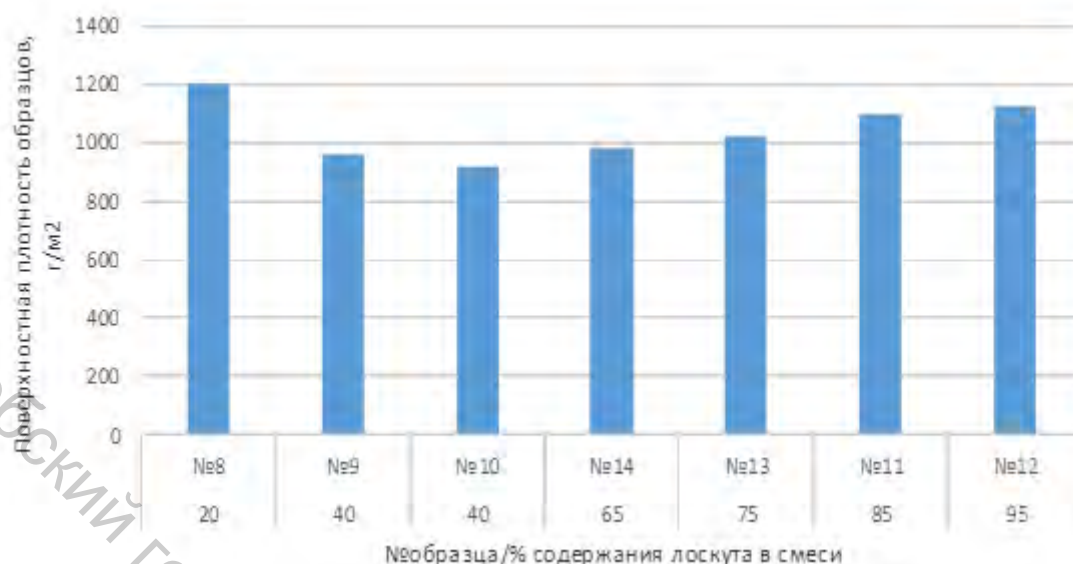


Рисунок 3.29 – Диаграмма зависимости поверхностной плотности от процентного содержания в смеси лоскута

Как видно из рисунка 3.29, образец № 8 «выпадает» и нарушает закономерность, это может объясняться тем, что из представленных на диаграмме образцов, он единственный с содержанием в смеси отходов кромки в грунтовой ткани. На рисунке 3.30 представлена диаграмма зависимости без образца № 8 [88].



Рисунок 3.30 – Диаграмма зависимости поверхностной плотности от процентного содержания в смеси лоскута

Из диаграммы на рисунке 3.30 видно, что при увеличении процента содержания лоскута в смеси увеличивается плотность полотна. Отсюда следует, что увеличение текстильных отходов в смеси уменьшает их пористость, следовательно, увеличивает объемную массу,

отсюда и повышается поверхностная плотность. То же самое происходит и при увеличении содержания отходов крошки грунтовой ткани в смеси (рисунок 3.31). Уравнение линейной зависимости представлено на диаграмме [88].



Рисунок 3.31 – Диаграмма зависимости поверхностной плотности от процентного содержания в смеси крошки грунтовой ткани

Отклонение поверхностной плотности от нормируемого значения по всем образцам представлено на рисунке 3.32.



Рисунок 3.32 – Диаграмма отклонения поверхностной плотности полотен от нормируемого значения

Допустимое значение отклонения поверхностной плотности от нормы – 100 г/м², следовательно, по рисунку 3.32 видно, что «выпадают» образцы №№ 1, 3, 4, 6, 7, 8 и 12. Однако следует отметить, что несоответствие образцов по поверхностной плотности не исключает их возможности использования в других направлениях и областях, например, в качестве теплоизоляционных ламинированных полотен, прокладочных материалов в специальной одежде [96, 97].

На рисунке 3.33 представлены результаты испытания образцов по показателю «неровнота по массе».

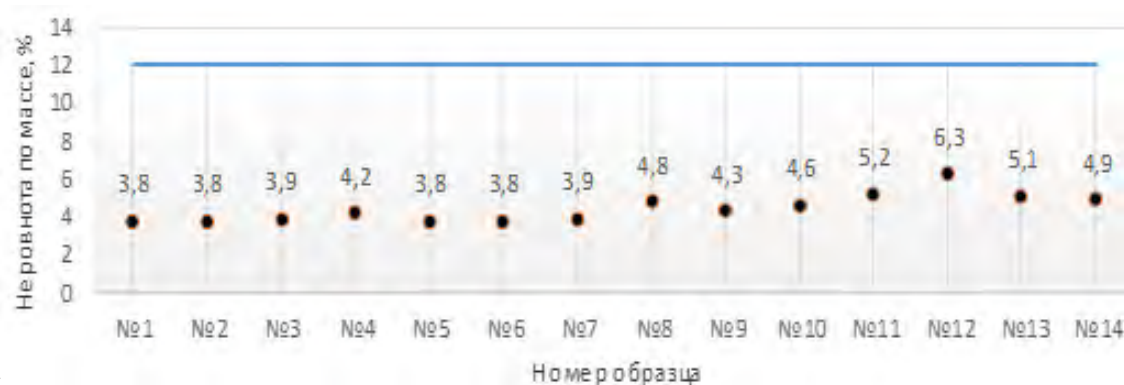


Рисунок 3.33 – Диаграмма отклонения неровноты по массе от нормируемого значения

Как видно из диаграммы на рисунке 3.33, все образцы соответствуют по неровноте по массе нормируемому значению – не более 12 %.

По биостойкости и огнеопасности все образцы соответствуют требованиям НТД.

Таким образом установлено, что по всем показателям проведенных испытаний (кроме разрывной нагрузки по длине полотна) образцы № 2, 5, 9, 10, 11, 13 и 14 соответствуют норме. Однако при одних и тех же характеристиках у них различные волокнистые составы (таблица 3.22), в которых присутствует дорогостоящее бикомпонентное волокно. Поэтому для снижения себестоимости продукции можно не рекомендовать эти составы смесей для внедрения в производство. Следовательно, для внедрения рекомендуются составы смеси, представленные в таблице 3.24.

Таблица 3.24 – Рекомендуемые составы смесей

№ образца	Волокнистый состав	Процентное содержание, %
1	2	3
2	отходы кромки грунтовой ткани	50
	полиэфирное бикомпонентное волокно марки 4DE51Слон, производства Корея	15
	полиэфирное волокно марки 6DE64, производства Корея	35
9	отходы кромки грунтовой ткани	40
	полиэфирное бикомпонентное волокно марки 4DE51Слон, производства Корея	20
	регенерированное волокно (измельченные межлекальные отходы швейного производства)	40
10	отходы кромки грунтовой ткани	50
	полиэфирное бикомпонентное волокно марки 4DE51Слон, производства Корея	10
	регенерированное волокно (измельченные межлекальные отходы швейного производства)	40

Окончание таблицы 3.24

1	2	3
11	полиэфирное бикомпонентное волокно марки 4DE51Слон, производства Корея	15
	регенерированное волокно (измельченные межлекальные отходы швейного производства)	85

Полученные шумоизоляционные термоскрепленные полотна благодаря уникальному расположению волокон и однородности продукции сохраняют форму и размер плит при эксплуатации, как в горизонтальном, так и в вертикальном положении. Введение отходов кромки грунтовой ткани и отходов в виде лоскута в состав нетканых материалов позволило увеличить их массу, плотность, жесткость и каркасность, что положительно скажется на эксплуатационных свойствах готовых материалов. По согласованию с заказчиком возможно изготовление плит разного размера [67, 88].

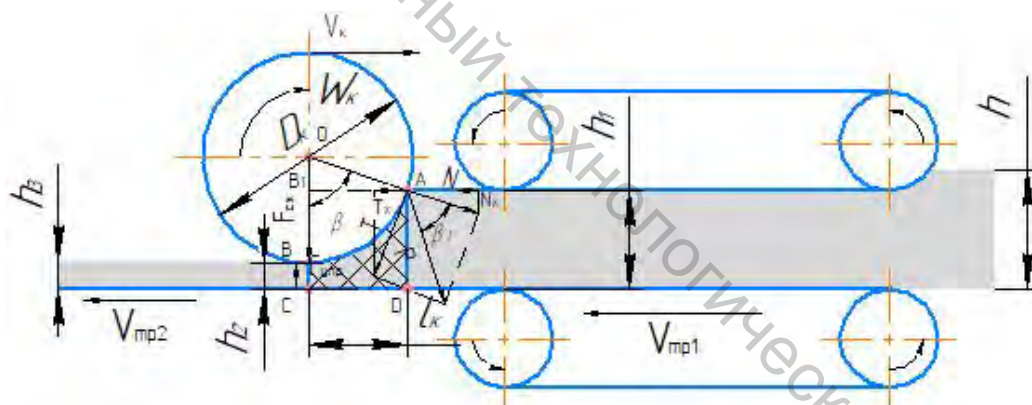
Однако установлено, что разработанные полотна не соответствуют НТД по показателю «разрывная нагрузка по длине полотна» (по требованиям заказчика), поэтому с целью улучшения данного показателя при необходимости полотна можно ламинировать.

3.1.5 Исследование процесса фиксации нетканого полотна по толщине

Процесс окончательной фиксации нетканого полотна по толщине, как уже отмечалось ранее, происходит в секции охлаждения, за счет уплотнения холста прижимным выпускным каландром к нижней металлической пластине. Регулировка толщины полотна достигается путем увеличения разводки между каландром и неподвижной пластиной. При этом, чем меньше толщина материала, тем больше его поверхностная плотность. Можно предположить, что волокнистый холст под давлением изменяет свое строение за счет уменьшения пористости.

В технологии КМ совокупность механических и физико-химических процессов, приводящих к образованию монолитного материала, т.е. материала, обладающего плотной и прочной структурой, называют консолидацией (от латинского *consolidatio* – упрочнение, укрепление, объединение). Из определения следует, что, по крайней мере, два параметра – плотность материала и прочность связи его элементов (аутогезионная и когезионная) – характеризуют данную стадию, а их зависимость от времени – кинетику процесса. К основным явлениям, приводящим к уплотнению материалов, обычно относят сближение частиц, их упругие и вязкопластические деформации, заполнение промежутков между частицами и объемное сжатие. В

Волокнистые частицы при воздействии температуры в печи – это начальная стадия формообразования, контактируют между собой, создавая каркас с стохастической структурой. При выходе из печи в зону охлаждения волокнистый холст толщиной h_1 втягивается в зазор между каландром и металлической пластиной силой трения T (рисунок 3.34), возникающей между поверхностью холста и поверхностью каландра, и сжимается до толщины h_2 . Так как волокнистый материал является упругим, об этом можно судить по испытаниям (таблица 3.14) – толщина готового нетканого материала больше, чем расстояние между каландром и пластиной, следовательно, на выходе из-под каландра возникает сила упругости и материал приобретает толщину h_3 , т.е. присутствует остаточная деформация. При этом скорости транспортера на входе в зону формирования $V_{мп1}$, скорость транспортера на выходе $V_{мп2}$ и линейная скорость каландра V_K равны между собой.



Изменение высоты волокнистого холста в процессе деформирования приводит к изменению доли объема, занимаемого воздухом. Относительная продольная деформация участка холста, попадающего под каландр, связана соотношением

119

где h_1 – высота холста на выходе из печи до деформации, м; h_2 – высота холста после деформации под каландром, м.

Соответственно относительная поперечная деформация равна

$$\varepsilon_{\text{поп}} = \frac{a_1 - a_2}{a_1} = \frac{\Delta a}{a_1}, \quad (3.36)$$

где a_1 – ширина холста на выходе из печи до деформации, м; a_2 – ширина холста после деформации под каландром, м.

При этом можно рассчитать среднюю ширину образца и среднюю толщину

$$a_{\text{cp}} = \frac{a_1 + a_2}{2}, \quad h_{\text{cp}} = \frac{h_1 + h_3}{2},$$

где h_3 – толщина полотна с учетом остаточной деформации, м.

Соответственно можно рассчитать коэффициенты сжатия и уширения

$$k_{\text{сж}} = \frac{h_1}{h_2}, \quad k_{\text{уш}} = \frac{a_2}{a_1}.$$

Под весом каландра поверхность холста деформируется и контакт происходит по некоторой площадке длиной l_{κ} (длина очага деформации)

$$l_{\kappa} = \sin \beta \cdot \frac{D_{\kappa}}{2}, \text{ м}, \quad (3.37)$$

где β – угол обхвата каландра волокнистым слоем, град.; D_{κ} – диаметр каландра, м.

Тогда объем волокнистого материала, попадающий под каландр, равен

$$Q_{\text{вмк}} = h_1 a_1 R_{\kappa} \sin \beta, \text{ м}^3, \quad (3.38)$$

где R_{κ} – радиус каландра, м.

Относительное сжатие зависит от угла обхвата каландра волокнистым слоем, на величину которого будет влиять высота холста на выходе из печи до деформации h_1 и расстояние между каландром и пластиной, при условии, что диаметр каландра $D_{\kappa} = \text{const}$.

При воздействии каландра обжимаемый волокнистый материал смещается в длину и в ширину, т.е. получаем смещенный новый объем

$$Q_{\text{вмк}_c} = (h_1 - h_2) l_{\kappa} = \Delta h a_1 R_{\kappa} \sin \beta, \text{ м}^3. \quad (3.39)$$

Тогда относительный (удельный) смещенный объем равен относительной продольной деформации:

$$Q_{y_c} = \frac{Q_{\text{вмк}_c}}{Q_{\text{вмк}}} = \frac{\Delta h a_1 R_{\kappa} \sin \beta}{h_1 a_1 R_{\kappa} \sin \beta} = \frac{\Delta h}{h_1} = \varepsilon_{\text{прод}}. \quad (3.40)$$

Контакт волокнистого холста с каландром осуществляется по дуге AB – дуге захвата, а зона, ограниченная плоскостью входа AD , выхода BC , дугой захвата и пластиной – есть зона деформации.

Как показали экспериментальные исследования после деформации толщина полотна уменьшается ($h_1 > h_3$), следовательно, происходит процесс сжатия, а ширина полотна увеличивается ($a_2 > a_1$) – происходит процесс уширения. То есть при воздействии каландра на волокнистый материал происходит уменьшение холста по толщине, а смещенный объем перемещается в поперечном направлении, т.е. происходит уширение. Ширина зоны охлаждения на линии на производстве обеспечивает свободное (естественное) уширение, так как расширению холста по ширине ничего не препятствует.

Кроме коэффициента уширения следует привести показатель уширения

$$K_{\text{ушир}} = \frac{\Delta a}{\Delta h}. \quad (3.41)$$

Зибель-Петров утверждает, что уширение материалов зависит от относительного сжатия и длины зоны деформации [99], а изменение ширины материала имеет зависимость

$$\Delta a = K_{\text{ушир}} \varepsilon_{\text{прод}} \cdot l_{\kappa}. \quad (3.42)$$

Чекмарев считает, что уширение зависит от угла контакта и величины зоны деформации

$$\Delta a = \frac{2K_{\text{ушир}} a_1 \cdot \Delta h}{(h_1 + h_2) \left[1 + (1 + \beta) \left(\frac{a_1}{l_{\kappa}} \right)^n \right]}, \quad (3.43)$$

где $K_{\text{ушир}}$ – зависит от вида уширения (при свободном уширении $K_{\text{ушир}}=1$); n – степенной показатель, зависит от зоны деформации (при $a_1 < \beta$ $n=1$, при $a_1 > \beta$ $n=2$); β – угол контакта, рад. [99].

Рассмотрим зависимость показателя уширения для волокнистого материала, подвергаемого сжатию в зоне охлаждения при производстве нетканых материалов способом термофиксации. В таблице 3.25

представлены результаты эксперимента и результаты расчетов для образцов смесей, представленных в таблице 3.22, при варьировании разводки между каландром и пластиной. Для сравнения полученных экспериментальных значений показателя уширения с расчетными данными из формул (3.41) и (3.42) выразим $K_{ушир}$ и найдем его значение. По результатам и наиболее наглядного представления зависимости показателя уширения от изменения ширины полотна построим график, расположив значения показателя уширения по возрастанию Δa (рисунок 3.36). Данные расчетов взяты из реальных условий проведенного эксперимента (рисунок 3.35).

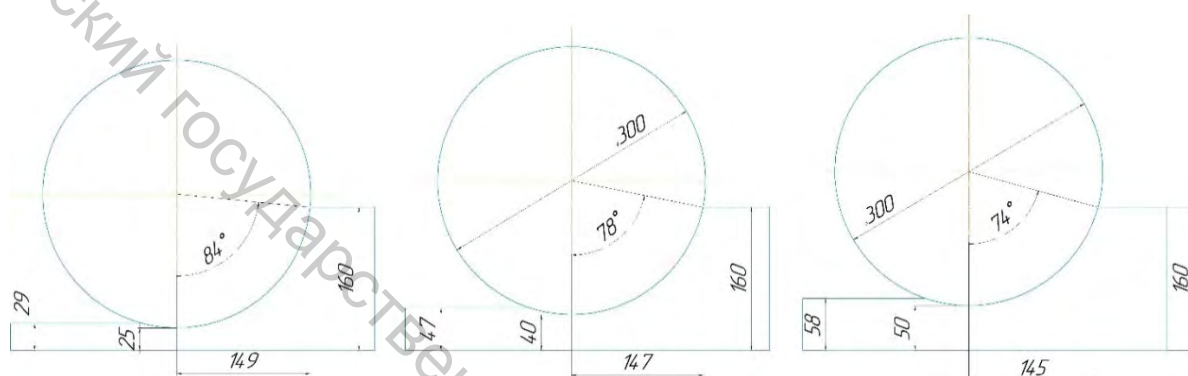


Рисунок 3.35 – Условия проведения эксперимента

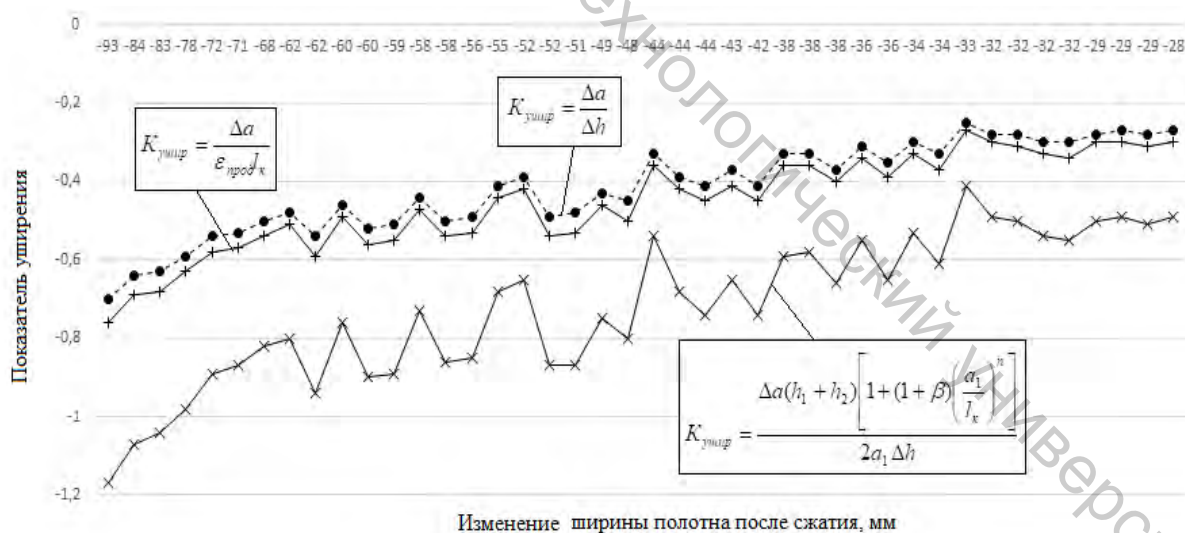


Рисунок 3.36 – Зависимость величины показателя уширения от изменения ширины образцов после сжатия

Таблица 3.25 – Результаты определения показателей уширения и сжатия для экспериментальных смесей

№ образца	Высота холста на выходе из печи до деформации, мм	Ширина холста на выходе из печи до деформации, мм	При разводке между каландром и пластиной 25 мм					При разводке между каландром и пластиной 40 мм					При разводке между каландром и пластиной 50 мм				
	h_1	a_1	h_3	Δh	a_2	Δa	$K_{ушир}$	h_3	Δh	a_2	Δa	$K_{ушир}$	h_3	Δh	a_2	Δa	$K_{ушир}$
1	160	980	27	133	1035	-55	-0,41	45	115	1012	-32	-0,28	56	104	1008	-28	-0,27
2			28	132	1038	-58	-0,44	46	114	1018	-38	-0,33	54	106	1012	-32	-0,30
3			29	131	1040	-60	-0,46	45	115	1016	-36	-0,31	55	105	1009	-29	-0,28
4			30	130	1042	-62	-0,48	47	113	1014	-34	-0,30	54	106	1009	-29	-0,27
5			28	132	1032	-52	-0,39	45	115	1018	-38	-0,33	56	104	1018	-38	-0,37
6			27	133	1013	-33	-0,25	46	114	1024	-44	-0,39	55	105	1012	-32	-0,30
7			27	133	1024	-44	-0,33	47	113	1012	-32	-0,28	56	104	1009	-29	-0,28
8			26	134	1051	-71	-0,53	45	115	1023	-43	-0,37	58	102	1014	-34	-0,33
9			25	135	1048	-68	-0,50	45	115	1029	-49	-0,43	58	102	1016	-36	-0,35
10			27	133	1052	-72	-0,54	45	115	1036	-56	-0,49	57	103	1022	-42	-0,41
11			28	132	1063	-83	-0,63	43	117	1038	-58	-0,50	53	107	1024	-44	-0,41
12			29	131	1064	-84	-0,64	44	116	1040	-60	-0,52	54	106	1031	-51	-0,48
13			28	132	1073	-93	-0,70	44	116	1039	-59	-0,51	53	107	1028	-48	-0,45
14			28	132	1058	-78	-0,59	45	115	1042	-62	-0,54	53	107	1032	-52	-0,49

Примечание – h_2 – это величина разводки между каландром и пластиной.

Логично, что при увеличении разницы в ширине материалов будет увеличиваться показатель уширения (рисунок 3.36). Но как показали расчеты, значение данного показателя, вычисленное по формулам (3.41)–(3.43), разное, поэтому рассмотрим утверждение авторов о влиянии параметров процесса на $K_{ушир}$ (рисунки 3.37–3.39) [99–101].

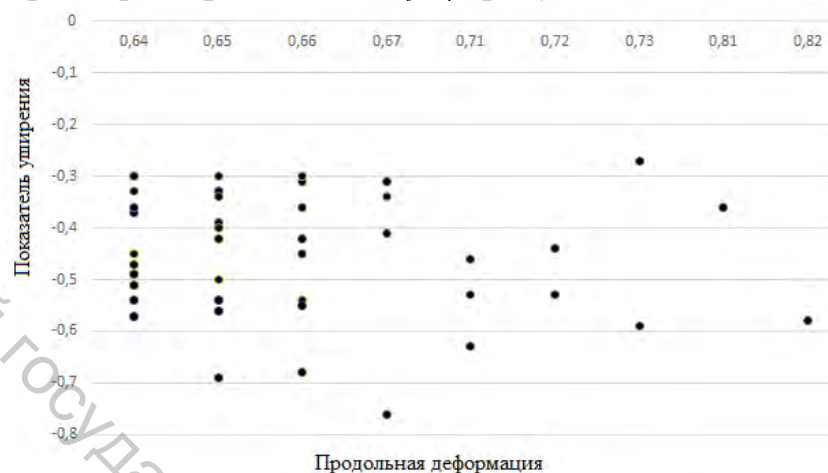


Рисунок 3.37 – График зависимости $K_{ушир}$ от продольной деформации



Рисунок 3.38 – График зависимости $K_{ушир}$ от величины зоны деформации



Рисунок 3.39 – График зависимости $K_{ушир}$ от угла контакта каландра с волокнистым материалом

Как видно из рисунков 3.37–3.39, в нашем случае нет выраженной зависимости показателя уширения от продольной деформации, длины зоны контакта и угла контакта. Однако экспериментально установлено, что при добавлении отходов кромки грунтовой ткани, которые имеют повышенную жесткость и объемную плотность, уширение материала меньше, по сравнению с полотнами с использованием отходов швейного производства. Тоже происходит и с толщиной полотна.

По результатам эксперимента можно сделать вывод, что показатель уширения зависит от объемной плотности волокнистого холста и разводки между каландром и пластиной (рисунок 3.40), а объемная плотность в свою очередь зависит от состава смеси. При этом наблюдается полиномиальная зависимость.

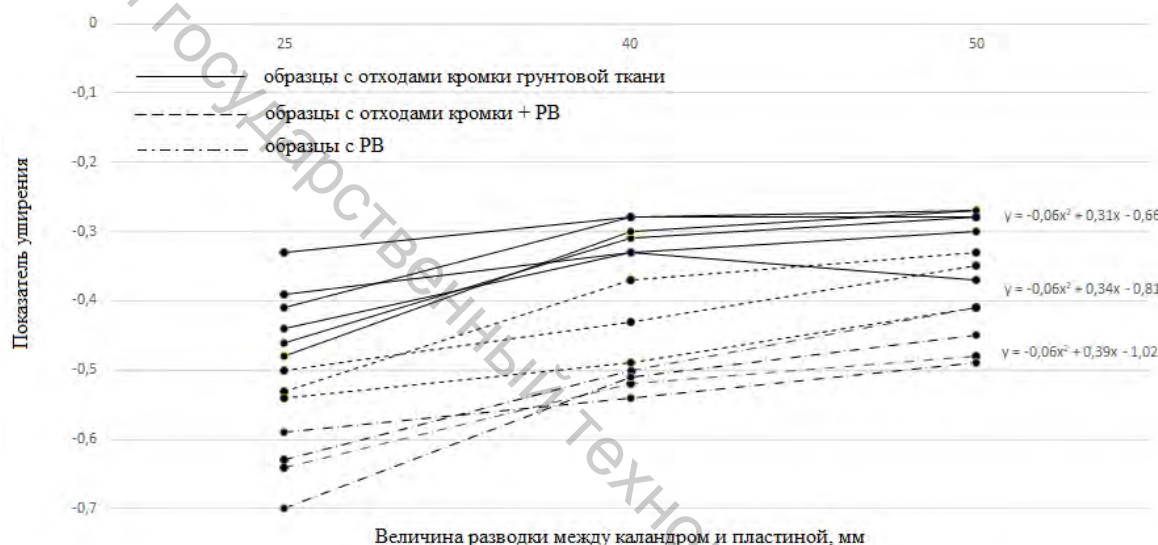


Рисунок 3.40 – График зависимости $K_{ушир}$ от разводки между каландром и пластиной для различных составов смесей

Используя полученные математические модели (рисунок 3.40) для различного сочетания волокон в холсте, можно прогнозировать показатель уширения полотна после прохождения зоны деформации. Однако данные зависимости можно использовать только при соблюдении условий термофиксации, представленных ранее.

Найдем угол контакта каландра с волокнистым материалом, или установим зависимость между длиной контакта при деформации, сжатием, радиусом каландров и углом захвата. Для этого рассмотрим треугольник OAB_1

$$AB_1^2 = OA^2 - OB_1^2,$$

или

$$l_k^2 = R_k^2 - \left(R + \frac{h_2 - h_1}{2}\right)^2 = R_k \Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}. \quad (3.44)$$

Используя формулу (3.37) и приравнявая два выражения, получим

$$\sin \beta = \frac{\sqrt{R_{\kappa} \Delta h - \frac{\Delta h^2}{4}}}{R_{\kappa}} \quad (3.45)$$

Зависимость между сжатием, углом обхвата каландра волокнистым слоем и диаметром (радиусом) каландра можно выразить следующим образом:

$$BB_1 = OB - OB_1, \text{ или } \frac{\Delta h}{2} = R - R \cos \beta$$

$$\text{Тогда } \Delta h = 2R_{\kappa}(1 - \cos \beta) = D_{\kappa}(1 - \cos \beta). \quad (3.46)$$

Рассмотрим условие захвата волокнистого материала каландром и силовые взаимодействия при формировании нетканого полотна в секции охлаждения. В точке соприкосновения каландра с волокнистым холстом ($\cdot$) A возникает нормальная сила, направленная по радиусу каландра N , и сила трения T , направленная по касательной окружности. Сила P является равнодействующей сил N и T . Угол между силами N и P (β_1) – угол трения.

Согласно закону Амонтона-Кулона, сила трения T равна произведению нормальной силы N на коэффициент трения f [140]

$$T = fN \quad (3.47)$$

Отношение силы трения к нормальной силе равно тангенсу угла трения (рисунок 3.34)

$$\frac{T}{N} = \operatorname{tg} \beta_1 \quad (3.48)$$

Тогда коэффициент трения равен

$$f = \operatorname{tg} \beta_1 \quad (3.49)$$

Горизонтальные проекции нормальной силы N_x и силы трения T_x направлены в разные стороны. Из рисунка 3.34 видно, что сила N_x будет стремиться оттолкнуть волокнистый материал от каландра, а сила T_x , наоборот – втянуть его под каландр. При условии $N_x > T_x$ захват волокнистого материала каландром невозможен. Но как только

установится условие $N_x \leq T_x$, произойдет начальный захват волокнистого холста каландром.

Из равенства треугольников (рисунок 3.34) следует

$$N_x = \sin \beta \cdot N, \quad T_x = \cos \beta \cdot T.$$

Тогда условие захвата будет иметь вид

$$\sin \beta \cdot N \leq \cos \beta \cdot T. \quad (3.50)$$

Разделив выражение (3.47) на $N \cdot \cos \beta$, получим

$$\frac{\sin \beta}{\cos \beta} \leq \frac{T}{N} \quad \text{или} \quad \operatorname{tg} \beta \leq f.$$

То есть условие захвата волокнистого материала примет вид

$$\operatorname{tg} \beta \leq \operatorname{tg} \beta_1. \quad (3.51)$$

Таким образом, только при условии, что угол контакта каландра с волокнистым материалом будет меньше угла трения, начнется захват и затягивание материала под каландр. Таким образом, чем больше угол трения, тем больше угол захвата, тем больше захватывающая способность каландра, а, следовательно, и сила сжатия.

По полученной зависимости (3.46) величина сжатия может изменяться от нуля (при $\beta=0$) до величины диаметра каландра (при $\beta=90^\circ$). Таким образом сжатие волокнистого материала ограничивается захватывающей способностью каландра, т.е. коэффициентом трения каландра об материал, а угол захвата не может быть больше угла трения.

В зависимости от положения холста в зоне деформации можно выделить три стадии: захват волокнистого материала каландром, процесс сжатия и выход полотна из-под каландра.

Сила воздействия каландра на волокнистый материал является одним из важных показателей процесса формирования нетканого материала. Под этой силой следует понимать равнодействующую P (рисунок 3.41) всех вертикальных составляющих элементарных сил нормального давления N и силы трения T , приложенных к волокнистому материалу, попавшему в зону деформации, со стороны каландра. Горизонтальная составляющая P_x уравнивает T_x , т.е. $P_x=T_x$. Вертикальные составляющие P_y и T_y в сумме дают силу давления каландра на волокнистый материал $P=P_y+T_y$.

По мере продвижения холста вглубь зоны деформации точка приложения нормальной силы будет передвигаться по направлению к плоскости выхода волокнистого материала из-под каландра. Так как волокнистый материал является упруго-пластичным, нормальной силе в зоне деформации со стороны волокнистого материала противодействует сила упругости, согласно закону Гука, равная [101]

$$F_{\text{упр}} = k_{\text{жс}} \Delta h , \quad (3.52)$$

где $k_{\text{жс}}$ – коэффициент жесткости, Н/м.

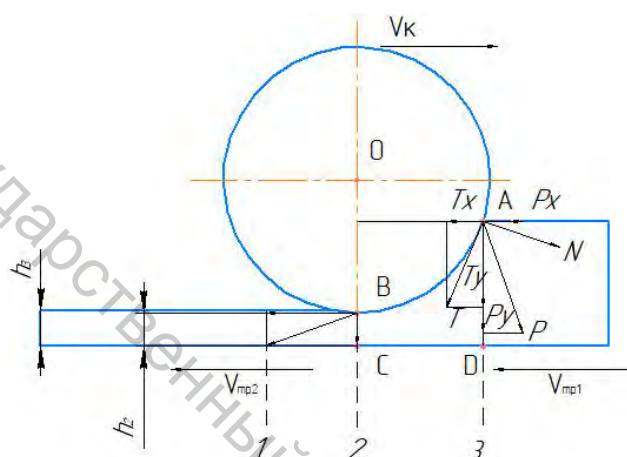


Рисунок 3.41 – Схема действия сил на волокнистый материал со стороны каландра

Таким образом, масса волокнистого материала в сечениях 1, 2 и 3 соответственно равна m_1 , m_2 и m_3 и в любом из сечений элементарной пробы постоянна, так как по пути движения при входе под каландр и выходе из-под него никуда не расходуется и ниоткуда дополнительно не поступает.

То есть в какой-либо момент через сечение 1 прошло m_1 килограмм волокнистого материала, то такое же количество в тот же момент времени пройдет через сечение 2 и 3.

Следовательно, правомерно воспользоваться уравнением постоянства масс

$$m_1 = m_2 = m_3 = const . \quad (3.53)$$

Тогда запишем уравнение постоянства расхода как

$$\rho v F = const , \quad (3.54)$$

где ρ – объемная плотность потока, кг/м³; v – скорость потока, м/с; F – площадь сечения потока, м².

Из уравнения (3.54) следует

$$\rho_1 v_1 a_1 h_1 = \rho_2 v_2 a_2 h_2 = \rho_3 v_3 a_3 h_3. \quad (3.55)$$

Тогда высота полотна на выходе из-под каландра будет равна

$$h_3 = \frac{\rho_1 v_1 a_1 h_1}{\rho_3 v_3 a_3} = \frac{\rho_2 v_2 a_2 h_2}{\rho_3 v_3 a_3}. \quad (3.56)$$

Однако в формуле (3.56) не учитываются силы упругости и сжатия. Для этого рассмотрим поток волокнистого материала как случай стационарного одномерного потока жидкости, тогда можно применить уравнение Эйлера [102]:

$$v \frac{dv}{dx} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dP_{сж}}{dx}, \quad (3.57)$$

где $P_{сж}$ – сила сжатия, Н/м².

Установим дифференциальную зависимость между площадью сечения потока волокнистого материала и его скоростью, тогда выражение (3.57) примет вид:

$$v dv = -\frac{dP_{сж}}{\rho} = -\frac{dP_{сж}}{d\rho} \cdot \frac{d\rho}{\rho}. \quad (3.58)$$

Волокнистый материал, как уже отмечалось ранее, обладает упругостью, которую можно выразить через коэффициент сжатия, равный

$$\beta_{сж} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dP_{сж}}. \quad (3.59)$$

Из уравнения (3.59) следует, что

$$\frac{dP_{сж}}{d\rho} = \frac{1}{\beta_{сж} \rho}. \quad (3.60)$$

Подставив данные (3.60) в выражение (3.58), получим

$$v dv = -\frac{1}{\beta_{сж} \rho} \cdot \frac{d\rho}{\rho}. \quad (3.61)$$

Прологарифмируем выражение (3.54)

$$\ln(\rho v F) = \ln(const) = \ln \rho + \ln v + \ln F, \quad (3.62)$$

и продифференцируем

$$0 = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dv}{v} + \frac{dF}{F}. \quad (3.63)$$

Тогда

$$\frac{d\rho}{\rho} = -\frac{dv}{v} - \frac{dF}{F}. \quad (3.64)$$

После преобразований формула (3.61) примет вид

$$v dv = -\frac{1}{\beta_{сж} \rho} \cdot \frac{dv}{v} + \frac{1}{\beta_{сж}} \cdot \frac{dF}{F}, \quad (3.65)$$

$$\int v dv = \frac{1}{\beta_{сж} \rho} \int \frac{dv}{v} + \frac{1}{\beta_{сж}} \int \frac{dF}{F}, \quad (3.66)$$

$$\frac{v^2}{2} = \frac{1}{\beta_{сж} \rho} \cdot \ln v + \frac{1}{\beta_{сж}} \ln F + C, \quad (3.67)$$

где C – константа.

Умножив обе части уравнения (3.67) на $(\beta_{сж} \rho)$, получим

$$\frac{\beta_{сж} \rho v^2}{2} = \ln v + \ln F + \ln C' = \ln(C' v F). \quad (3.68)$$

Так как $(\beta_{сж} \rho)$ для исходного волокнистого материала одно и то же, т.е. $\beta_{сж} \rho = const$, тогда

$$C \rho \beta_{сж} = \ln C', \quad (3.69)$$

где C' – константа, полученная экспериментальным путем при эталонных замерах.

Тогда

$$C' v F = e^{\frac{\beta_{сж} \rho v^2}{2}}, \quad (3.70)$$

или

$$C' v a h = e^{\frac{\beta_{сж} \rho v^2}{2}}. \quad (3.71)$$

В формуле (3.71) высота потока h есть ничто иное, как толщина полотна, выходящего из-под каландра h_3 , тогда

$$h_3 = \frac{e \frac{\beta_{\text{сж}} \rho v^2}{2}}{C' a v} \quad (3.72)$$

Полученные математические зависимости (3.56) и (3.71) позволяют определить высоту готового полотна при формировании его в зоне фиксации при различных параметрах работы оборудования и начальных характеристиках холста. Однако формула (3.72) содержит константы, которые необходимо определить экспериментальным путем, что не всегда является возможным.

3.1.6 Определение пористости нетканых шумо- и теплоизоляционных материалов в зоне формирования

Под действием каландра волокнистый холст, как уже отмечалось ранее, деформируется. Деформация в этом случае заключается в сжатии, т.е. уменьшается объем холста. В данном уплотнение происходит за счет уменьшения пористости волокнистого холста. Так как уширение образцов незначительное – до 2 %, можно говорить о компрессии.

Для получения нетканых композиционных шумоизоляционных и звукопоглощающих материалов предлагается полученные способом термофиксации нетканые полотна ламинировать. Для подбора клеевых композиций с учетом их вязкости и требуемого для адгезии количества, при ламинировании, важное значение имеет показатель пористости, так как с данным показателем связаны такие физические свойства, как водопоглощение, прочность, теплопроводность и др.

Все существующие методы порометрии можно условно распределить на три группы:

- методы микроскопии, заключающиеся в прямом наблюдении поверхности или среза исследуемого материала;
- непроникающие методы типа спектроскопии, как правило, требующие дорогостоящего оборудования;
- проникающие методы (ртутные, калориметрические) [103].

У каждого метода есть характерные достоинства и недостатки. Тем не менее более детальное и полное изучение пор возможно только в случае комплексного применения этих методов [103].

Согласно ГОСТу 15902.2-2003 «Полотна нетканые. Методы определения структурных характеристик» пористость определяют по формуле

$$\Pi = \frac{\gamma - \delta}{\gamma} 100, \%, \quad (3.73)$$

где δ – объемная плотность полотна, г/см³; γ – удельная плотность волокон (нитей), содержащихся в волокне, г/см³.

В случае, как в нашем, многокомпонентных структур удельную плотность γ_s вычисляют по формуле

$$\gamma_s = \frac{S_1 \gamma_1 + S_2 \gamma_2 + \dots + S_n \gamma_n}{100}, \quad (3.74)$$

где $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_n$ – удельная плотность каждого компонента волокон, г/см³; S_1, S_2, S_n – массовая доля каждого компонента волокон, %.

Однако такой вариант определения пористости в нашем случае не подходит, так как нет четкого значения количества и плотности волокон, входящих в состав полотна. Точное определение данных показателей является трудоемкой и сложно выполнимой задачей.

При формировании полотна разной толщины меняется расстояние между каландром и пластиной, следовательно, холст испытывает разную нагрузку, соответственно каждой нагрузке будет соответствовать определенная пористость.

Для вывода формулы, на основании которой можно будет определить коэффициент пористости при любом значении расстояния между каландром и пластиной, введем следующие обозначения:

Π_1 – начальный коэффициент пористости, %,

Π_i – коэффициент пористости при i -й нагрузке (расстоянии между каландром и пластиной), %,

h_i – толщина образца при i -й нагрузке, см,

h_1 – начальная толщина образца при выходе из печи, см,

$\Delta \Pi_i$ – изменение пористости образца от момента входа под каландр до момента выхода готового полотна, %.

Коэффициент пористости можно определить как

$$\Pi = \frac{V_{пор}}{V_{вол}}, \quad (3.75)$$

где $V_{пор}$ – объем пор в единице объема волокнистого холста, см³; $V_{вол}$ – объем волокон в единице объема волокнистого холста, см³.

Тогда коэффициент пористости при i -й нагрузке можно определить как

$$\Pi_i = \Pi_1 - \frac{\Delta V_{пор_i}}{V_{вол}}, \quad (3.76)$$

где $\Delta V_{пор\ i}$ – изменение объема пор при i -й нагрузке, см³.

Π_1 определяли экспериментально. Образец волокнистого холста на выходе из печи размером 10х10 см сдавливали до максимума и по высоте полученного образца высчитывали $V_{вол}$ (в среднем для испытываемых холстов $V_{вол}=0,5 \cdot 10 \cdot 10=50$ см³). При объеме холста $V_{холст}=16 \cdot 10 \cdot 10=1600$ см³, $V_{пор}=V_{холст}-V_{вол}=1550$ см³. Тогда пористость волокнистого холста исходя из пропорции $\Pi_1=96$ %.

При ничтожно малом уширении полотна, как в нашем случае, проигнорируем данный показатель, тогда

$$\Delta V_{пор\ i} = h_i F, \quad (3.77)$$

где F – площадь образца, см², но $V_{пор} = \frac{\Pi}{1 + \Pi}$, а $V_{вол} = \frac{1}{1 + \Pi}$.

Тогда объем волокна, входящего в холст, равен

$$V_{вол} = \frac{1}{1 + \Pi_1} F h_1. \quad (3.78)$$

Подставив данные технологического процесса в формулу (3.78), получим $V_{вол}=50$ см³, что подтверждает данные эксперимента. Следовательно,

$$\Delta \Pi_i = \Pi_1 - (1 + \Pi_1) \frac{h_i}{h_1}. \quad (3.79)$$

Используя формулу (3.79), можно вычислить изменение пористости при разной разводке между каландром и пластиной h_{2i} , учитывая высоту готового полотна на выходе из зоны формирования h_{3i} . По данным вычисления построим компрессионную кривую $\Pi_i=f(h_{3(2)i})$, при этом $\Pi_i=\Pi_1-\Delta \Pi_i$ (рисунок 3.42).

Как видно из рисунка 3.42, при одной и той же разводке между каландром и пластиной наблюдается у образцов с разным составом отличие в пористости, что связано с остаточной деформацией образцов.

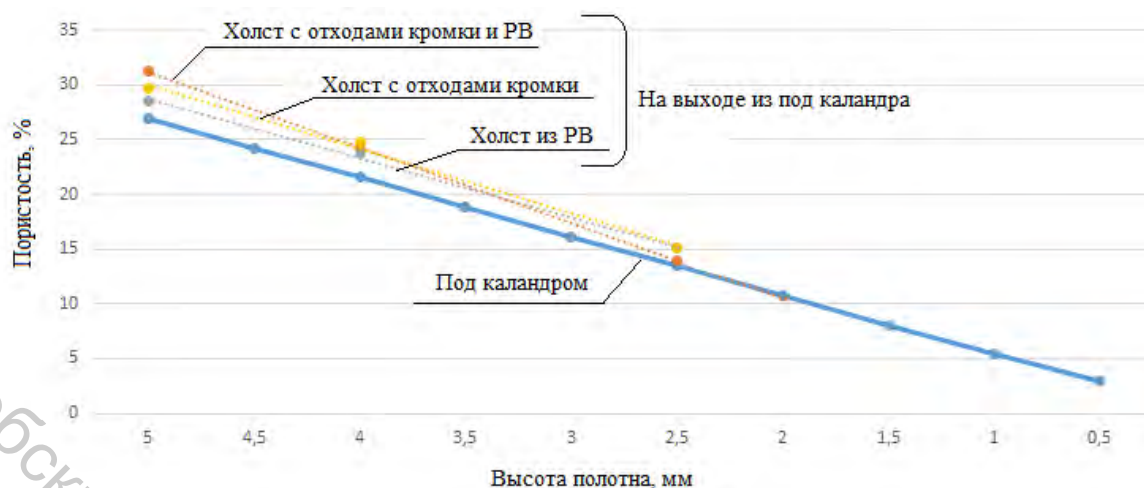


Рисунок 3.42 – Компрессионная кривая нетканых материалов при формировании каландром

3.1.7 Способ раскатки нетканого полотна

По желанию заказчика нетканые полотна не разрезаются на плиты, а изготавливают в виде рулонов. С целью автоматизации процесса сматывания в рулоны, а соответственно повышения производительности труда для раскатки нетканых материалов предлагается использовать устройство фирмы Cormatex, представленное на рисунке 3.43. В настоящее время в случае необходимости раскатка осуществляется ручным способом.

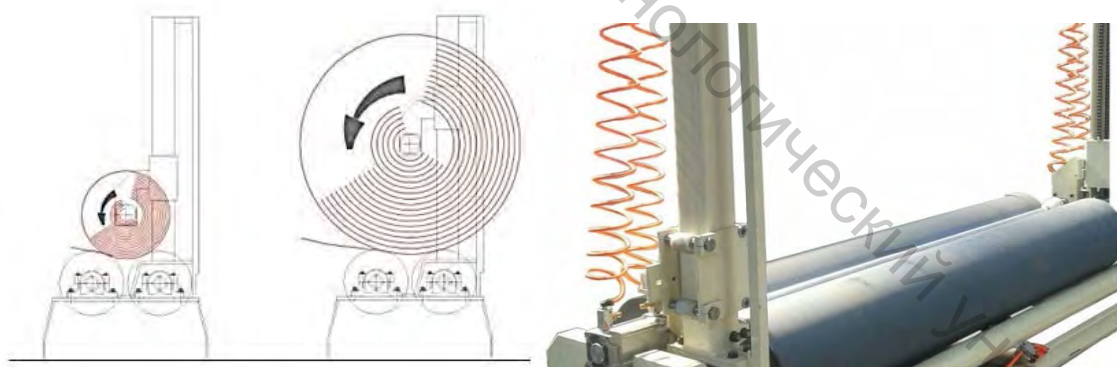


Рисунок 3.43 – Схема машины для раскатки нетканых материалов

Согласно ГОСТу 9573-2012 «Плиты из минеральной ваты на синтетическом связующем теплоизоляционные. Технические условия» длина материалов, скрученных в рулон, зависит от поверхностной плотности и не превышает 2000 мм. Длина в этом случае задается в пульте управления и при достижении длины, установленной для резки, задействуется поперечный резак.

Однако данное оборудование является дорогостоящим, и рулонные материалы редко пользуются спросом, поэтому для

облегчения ручного способа разработан намотчик, представленный на рисунке 3.44.

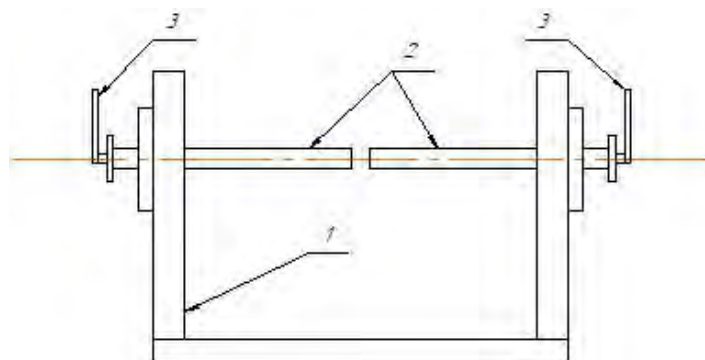


Рисунок 3.44 – Намотчик для раскатки материалов в рулоны:
1 – станина, 2 – шпендель, 3 – рукоятка

Принцип работы намотчика (рисунок 3.30) заключается в следующем: предварительно разрезанные на требуемую длину нетканые материалы заправляются в намоточный шпендель, который, вращаясь с помощью рукоятки, наматывает на себя полотно, после намотки шпендель с двух сторон вытаскивается из рулона и полотно поступает в зону упаковки. Устройство может быть установлено на линии по производству нетканых материалов в случае подключения электропривода, так как скорость сматывания с помощью рукоятки значительно ниже скорости подачи материала в зону сматывания.

4 СЛОИСТЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ НЕТКАНЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВТОРИЧНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Ламинирование – один из способов упрочнения нетканых материалов и придания им дополнительных улучшенных физико-механических свойств. В зависимости от назначения и их дальнейшей эксплуатации ламинироваться материалы могут фольгой или неткаными материалами типа спанбонда, флизелина. Таким образом, могут быть получены слоистые композиционные нетканые материалы различного назначения.

В способности фольгированных материалов ставить барьер на пути утечки тепла лежат физические законы и принципы, а именно наличие инфракрасных волн, близких по длине спектра к дневному свету, за счет отражения от зеркальной поверхности аналогично солнечному лучу.

Поэтому в условиях производства нетканых материалов на ОАО «Акотерм Флакс», полученных способом термофиксации, предлагается ламинирование этих материалов, с целью получения прочной, многослойной конструкции, для расслоения которой необходимо приложить значительные силы. В итоге утеплители приобретут новые качества, а сфера применения значительно расширится.

Рост спроса на теплоизоляционные звукоизолирующие нетканые материалы с каждым годом увеличивается на 15÷20 %. Использование данных материалов при строительстве жилых и промышленных зданий, тепловых агрегатов и трубопроводов в машиностроении является очень актуальным и перспективным в будущем.

4.1 Технологический процесс производства теплоизоляционных звукоизолирующих нетканых материалов способом ламинирования

Ламинирование (от нем. laminieren – прокатывать; франц. lammer – плющить, лат. lamina – пластинка, полоска) – соединение двух или более слоев материалов с помощью склеивающего вещества, либо нанесение на один материал расплава другого материала [104].

Для получения композиционных многослойных материалов, в том числе с использованием алюминиевой фольги и флизелина, применяются следующие технологии ламинации:

- мокрая,
- сухая,
- под давлением,
- с использованием расплавленных масс.

При мокром способе ламинирования удаление растворителя (в данном случае воды) из клея происходит в туннельной сушилке после соединения слоев. Необходимым условием является применение в качестве одного из слоев материала, образующего пористый слой, позволяющий воде испаряться [105]. Для мокрого ламинирования используются как крахмальные, так и синтетические клеи. Эта система применяется чаще всего для ламинирования алюминиевой фольги различными видами бумаги или картона.

В системе сухого ламинирования [105] чаще всего используются двухкомпонентные полиуретановые клеи с растворителем. Полимеризация полиуретана начинается после смешивания составных частей, например, полиэфирного с изоциановым, и усиливается во время испарения растворителя в туннельной сушилке. Ускорения полимеризации, а значит, увеличения стойкости соединения слоев ламината добиваются путем подогрева ламинирующего цилиндра. Технология сухого ламинирования с растворителем традиционно используется в производстве ламинатов, являющихся взаимным соединением пластмассовых пленок, например, полиамид/полиэтилен высокой плотности и полиэтилентерефталат/полиэтилен высокой плотности, в том числе в виде металлизированных пленок, а также полимерных пленок с алюминиевой фольгой.

В настоящее время при ламинировании готовых пластмассовых пленок преобладает технология без применения растворителя. При этой технологии [105] одно- или двухкомпонентный клей, чаще всего полиуретановый, наносится в слегка подогретом состоянии. Существенным преимуществом ламинирования без растворителя является исключение туннельной сушилки, необходимой как при мокром, так и при сухом способе ламинирования с растворителем. Благодаря этому очень сильно уменьшается потребление энергии в процессе ламинирования.

Ламинирование с подачей расплава полимера через дюзу [105] является технологией, производной от покрытия методом экструзии. Соединение двух лент из различных материалов происходит здесь при участии тонкой струйки выдавливаемого из плоской дюзы полимера, чаще всего это полиэтилен высокой плотности. Расплавленный полиэтилен подается из щелевой дюзы экструдера непосредственно на соединяемые материалы. Соединяемые материалы дожимным роликом прижимаются к охлаждающему цилиндру.

Ламинирование с использованием расплавов осуществляется путем нанесения между соединяемыми слоями [105] расплавленных смесей воска и полимера, обычно сополимера этилена с винилацетатом или соответствующего микровоска. Расплавленная масса с помощью вала наносится на один из слоев, который соединяется с другой лентой материала при помощи сжимающих валов. Эта система ламинирования

применяется главным образом для соединения алюминиевой фольги с различными видами бумаги. Стойкость слоев к отрыву в этой системе значительно ниже по сравнению с прочими системами ламинирования.

Охарактеризованные выше методы ламинирования, за исключением соединения с использованием расплавленного полимера, используются на многих предприятиях, например, по производству искусственных кож. Однако для реализации технологии в условиях ООО «Акотерм Флакс», г. Ореховск на линии по производству нетканых материалов Lap FormAir компании Cormatex необходима ее модернизация.

Физическая сущность операции нанесения клея заключается в совмещении процессов смачивания, адсорбции, капиллярном проникновении клея в виде раствора внутрь материала и последующем закреплении в нем.

Анализ литературных источников [12, 68, 106, 107] показал, что при производстве композиционных ламинированных материалов наиболее приемлемым способом нанесения клеевой композиции на поверхность одного из слоев является нанесение валиками. Поэтому в разрабатываемой технологии принят валичный способ нанесения клеевой пленки, так как для машин непрерывного типа он является самым эффективным. 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).

Для изготовления нетканых материалов с покрывным слоем было принято решение об использовании «мокрого» ламинирования. Для этого совместно с профессором Ольшанским В.И. и научным сотрудником Мульц В.Г. было разработано устройство для скрепления двух слоев материалов (рисунок 4.1), один из которых представляет собой гибкий слой фольги (или флизелина), второй – нетканый материал (при условии, что гибкий слой без предварительно нанесенного клея).

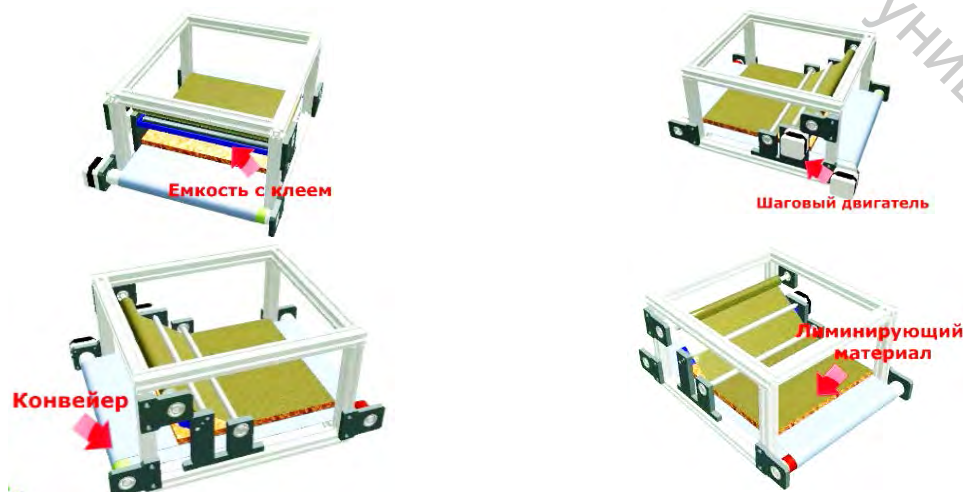


Рисунок 4.1 – Устройство для ламинирования

Процесс мокрого ламинирования обусловлен тем, что клеящий состав во время соединения двух материалов находится в жидком состоянии и требует выведения растворителя из клея. Поэтому изначально предполагалось установить разработанное устройство между термосвязующей печью 9 и lap formair 8 (рисунок 4.2).

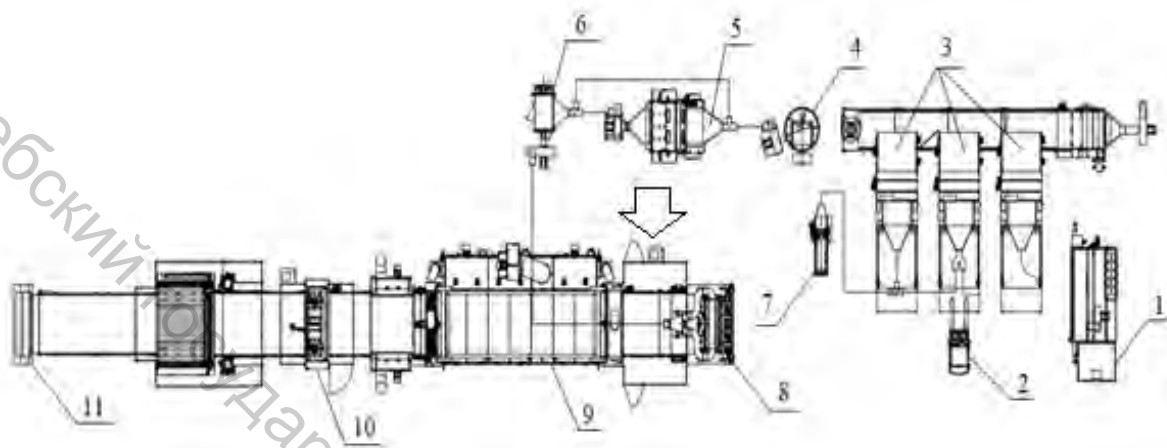


Рисунок 4.2 – Линия по производству нетканых материалов Lap FormAir компании Cormatex:

- 1 – кипоразрыхлитель, 2 – электроштабелер, 3 – поперечный накопительный конвейер с предварительным разрыхлителем, 4 – замасливающая камера, 5 – тонкий разрыхлитель, 6 – промежуточный башенный питатель, 7 – измельчитель отходов, 8 – lap formair, 9 – термосвязывающая печь, 10 – продольный и поперечный резак, 11 – намотчик

Однако в ходе предварительных исследований проведенный эксперимент показал, что при транспортировании ламинированного полотна в термосвязующую печь и прохождении его через нее, наблюдается прохождение клея через поры волокнистого материала, а, следовательно, происходит налипание волокон на транспортер.

При использовании флизелина с нанесенным предварительно клеем (в сухом состоянии) устройство устанавливается до термосвязующей печи и несет функции направляющих, т.е. емкость с клеем не заполняется, и наоборот. При необходимости клей наносится на менее впитывающий материал (на фольгу или флизелин), после чего сразу же выполняется соединение материалов. Ламинирующая секция включает хромированные и обрезиненные цилиндры. Далее растворитель, содержащийся в клее, выпаривается циркулирующим воздухом в зоне формирования (между позицией 9 и 10 на рисунке 4.2). После высушивания готовый материал проходит зону охлаждения и поступает на резак, затем сматывается в рулоны или нарезается поперечным резаком в плиты.

В связи с этим разработанный технологический процесс имеет технологическую цепочку, представленную на рисунке 4.3, где видно, что процесс ламинации зависит от покрывного слоя нетканого материала.



Рисунок 4.3 – Технологический процесс производства нетканых композиционных ламинированных материалов

Структурная кинематическая схема устройства для ламинирования представлена на рисунке 4.4.

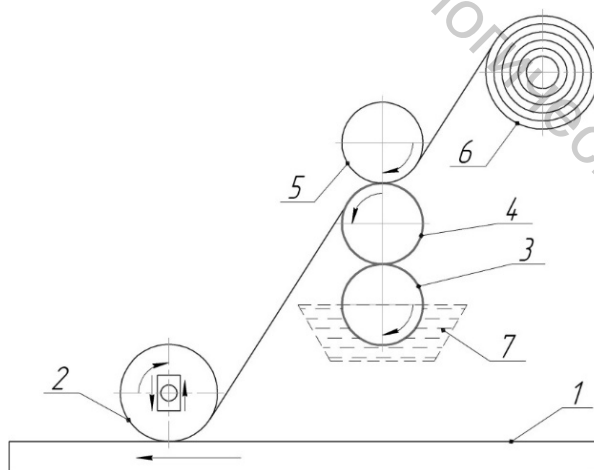


Рисунок 4.4 – Структурная кинематическая схема устройства

Клеевой состав, который находится в емкости 7, с помощью обрезиненного вала 3 наносится на обрезиненный вал 4. Ламинирующий материал 6 протягивается между валков 5 и 4. Толщина клеевого слоя регулируется с помощью зазора между валами 3 и 4.

Далее ламинирующий материал прижимается между прижимным стальным валом 2 и исходным ламинируемым материалом. Величина прижима регулируется с помощью вертикального перемещения стального вала 2.

Каркас данного устройства (рисунок 4.1) выполнен из конструкционного алюминиевого профиля, что обеспечивает простоту сборки и монтажа. В качестве привода валов используются биполярные шаговые двигатели. Валки устройства смонтированы на шариковых радиальных подшипниках. Для регулировки натяга транспортной конвейерной ленты ведомый вал перемещается в горизонтальной плоскости. Для обеспечения работы двигателей, а также для синхронизации их работы используется микроконтроллер. Для подогрева клеевого состава применяется нагреватель в виде проволоки из нихрома, намотанной на изолирующий цилиндр (алебастр). Контроль за нагревом клеевого состава осуществляется с помощью терморезистора, который также подключен к микроконтроллеру. Данный способ подключения позволяет точно контролировать температуру клеевого состава в заданных пределах. Технические характеристики лабораторного устройства представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Технические характеристики устройства для ламинирования

Показатель	Значение показателя
1	2
Габаритные размеры, мм	1390x1210x1275
Масса, кг	14
Скорость движения ленточного конвейера, м/с	регулируемая: 0–1,5
Температура подогреваемого клеевого состава, °C	регулируемая: 20–100

Режимы обработки устанавливались в зависимости от ламинируемого и ламинирующего материалов, а также вязкости и температуры нанесения клеевого состава. Для регулировки прижима материалов в зависимости от толщины используется вертикальное перемещение вала 2 (рисунок 4.4). Для использования различных по толщине ламинирующих материалов, а также для регулирования толщины клеевого слоя используется вертикальное перемещение валов 4 и 5. Для настройки скорости ламинирования предусмотрено плавное регулирование частот вращения валов 2–5. Для изменения вязкости и текучести клеевого состава используется плавный нагрев клеевой ванны 7. Режимы работы оборудования линии остаются прежними.

При нанесении клеевого слоя валичным способом на толщину наносимого слоя h_l (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.

Экспериментально установлено, что при увеличении зазора между клеенаносным и прижимным валиками увеличивается и толщина клеевой пленки. 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 [108].

Получение требуемой толщины клеевого слоя на основе может быть достигнуто соответствующими регулировками вязкости клея, величиной заполнения клеевой ванны, скоростью валиков и зазором между ними.

4.2 Обоснование выбора связующего для производства теплоизоляционных звукоизолирующих ламинированных нетканых композиционных материалов

Полученные по разработанной технологии теплоизоляционные звукоизолирующие нетканые композиционные ламинированные материалы можно разделить на следующие разновидности:

– тип А – фольга, флизелин, бумага приклеена с одной стороны.

При использовании фольги полученный материал может применяться в строительстве для теплоизоляционных работ внутри здания, в автомобильной промышленности – утепление и звукоизоляция салонов легковых и грузовых авто, в обувной промышленности – стельки для зимней обуви, в сельском хозяйстве – утепление телятников, инкубаторов, в производстве бытовой техники – в холодильных установках. Также фольгированный утеплитель можно использовать как теплоотражающий экран за приборами отопления: радиаторами, калориферами, инфракрасными пленками, расположенными на стенах и потолке, что позволяет экономить

тепловые ресурсы. Фольгированный утеплитель можно перфорировать и тогда использовать для деревянных домов, что позволит древесине «дышать», а не преть.

При применении флизелина ламинированные материалы можно использовать в автомобильной промышленности – утепление и звукоизоляция салонов легковых и грузовых авто, багажников автомобилей, также в строительстве для утепления зданий и сооружений [109].

При применении бумаги материал является самоклеящимся к любой предварительно обработанной поверхности, их можно использовать в производстве бытовой техники в качестве шумоизоляции, также для утепления и звукоизоляции салонов легковых и грузовых авто.

- тип В – покрывной слой наклеен с 2 сторон, что ведет к максимальной защите утепляемого объекта от потерь тепла. Такой вид теплоизоляционного материала идет на утепление кровли, фасадов, подвалов, трубопроводов и отопительных систем [110];

- тип С – сверху наклеена фольга, снизу – бумага. Т.е. материал самоклеящийся. Область его применения такая же, как у материалов типа А;

- тип D – аналог типу «А», но в случае использования фольги в качестве покрывного слоя, на ее поверхность наносится рисунок валом при продавливании. Применять можно для объектов, где теплоизоляционный слой ничем не прикрыт и открыт для обзора – например, как теплоотражающий экран за приборами отопления: радиаторами, калориферами, в саунах и банях.

В зависимости от покрывного слоя и дальнейшей области применения ламинированных материалов, на основании проведенного анализа литературных источников [106, 111–115] и опыта предприятий в данной области выбраны клеевые композиции для склеивания слоев.

Для наработки утепляющих самоклеящихся материалов с применением их в машиностроении и строительстве предлагается использовать клей-расплав марки НМ-242. Клей обладает высокой липкостью и удерживающей силой, хорошим соотношением отрывных свойств, высечки, стойкостью к высоким температурам и старению. Используется при ламинировании фольгой, бумагой, флизелином. Бумага в последующем снимается при приклеивании к поверхности.

Для ламинирования флизелином предлагается использовать NEOTHERM PU-3425 R – влагоотверждаемый реактивный термоклей на основе полиуретанового преполимера, разработанный для низкотемпературного применения. Отвержденное соединение имеет высокие механические свойства, хорошую холодостойкость и теплостойкость, устойчивость к воздействию воды и растворителя. Влажности окружающей среды достаточно для отверждения материала.

Материалы с использованием данной клеевой композиции можно использовать не только в машиностроении и в строительстве, но и в производстве одежды.

Характеристика выбранных клеев представлена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Свойства клеевых композиций для производства ламинированных материалов

Свойства	HM-242	NEOTHERM PU-3425 R
1	2	3
Композиция	смесь термопластичного каучука, смолы и воска	смесь на основе полиуретанового преполимера
Состав	термопластичный каучук 35 %, нафтеновые масла 18 %, гидрогенизированные углеводородные смолы 16 %, воск 15 %, канифоль 15 %, антиоксидант 1 %	нет данных
Внешний вид	желтоватый брусок	прозрачный, под ультрафиолетом может быть желтым
Токсичность	нет	
Рекомендуемая температура нанесения, °C	140-170	110-150
Температура воспламенения, °C	более 210	нет данных
Температура размягчения, °C	98	60
Вязкость мПа при 140 °C при 165 °C при 175 °C при 185 °C	7800 6200 4900	7500
Плотность, г/см ³	0,98	1,05

При использовании для ламинирования нетканых материалов с покрывным слоем флизелина со сплошным полиамидным клеевым покрытием устройство (рисунок 4.4) устанавливается перед термопечью, при этом ванна 7 не наполняется клеем, валик 3 не задействуется, а валики 5 и 4 служат направляющими.

4.3 Теоретические исследования технологического процесса производства теплоизоляционных звукопоглощающих ламинированных материалов

4.3.1 Исследование процесса нанесения клея валичным способом

Одним из этапов технологического процесса производства ламинированных материалов является нанесение связующего состава на поверхность одного из слоев. Поэтому при проектировании клеевого узла с целью получения определенной толщины клеевой пленки необходимо было установить его основные параметры, а именно радиус и скорость вращения клеенамазного валика, давление валика на клеевой слой в зоне контакта с основой.

В результате экспериментальных исследований установлено, что при производстве слоистых композиционных нетканых материалов для прочного скрепления слоев толщина клеевой пленки должна быть не менее $0,5 \cdot 10^{-3}$ 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. Для производства ламинированных нетканых материалов при регламентированных показателях скорости движения полотна, характеристиках клея в работе необходимо определить технологические параметры клеенамазных валиков в клеенаносном узле [67, 116].

Рассмотрим схему нанесения клея на плоскую поверхность материала основы непрерывно вращающимися валиками (рисунок 4.5).

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 b_k и вращаются с одинаковыми угловыми скоростями $W_1=W_2$.

При исследовании процесса нанесения клея примем 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 4.5), угол контакта клеенамазного валика с клеем равен

$$\frac{\alpha_k}{2} = \arccos\left(1 - \frac{h}{R}\right). \quad (4.1)$$

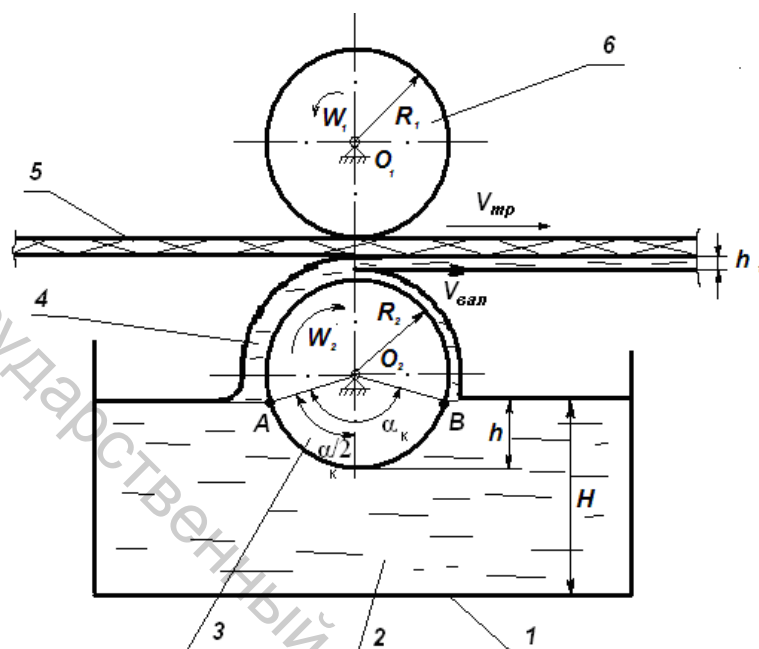


Рисунок 4.5 – Схема нанесения клея валиками:

1 – резервуар с клеем, 2 – клей, 3 – клеенамазной валик, 4 – слой наносимого клея, 5 – основа, 6 – верхний транспортирующий валик

Зависимость величины угла контакта клеенамазного валика с клеем от величины погружения представлена на рисунке 4.6.

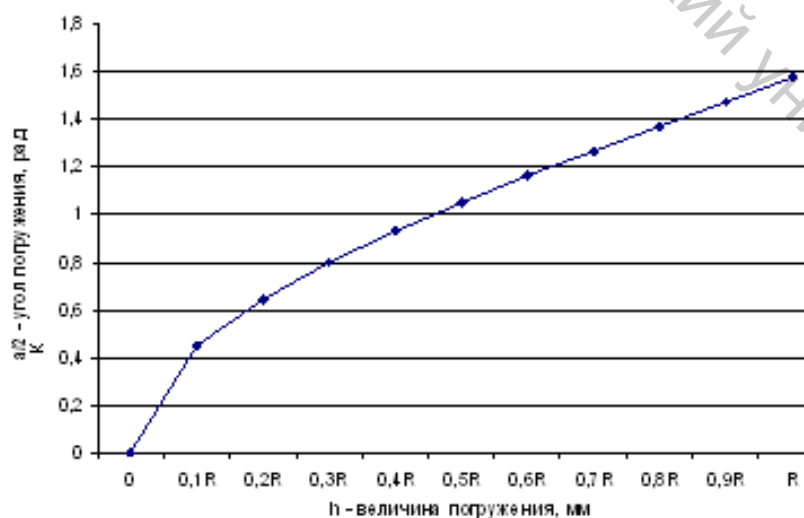


Рисунок 4.6 – Зависимость угла контакта от величины погружения

Длина дуги контакта валика с клеем определяется из отношения

$$l_{\cup AB} = 2R \arccos(1 - \frac{h}{R}). \quad (4.2)$$

Максимальное погружение валика в резервуар ($h=R$) соответствует углу $\frac{\alpha_{\kappa}}{2} = 90^{\circ}$ или в радиальной мере $\frac{\alpha_{\kappa}}{2} = \frac{\pi}{2}$, тогда максимальная длина дуги $l_{\cup AB}$ равна

$$l_{\cup AB \max} = \pi R, \text{ м.} \quad (4.3)$$

Определим величину радиуса клеенамазного валика из условия ламинарного режима движения вязкой жидкости при условии, что критерий Рейнольдса – Re для поверхностей, отличающихся от круглого сечения, равен $Re=580$ [116].

Критерий Рейнольдса определяется по известной в механике жидкости и газа формуле

$$Re = \frac{V d_{\text{э}}}{\nu}, \quad (4.4)$$

где V – линейная скорость клеенамазного валика, м/с ($V = V_{\text{вал}} = V_{\text{тр}}$); $d_{\text{э}}$ – эквивалентный диаметр, м:

$$d_{\text{э}} = 4R_{\text{гидр}},$$

где $R_{\text{гидр}}$ – гидравлический радиус, м:

$$R_{\text{гидр}} = \frac{f_{\kappa}}{p},$$

где f_{κ} – площадь нанесения клея, м^2 ; p – смоченный клеем периметр, м; ν – кинематическая вязкость клея, $\text{м}^2/\text{с}$.

Для расчетной схемы, представленной на рисунке 4.5

$$f_{\kappa} = l_{\cup AB} \epsilon_{\kappa}, \quad (4.5)$$

$$p = 2(l_{\cup AB} + \epsilon_{\kappa}). \quad (4.6)$$

Гидравлический радиус $R_{\text{гидр}}$ равен

$$R_{\text{зудр}} = \frac{l_{\cup AB} \vartheta_{\kappa}}{2(l_{\cup AB} + \vartheta_{\kappa})}. \quad (4.7)$$

Соответственно, эквивалентный диаметр равен

$$d_{\text{э}} = \frac{2l_{\cup AB} \vartheta_{\kappa}}{l_{\cup AB} + \vartheta_{\kappa}}. \quad (4.8)$$

Тогда

$$\text{Re} = \frac{2V l_{\cup AB} \vartheta_{\kappa}}{(l_{\cup AB} + \vartheta_{\kappa})\nu}, \text{ м.} \quad (4.9)$$

Длина дуги контакта

$$l_{\cup AB} = \frac{\text{Re} \nu \vartheta_{\kappa}}{2V \vartheta_{\kappa} - \text{Re} \nu}. \quad (4.10)$$

Учитывая соотношение (4.2), получим

$$2R \arccos\left(1 - \frac{h}{R}\right) = \frac{\text{Re} \nu \vartheta_{\kappa}}{2V \vartheta_{\kappa} - \text{Re} \nu}. \quad (4.11)$$

При максимальном погружении валика в резервуар, т.е. $h=R$, получим

$$\pi R = \frac{\text{Re} \nu \vartheta_{\kappa}}{2V \vartheta_{\kappa} - \text{Re} \nu}. \quad (4.12)$$

Тогда

$$R = \frac{\text{Re} \nu \vartheta_{\kappa}}{\pi(2V \vartheta_{\kappa} - \text{Re} \nu)}. \quad (4.13)$$

Определим радиус клеенамазного валика R для реального технологического процесса изготовления ламинированных нетканых материалов. Принимаем (по данным предприятия-изготовителя):

- ширину полотна (равную ширине валика) $\vartheta_{\kappa} = 1,0$ м;
- скорость движения полотна $V = 1$ м/с;
- вязкость клея $\nu = 6 \cdot 10^{-4}$ м²/с [116].

Подставив численные значения, получим $R = 0,067$ м.

Следовательно, диаметр клеенамазного валика $D = 2R \approx 0,13$ м. Угловая скорость клеенамазного валика W определяется из условия $V_{\text{тр}} = V_{\text{вал}}$:

$$W = \frac{2V_{mp}}{D} = 15,4, \text{ с}^{-1}. \quad (4.14)$$

Частота вращения клеенамазного валика n_k определяется соотношением

$$n_k = \frac{30W}{\pi} = 147, \text{ с}^{-1}. \quad (4.15)$$

Движение клея в зазоре между клеенамазным валиком и основой имеет ламинарный характер для чисел Рейнольдса, определяемых неравенством

$$\text{Re} \leq 30 \sqrt{\frac{D}{h_1}}, \quad (4.16)$$

где h_1 – толщина клеевой пленки, м.

$$h_1 \geq \frac{D \cdot 900}{\text{Re}^2} \geq 0,35 \cdot 10^{-3}, \text{ м}. \quad (4.17)$$

Для практических расчетов можно принять $h_1 = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м или $h_1 = 0,4$ мм.

Клеенамазной валик, равномерно вращаясь в вязкой среде, испытывает сопротивление, обусловленное вязким жидкостным трением. Сила жидкостного трения T определяется по известной формуле

$$T = -\mu^* S^* \frac{dV}{dh}, \quad (4.18)$$

где μ^* – динамическая вязкость клея, Па·с; S^* – площадь трущихся слоев жидкости, м²; dV/dh – градиент скорости, с⁻¹.

Для ламинарного режима движения жидкости градиент скорости dV/dh можно заменить отношением V/h_1 , тогда

$$T = -\mu^* S^* \frac{V}{h_1}. \quad (4.19)$$

Площадь трущихся слоев жидкости можно определить, зная длину дуги контакта $l_{\cup AB}$, определяемую по формуле (4.2) и известной ширине валика b_k :

$$S^* = l_{\cup AB} b_k = 2 \arccos\left(1 - \frac{h}{R}\right) b_k. \quad (4.20)$$

При максимальной дуге контакта $l_{\cup AB} = \pi R$ площадь равна

$$S^* = \pi R \vartheta_{\kappa} . \quad (4.21)$$

После подстановки в формулу (4.19) получим

$$T = -\mu^* \pi R \vartheta_{\kappa} \frac{V}{h_1} . \quad (4.22)$$

Момент силы жидкостного трения будет равен

$$M_{тр} = -TR = -\mu^* \pi R^2 \vartheta_{\kappa} \frac{V}{h_1} . \quad (4.23)$$

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 $M_{кр\phi}$ равен

$$M_{кр\phi} \geq -\frac{\mu^* \pi R^2 \vartheta_{\kappa} V}{h_1 \eta} , \quad (4.24)$$

где η – к.п.д.

Необходимая мощность определяется $N_{\phi} = M_{кр\phi} W$, Вт.

Определим 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 [102]

$$dP = \rho^* (Xdx + Ydy + Zdz) , \quad (4.25)$$

где dP – дифференциал давления, Н/м²; ρ^* – плотность клея, кг/м³; X, Y, Z – единичные массовые силы в проекциях на координатные оси.

На рисунке 4.7 представлена расчетная схема процесса в плоской координатной системе.

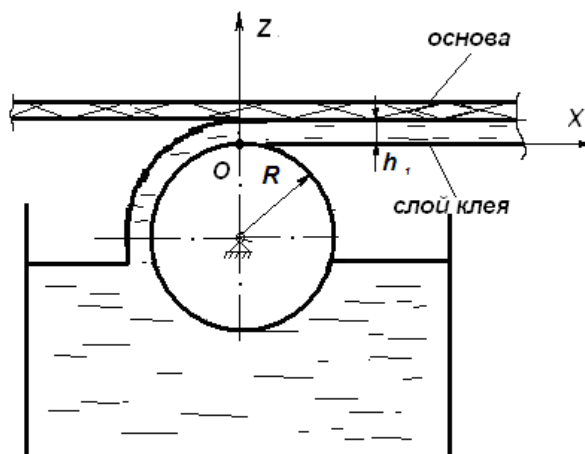


Рисунок 4.7 – Схема процесса нанесения клея

В проекции на координатные оси единичные массовые силы равны

$$\begin{cases} Z = W^2 R - g \\ X = -\mu^* \frac{dV}{dz h_1 \rho^*} \\ Y = 0 \end{cases} \quad (4.26)$$

Тогда дифференциальное уравнение (4.26) примет вид

$$dP = \rho^* \left[(W^2 R - g) dz - \mu^* \frac{dV}{dz h_1 \rho^*} dx \right]. \quad (4.27)$$

Ввиду малой толщины клеевого слоя градиент скорости по толщине dV/dz можно заменить отношением V/h_1 , тогда

$$dP = \rho^* \left[(W^2 R - g) dz - \mu^* \frac{V}{h_1 \rho^*} dx \right]. \quad (4.28)$$

Интегрируя выражение (4.28), получим

$$P = \rho^* W^2 R h_1 - \gamma^* h_1 - \mu^* \frac{V}{h_1^2} X, \text{ Па}, \quad (4.29)$$

где $\gamma^* = \rho g$ – удельный вес клея, Н/м³.

Максимальное давление (Н/м²) на клеевой слой P_{max} будет в зоне контакта клеенамазного валика с клеем при $x = 0$. Тогда

$$P_{max} = \rho^* W^2 R h_1 - \gamma^* h_1. \quad (4.30)$$

Минимальное давление $P_{min} = 0$ происходит на некотором расстоянии x_0 , определяемом из условия

$$\rho^* W^2 R h_1 - \gamma^* h_1 - \mu^* \frac{V}{h_1^2} x_0 = 0. \quad (4.31)$$

Тогда

$$x_0 = \frac{(W^2 R \rho^* h_1 - \gamma^* h_1) h_1}{\mu^* V} = \frac{h_1 (W^2 R \rho^* - \gamma^*)}{\mu^* V} = 1,5 \cdot 10^{-6}, \text{ м.} \quad (4.32)$$

Текущие значения давления на отрезке $0 \leq x \leq x_0$ определяются методом итераций, задавая значения Δx_i с определенным шагом:

$$P_i = \rho^* W^2 R h_1 - \gamma^* h_1 - \mu^* \frac{V}{h_1^2} \Delta x_i. \quad (4.33)$$

Полученная теоретически зависимость давления валиков от координаты x представлена на рисунке 4.8. Она построена с помощью программы Maple 9.5 при заданных показателях: $\rho^* = 1000 \text{ кг/м}^3$, $W = 15,4 \text{ с}^{-1}$, $R = 0,067 \text{ м}$, $h_1 = 0,0004 \text{ м}$, $\gamma^* = 9800 \text{ Н/м}^3$, $\mu^* = 1,5 \text{ Па} \cdot \text{с}$, $V = 1 \text{ м/с}$ [116].

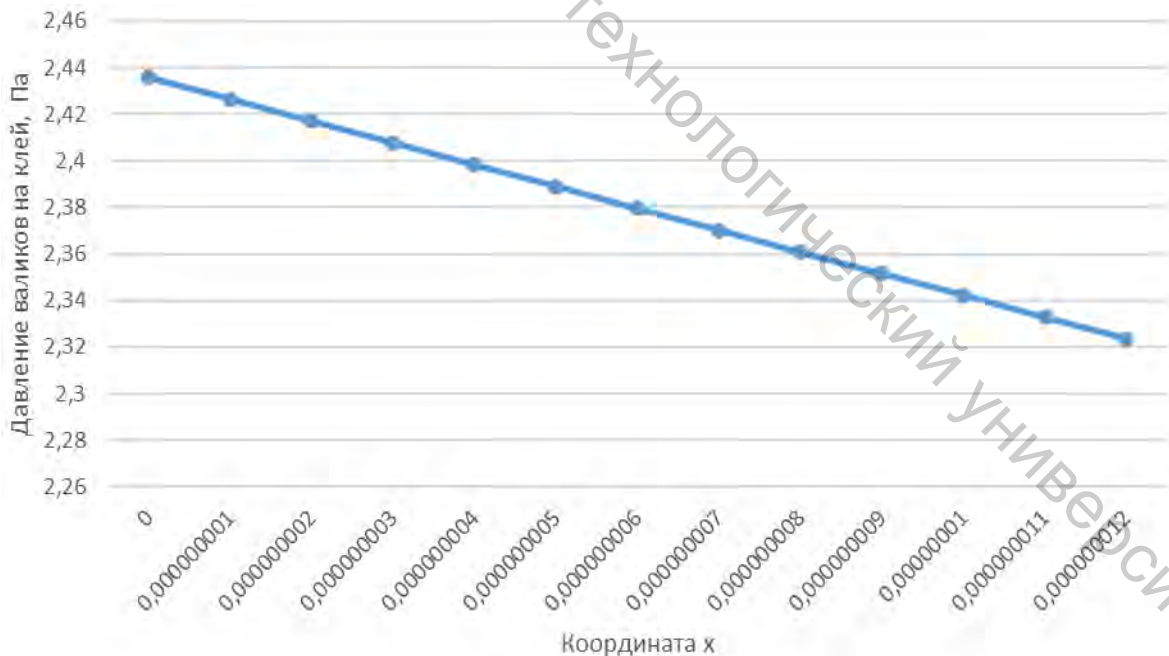


Рисунок 4.8 – Зависимость давления валиков от координаты x

Из графика (рисунок 4.8) 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 хорошо согласуются с параметрами устройств для нанесения клея валичным способом, установленного на предприятии [116, 117].

От толщины клеевой пленки зависит качество склеивания, а именно прочность закрепления слоев между собой, ее величину регулируют разводкой между клеенамазным и транспортирующим валиками.

4.3.2 Теоретические исследования работы адгезии, поверхностного натяжения и прочности покрытия при процессах склеивания слоев материала

В процессе соединения слоев материалов с использованием клеев склеивание происходит за счет покрытия поверхности одного из слоев материалов связующим, его проникновения в поры и последующей его кристаллизацией. Смачиваемость слоев материала связующими растворами имеет большое значение при изготовлении ламинированных материалов и во многом определяет их свойства, так как механические характеристики этих материалов при воздействии влаги, температуры и других внешних факторов в значительной степени зависят от межфазных границ раздела слоев.

Процесс смачивания в этом случае подчиняется общим закономерностям твердых тел жидкостями и могут характеризоваться скоростью впитывания жидкости или краевым углом смачивания.

Особый интерес представляют исследования по установлению взаимосвязи параметров процесса смачивания с поверхностными свойствами контактирующих фаз и в частности исследования изменения разрушающей нагрузки твердых тел, которые позволят прогнозировать явления смачивания и свойства не только межфазной границы, но и самих ламинированных материалов.

Клеевое соединение представляет собой сложную систему, состоящую из девяти слоев (рисунок 4.9).

При ламинировании под воздействием температуры и давления клей переходит в вязкотекучее состояние, проникает в материал на некоторую глубину и при охлаждении скрепляет слои.

Процесс ламинирования нетканых материалов флизелином или фольгой можно рассматривать с позиции теории механического заклинивания, основанной на объяснении процесса склеивания пористых и волокнистых материалов вследствие проникновения клея в их микротрещины под действием внешнего давления. При затвердевании клей закрепляется в порах и является как бы заклепкой, которой осуществляется скрепление [113].

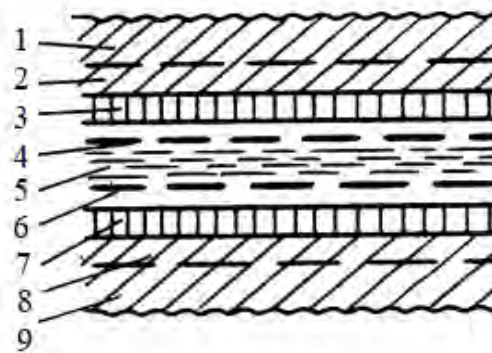


Рисунок 4.9 – Схема клеевого соединения:

1, 9 – склеиваемые материалы; 2, 8 – близкие к поверхности раздела слой склеиваемых материалов; 3, 7 – поверхности клея атомарной или молекулярной толщины; 4, 6 – переходные слои клея; 5 – основной клеевой слой

Согласно данной теории, чтобы увеличить прочность адгезионно-механического соединения, необходимо обеспечить такие условия, при которых достигается открытие и расширение пор материала и заклинивание в них адгезива с образованием заклепочных соединений. Из технологических факторов, регулируемых в процессе ламинирования нетканых материалов и влияющих на процесс склеивания слоев, наиболее важными являются факторы, представленные в таблице 4.3 [113].

Таблица 4.3 – Влияние факторов ламинирования на прочность клеевого соединения слоев

Фактор	Достоинства фактора	Недостатки фактора
1	2	3
Увеличение вязкости клея	увеличение толщины клеевого слоя	уменьшение скорости проникания клея в материал
Уменьшение вязкости клея	увеличение скорости проникания и количества пор, заполненных клеем	возможно выдавливание клея из зоны склеивания
Снижение температуры ниже температуры плавления клея		не происходит размягчения клея
Повышение температуры		проникновение клея на лицевую поверхность флизелина, изменение цвета и свойств материала
Повышение давления прессования	увеличение площади контакта между клеем слоями ламинированного материала	увеличение неоднородности клеевого соединения, уменьшение его толщины, образование не склеенных участков, проникновение клея на лицевую поверхность
Увлажнение материалов	увеличение скорости смачивания материалов	снижение прочности клеевого соединения; усадка склеиваемых материалов

На прочность клеевого соединения влияет также соотношение сил адгезии и когезии. Если силы адгезии больше сил когезии, получается прочное соединение, и наоборот, если силы когезии выше сил адгезии, соединение непрочное, и возрастает вероятность расслаивания дублированных систем. При этом расслаивание может быть когезионное, адгезионное и смешанное. Когезионное разрушение – разрушение, происходящее по адгезиву и частично по материалу в пределах клеевого соединения (рисунок 4.10 а). Адгезионным является разрушение по поверхности раздела между материалом и адгезивом по межфазной границе (рисунок 4.10 б). Смешанным следует считать такое разрушение, которое происходит частично по материалу и частично по межфазной границе (рисунок 4.10 в).

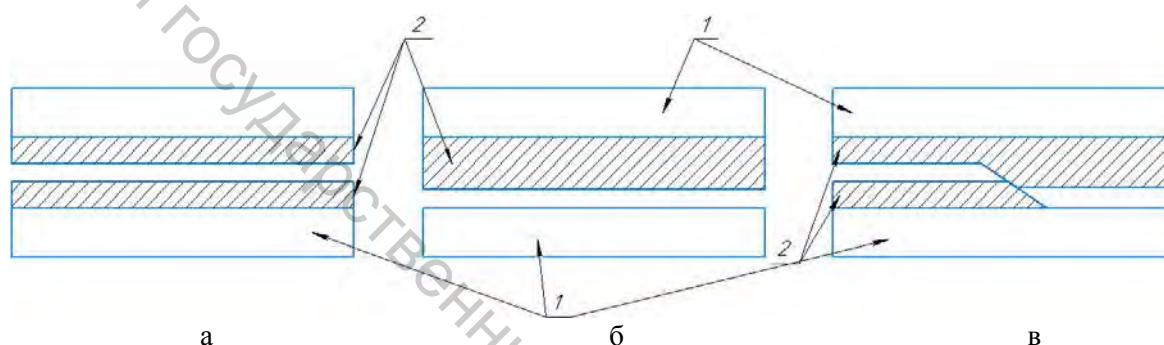


Рисунок 4.10 – Схема разрушения клеевого соединения:
а – когезионное; б – адгезионное; в – смешанное (1 – склеиваемые слои, 2 – клей)

Когезионный и смешанный характер отрыва при разрушении клеевых соединений в пористых материалах послужили поводом к возникновению мнения, что адгезия в таких системах имеет механическую природу. Вид разрушения в каждом конкретном случае зависит от соотношения прочностных свойств элементов клеевого соединения (адгезива и субстрата), а также прочности связи между ними.

Согласно теории Гуля В.Е. [113], технология склеивания основана на заполнении расплавленным клеем неровностей соединяемых поверхностей и их смачивания. Клей растекается по поверхности и проникает в поры.

Степень заполнения пор и выемок клеем определяется из формулы

$$\frac{h}{l} = 3,14 \cdot \sqrt{\frac{P \cdot t}{\eta}}, \quad (4.34)$$

где h – глубина пор, мкм; l – ширина пор, мкм; P – внешнее давление на слой клея, Па; t – продолжительность контакта расплавленного клея с материалом, с; η – вязкость клея (обратно пропорционально температуре), сП.

Чем меньше вязкость, тем больше скорость проникания и тем большее количество пор будет заполнено клеем [113].

Адгезионные процессы, как и другие поверхностные явления (адсорбция, капиллярные явления), вызываются особым энергетическим состоянием поверхности конденсированного тела по сравнению с его объемом. Это состояние обусловлено действием молекулярных (атомных) сил. Силы межатомного взаимодействия быстро убывают с расстоянием и, следовательно, зависят от плотности атомов (молекул). В газовой фазе плотность частиц мала, и поэтому силы притяжения между ними существенно не проявляются. В конденсированных средах плотность частиц велика, поэтому велики и силы межчастичного притяжения, что создает высокое внутреннее (когезионное) давление, многократно превышающее то внешнее давление на тело, которое можно обеспечить в обычных условиях. Это объясняет практическую несжимаемость жидкостей, твердых тел.

Внутри конденсированной фазы силовое поле в среднем однородно, т.е. градиент термодинамического потенциала близок к нулю, так как каждая частица испытывает одинаковое притяжение других частиц со всех сторон. Однако при подходе к поверхности симметрия силового воздействия нарушается. Атом, находящийся на поверхности, испытывает притяжение только внутри и в боковых направлениях, а уравнивающее притяжение со стороны молекул газа близко к нулю. Таким образом, на каждый атом (молекулу) у поверхности действуют сила, результирующая $\vec{F}_n$, которая направлена внутрь тела нормально к поверхности раздела фаз (рисунок 4.11).

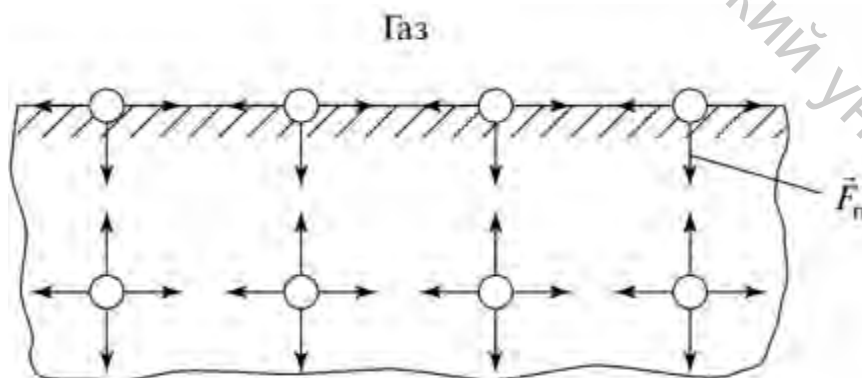


Рисунок 4.11 – Воздействие результирующей силы у поверхности материала

В результате между фазами образуется очень тонкий (толщиной в несколько атомных слоев) слой, в котором вещество находится под

действием особого рода поверхностных сил. Его называют поверхностным слоем. Сила, направленная внутрь, стремится уменьшить поверхность, так как частицы все время втягиваются с поверхности внутрь тела.

Стремление поверхности к самопроизвольному сокращению говорит о наличии в поверхностном слое избытка энергии. Это есть не что иное, как проявление некомпенсированной со стороны другой, например, газовой, фазы энергии поверхностных частиц (энергии ненасыщенных химических связей, молекулярного притяжения и т. п.) – эту избыточную энергию называют поверхностной или межфазной энергией:

$$U_{1-2} = F_{1-2} + TS_{1-2}, \quad (4.35)$$

где F_{1-2} , S_{1-2} – свободная энергия и энтропия поверхностного слоя между фазами.

При увеличении (растяжении) поверхности работа внешних сил затрачивается на преодоление сил притяжения, направленных внутрь фазы, в результате выхода новых частиц изнутри на поверхность. Эта работа на единицу площади при бесконечно малом изменении поверхности и $T = \text{const}$ равна соответствующему изменению свободной поверхностной энергии:

$$\sigma_{1-2} = \left(\frac{\partial F_{1-2}}{\partial S} \right) = \bar{F}_{1-2}, \text{ Дж/м}^2, \quad (4.36)$$

Величину σ_{1-2} называют удельной свободной поверхностной энергией или поверхностным, межфазным натяжением. Для жидкости ее можно определить по выражению

$$\sigma_{1-2} = \left(\frac{F_{1-2}}{S} \right)_T. \quad (4.37)$$

Поскольку приращение F в данном случае одно и то же как при растяжении поверхности, так и при добавлении к ней новой части. Однако для твердого тела эти определения не тождественны, так как поверхность твердого тела неоднородна. Поэтому локальное значение σ_{1-2} для твердого тела следует определять по формуле (4.36).

Имея избыточную свободную энергию, поверхность стремится от нее избавиться, поэтому при сближении ее с другой поверхностью

происходит их притяжение или адгезия, в процессе которой свободная энергия уменьшается, превращаясь в теплоту.

Работа, которая совершается системой из двух поверхностей при их равновесной взаимной адгезии, отнесенная к единице площади контакта, называется работой адгезии A_a . Она равна по абсолютной величине и обратна по знаку работе, которую необходимо совершить для равновесного (без деформации) разъединения этих поверхностей также в расчете на единицу площади контакта. Работу адгезии можно представить как

$$A_a = -E_{св} N, \quad (4.38)$$

где $E_{св}$ – средняя энергия единицы связи, определяющая адгезию; N – число таких связей на единицу площади.

Очевидно, что $E_{св}$ является суммой энергий всех видов связи, осуществляющих данный процесс адгезии. Работа адгезии определяет прочность связи между телами и поэтому является основной характеристикой этого процесса [113].

В случае только молекулярной адгезии двух плоских твердых поверхностей, принимая, что взаимодействуют только монослои атомов, работу адгезии можно рассчитать по формуле

$$A_a = \frac{a}{12\pi h^2}, \quad (4.39)$$

где a – постоянная Ван дер Ваальса для данной пары тел; h – расстояние между контактирующими телами.

Для систем «жидкость – твердое тело» необходимо учитывать и притяжение молекул, находящихся в более глубоких слоях жидкости на глубине сотен ангстрем, поэтому для них

$$A_a = \frac{0,6a}{\pi h^2}. \quad (4.40)$$

Работа A_a равна изменению (убыли) удельной свободной поверхностной энергии системы при обратимом изотермическом процессе адгезии:

$$A_a = -\Delta \bar{F}_{сис.} \quad (4.41)$$

Эта работа в конечном счете превращается в теплоту. Полный тепловой эффект $Q_{сис}$ адгезии равен

$$-\bar{Q}_{\text{сис.}} = \Delta\bar{U}_{\text{сис.}} = \Delta\bar{F}_{\text{сис.}} + T\Delta\bar{S}_{\text{сис.}}, \quad (4.42)$$

где $\Delta\bar{U}_{\text{сис.}}$, $\Delta\bar{S}_{\text{сис.}}$ — изменения удельных поверхностных энергии и энтропии системы.

Несмотря на кажущуюся простоту формул (4.39), (4.40), рассчитать по ним работу адгезии, даже если известна величина a , можно только оценочно, так как неопределенным является расстояние h . Определить A_a экспериментально путем отрыва тел друг от друга также возможно не во всех случаях, так как не всегда работа отрыва равна работе адгезии. Например, невозможно оторвать жидкость от твердого тела, не нарушив ее целостность. Поэтому часто применяют косвенные методы определения работы адгезии или используют другие величины для характеристики адгезии.

Пусть адгезия двух поверхностей конденсированных сред происходит в общем случае в какой-либо третьей среде – жидкости или газе, что почти всегда имеет место на практике. С помощью формулы (4.44) выражение для A_a можно записать следующим образом:

$$A_a = -\left(\frac{\partial\Delta F_{\text{сис.}}}{\partial S}\right)_T = -\left[\left(\frac{\partial F_{1-2}}{\partial S}\right)_T - \left(\frac{\partial F_{1-3}}{\partial S}\right)_T - \left(\frac{\partial F_{2-3}}{\partial S}\right)_T\right] = \sigma_{1-3} + \sigma_{2-3} - \sigma_{1-2}, \quad (4.43)$$

где $\Delta F_{\text{сис.}}$ — изменение свободной поверхностной энергии системы;

$F_{1-2}, F_{1-3}, F_{2-3}$ — межфазные свободные поверхностные энергии контактирующих сред 1,2; 1,3; 2,3, а $\sigma_{1-2}, \sigma_{1-3}, \sigma_{2-3}$ — соответствующие им поверхностные, или межфазные, натяжения (рисунок 4.12). Таким образом, получаем уравнение Дюпре в обобщенной форме:

$$A_a = \sigma_{1-3} + \sigma_{2-3} - \sigma_{1-2}. \quad (4.44)$$

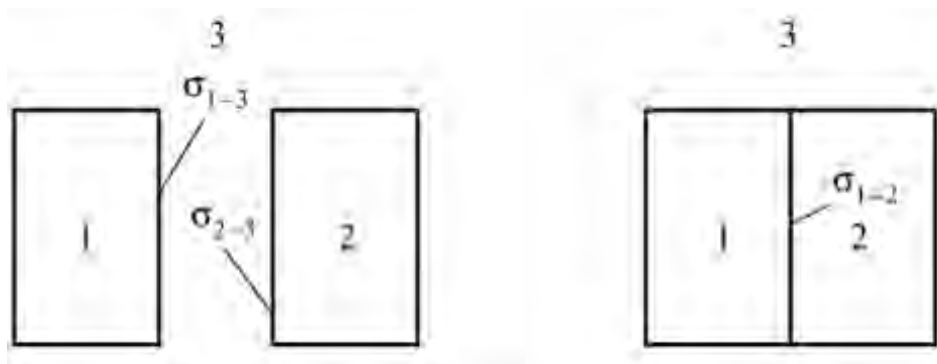


Рисунок 4.12 – Межфазные натяжения

Из выражения (4.44) видно, что для положительной адгезии тел 1 и 2 необходимо условие $\sigma_{1-3} + \sigma_{2-3} > \sigma_{1-2}$. Таким образом, работу адгезии можно найти, если известны поверхностные натяжения на границах пар тройной системы. В частном случае когезии, когда объемно взаимодействуют одинаковые тела 1 и 2 и поверхность между ними отсутствует, $\sigma_{1-3} = \sigma_{2-3}$, $\sigma_{1-2} = 0$, формула (4.44) переходит в выражение (4.45)

$$A_k = 2\sigma_{1-3}, \quad (4.45)$$

где A_k – работа когезии.

$$A_{aum.} = 2\sigma_{1-3} - \sigma_{1-2}, \quad (4.46)$$

где $A_{aum.}$ – работа аутогезии.

В формулах (4.44)–(4.46) представлены абсолютные величины поверхностных натяжений. Но, как мы знаем, A может рассматриваться и как сила на единицу длины, т.е. это векторная величина. Рассмотрим условие равновесия трех любых контактирующих фаз, имеющих произвольную кривизну (рисунок 4.13). В точке тройного контакта векторы поверхностных натяжений направлены по касательным к поверхностям. В равновесии векторная сумма этих сил должна равняться нулю. Спроектировав их на направление σ_{1-2} , получим условие равновесия трех фаз при адгезии, или уравнение Юнга в обобщенном виде (4.47).

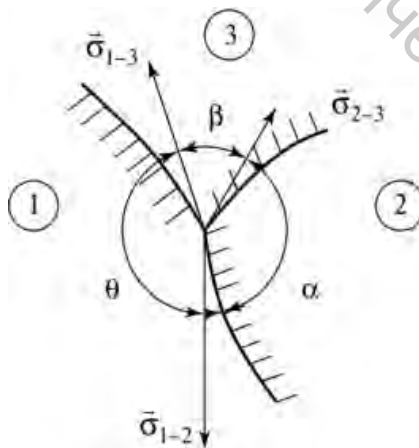


Рисунок 4.13 – Условие равновесия контактирующих фаз, имеющих произвольную кривизну

$$\sigma_{1-3} \cos \theta + \sigma_{1-2} + \sigma_{2-3} \cos \alpha = 0. \quad (4.47)$$

Это уравнение позволяет исключить одно из четырех неизвестных в уравнении (4.44), если известны контактные углы α и θ .

Адгезия покрытия количественно оценивается методом отрыва от поверхности. Однако внешнее усилие, или работа отрыва, тратится не только на преодоление сил адгезии, но и на побочные процессы. Поэтому измерить истинную, или равновесную, работу адгезии покрытия существующими методами невозможно. Равновесная работа адгезии, или, для краткости, адгезия не поддается также точному расчету. Итак, при отрыве покрытия измеряется адгезионная прочность, которую надо отличать от адгезии. Адгезионная прочность – работа отрыва A_o или сила отрыва F_o – это величина, измеряемая при нарушении связей между адгезивом и субстратом. Именно A_o или F_o являются критериями оценки адгезии покрытий.

Отрыв покрытия осуществлен путем разделения адгезива и субстрата тангенциальной силой отрыва (рисунок 4.14). В этих случаях покрытие и подложка разделяются на такие расстояния, которые исключают их дальнейшее взаимодействие.

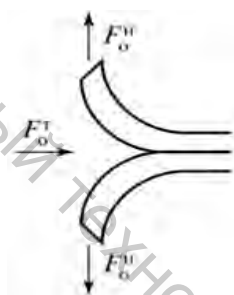


Рисунок 4.14 – Взаимодействие сил при отрыве покрытия

Связь между нормальной и тангенциальной силами отрыва в случае, представленном на рисунке (4.14), описывается выражением

$$F_o^H = kF_o^T, \quad (4.48)$$

где k – коэффициент, $k > 1$, как установлено экспериментально.

В зависимости от прочности адгезионных связей может наблюдаться когезионный отрыв (разрывается покрытие или подложка), смешанный адгезионно-когезионный отрыв (частично отслаивается покрытие и частично разрушается адгезив или субстрат).

Метод отслаивания наиболее прост, но отличие адгезионной прочности от адгезии здесь наибольшее. Работу отрыва можно представить как сумму различных работ:

$$A_o = A_a + A_d + A_s + A_m - A_{def}, \quad (4.49)$$

где $A_\partial, A_\partial, A_m, A_{\text{деф.}}$ — соответственно работы упругопластической деформации покрытия, разделения электрических зарядов, возникающих при разъединении поверхностей, преодоления механических зацеплений выступов шероховатостей, образования трещин и других дефектов, уменьшающих адгезионную прочность (поэтому знак «—»). Аналогично определяется и сила отрыва (рисунок 3.43):

$$F_o'' = F_a + F_\partial + F_\partial + F_m - F_{\text{деф.}} \quad (4.50)$$

В эксперименте обычно измеряют силу отрыва, а оценивают адгезионную прочность работой отрыва. Поэтому необходимо установить связь между A_o и F_o'' . Соотношение между полной работой отрыва

$$\bar{A}_o = A_o S, \quad (4.51)$$

где S — площадь покрытия с нормальной силой отрыва, которую можно представить, как

$$\delta \bar{A}_o = F_o'' dy. \quad (4.52)$$

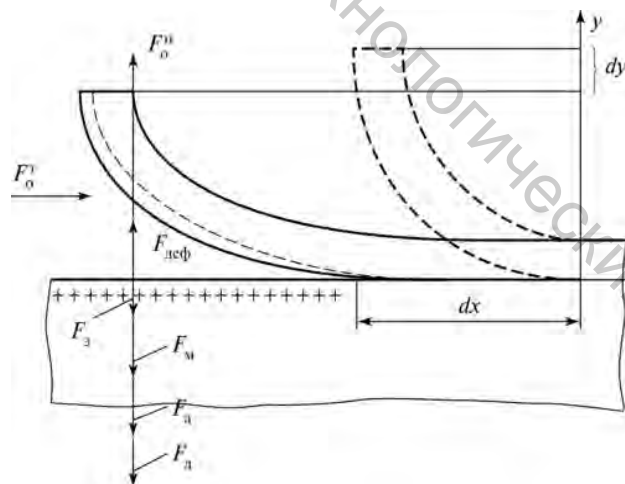


Рисунок 4.15 – Взаимодействие сил при отрыве покрытия

Силу F_o'' можно выразить через модуль Юнга и деформацию. Интегрируя выражение (4.52), в приближенном виде получаем

$$\bar{A}_o = \frac{3Eb h^3 y^3}{8x^4}, \quad (4.53)$$

где E – модуль Юнга материала покрытия; b , h – его ширина и толщина; x , y – координаты (рисунок 4.15).

Можно также оценить A_o , если уже известна сила отрыва F_o :

$$A_o = \frac{F_o(1 - \cos \alpha)}{b}, \quad (4.54)$$

где α – угол отслаивания покрытия.

Механическая теория адгезии возникла при объяснении процессов склеивания пористых и волокнистых материалов с поверхностной неоднородностью вследствие течения массы клея (адгезива) в микротрещины материала (субстрата) под действием внешнего давления и капиллярных сил. При затвердевании полимера адгезив закрепляется на поверхности пор и щелей субстрата посредством молекулярных сил. Полимер, закрепленный в порах и щелях субстрата, является как бы заклепкой, которой осуществляется скрепление. Аналогия с механическими явлениями привела к теории механического заклинивания. При контакте полимерных клеев (в виде растворов или расплавов) с пористыми телами (дерево, кожа, ткань) в микро- и макропоры субстрата происходит постепенное проникание полимера. Согласно теории Гуля В.Е. [49], технология склеивания основана на заполнении расплавленным клеем неровностей соединяемых поверхностей и их смачивания. Клей растекается по поверхности и проникает в поры. Степень заполнения пор и выемок клеем определяется из формулы (4.54) [113].

Чем меньше вязкость, тем больше скорость проникания и тем большее количество пор будет заполнено клеем, но при этом возможно выдавливание клея в случаях выполнения клеевых швов из зоны склеивания. С другой стороны, увеличение вязкости адгезива уменьшает скорость проникания его в макроструктуру субстрата, но увеличивает толщину клеевого слоя [113].

В УО «ВГТУ» разработана методика теоретических и практических расчетов разрушающих нагрузок и напряжений при расслаивании дублированных систем в ортогональном направлении нагрузок и под углом [113].

Для расчетов рассмотрим модель распределения нагрузки под действием силы P , приложенной в направлении, показанном на рисунке 4.16.

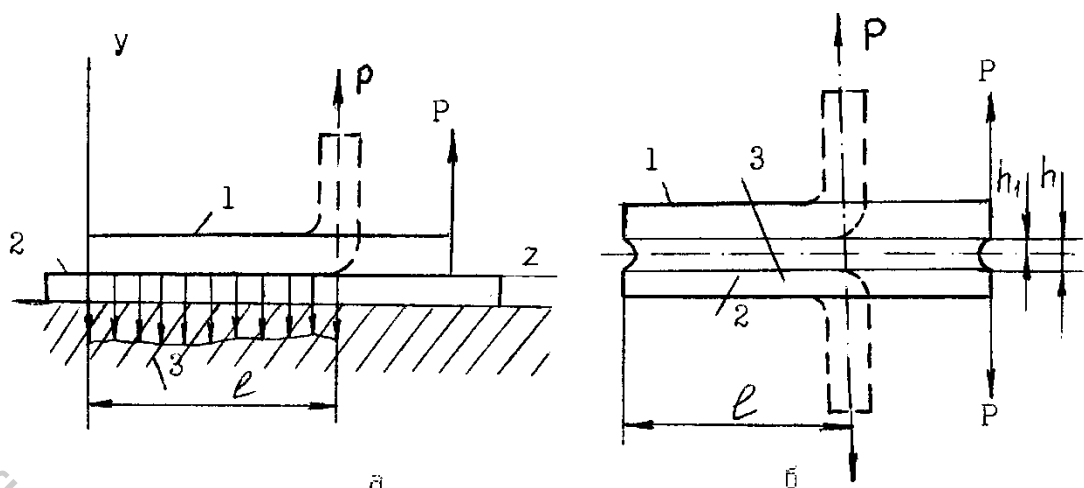


Рисунок 4.16 – Расслаивание ламинированного образца при определении разрушающей нагрузки

В данном случае нетканое термоскрепленное полотно, приклеенное к жесткой пластине, можно представить как упругий стержень, закрепленный на упругом основании. Известно, что дифференциальное уравнение упругой кривой стержня имеет вид:

$$\frac{d^2 Y}{dZ^2} = \frac{M_x}{C}, \quad (4.55)$$

где Y – прогиб балки в сечении с координатой Z ; M_x – изгибающий момент в этом сечении; C – жесткость поперечного сечения балки на изгиб.

Дважды продифференцировав уравнение (4.55), используя дифференциальные зависимости (4.56), получим дифференциальное уравнение (4.57) или однородное уравнение (4.58)

$$\begin{cases} \frac{dM_x}{dZ} = Q \\ \frac{dQ}{dZ} = q = -\chi Y \end{cases}, \quad (4.56)$$

где Q – поперечная сила в сечении стержня с координатой Z ; q – интенсивность распределения реакции; χ – коэффициент жесткости упругого основания.

$$\frac{d^4 Y}{dZ^4} = \frac{-\chi Y}{C}, \quad (4.57)$$

$$\frac{d^4 Y}{dZ^4} + 4K^4 Y = 0. \quad (4.58)$$

Тогда прогиб балки в сечении с координатой Z будет равен

$$Y = e^{-KZ} (C_1 \sin KZ + C_2 \cos KZ) + e^{KZ} (C_3 \sin KZ + C_4 \cos KZ) \quad (4.59)$$

или

$$Y = C_1 \sin KZ + C_2 \sin KZ \operatorname{ch} KZ + C_3 \cos KZ \operatorname{sh} KZ + C_4 \cos KZ \operatorname{ch} KZ, \quad (4.60)$$

где C_1, C_2, C_3, C_4 – произвольные постоянные интегрирования, определяемые из краевых условий

В данном случае краевые условия имеют вид

$$\begin{cases} Q|_{Z=0} = 0; Y'''|_{Z=0} = 0 \\ M|_{Z=0} = 0; Y''|_{Z=0} = 0 \\ Q|_{Z=e^{\frac{P}{C}}} = 0; Y'''|_{Z=e^{\frac{P}{C}}} = 0 \\ M|_{Z=e^{\frac{P}{C}}} = 0; Y''|_{Z=e^{\frac{P}{C}}} = 0 \end{cases} \quad (4.61)$$

Используя уравнение (4.55) и дифференцируя зависимости (4.56), краевые условия (4.61) можно записать в следующем виде

$$\begin{cases} Y'''|_{Z=0} = 0; Y''|_{Z=0} = 0 \\ Y'''|_{Z=e^{\frac{P}{C}}} = 0; Y''|_{Z=e^{\frac{P}{C}}} = 0 \end{cases} \quad (4.62)$$

Подставляя решение (4.60) в условие (4.62), найдем

$$\begin{cases} C_1 = 0; C_2 = C_3 = \frac{P}{2CK^3} \frac{\sin Kl \operatorname{sh} Kl}{\operatorname{sh}^2 Kl - \sin^2 Kl}; \\ C_4 = \frac{P}{2CK^3} \frac{\cos Kl \operatorname{ch} Kl - \sin Kl \operatorname{ch} Kl}{\operatorname{sh}^2 Kl - \sin^2 Kl} \end{cases} \quad (4.63)$$

После чего решение (4.59) записывается в виде

$$Y = \frac{P}{2CK^3(sh^2 Kl - \sin^2 Kl)} [\sin Klsh Kl (\sin KZchKZ + \cos KZshZ) + (\cos Klsh Kl - \sin Klch Kl) \cdot \cos KZchKZ] \quad (4.64)$$

Используя решение (4.64), найдем наибольший прогиб стержня (полоски материала)

$$f = Y|_{Z=l} = \frac{P}{4CK^3} \frac{sh^2 Kl - \sin 2Kl}{sh^2 Kl - \sin^2 Kl} \cdot \quad (4.65)$$

Условие разрушения клеевого соединения имеет вид

$$\sigma_{PA3P} = \frac{\chi f}{B}, \quad (4.66)$$

где f – наибольший прогиб пробной полоски; B – ширина пробной полоски; $\sigma_{разр}$ – разрушающее напряжение.

Коэффициент жесткости χ определяется из выражения

$$\chi = \frac{E_{кл} B}{h}, \quad (4.67)$$

где $E_{кл}$ – модуль продольной упругости клея; h – толщина клеевого слоя [113].

Полагая, что относительная разрушающая деформация $E_{разр}$ равна

$$E_{PA3P} = \frac{\sigma_{PA3P}}{E_{кл}} \quad (4.68)$$

и, используя в условии разрушения (4.65) выражение (4.64), получим формулу разрушающей нагрузки $P_{разр}$:

$$P_{PA3P} = 4CK^3 E_{PA3P} \cdot h \frac{sh^2 Kl - \sin^2 Kl}{sh 2Kl - \sin 2KL}. \quad (4.69)$$

Безразмерный параметр K , используемый во всех предыдущих уравнениях, определяется с помощью обозначения $4K^4 = \frac{\chi}{C}$ и формулы (4.67) и равен

$$K = \sqrt[4]{\frac{E_K \cdot B}{4ch}}. \quad (4.70)$$

Полученная формула (4.69) может быть использована и для случая расслаивания ламинированных слоев, изображенного на рисунке 4.16. Тогда в формуле (4.70) нужно использовать не толщину клеевого слоя h , а величину $h_l = 0,5h$, в предположении, что жесткость материала одинакова для верхней и нижней полосок. Данная формула позволяет теоретически определить разрушающую нагрузку в случае направления усилия расслаивания в перпендикулярном (ортогональном) направлении к плоскости полоски ткани.

4.4 Исследование показателей качества теплоизоляционных звукопоглощающих ламинированных термоскрепленных материалов

Для производства ПТЗЛТ в качестве покрывного слоя были использованы: нетканый материал – флизелин, фольга, волокнистый состав которых представлены в таблице 4.4. В качестве связующего применялся полиамидный клей.

Таблица 4.4 – Волокнистый состав ПТЗЛТ

Свойство	Нетканый материал	Флизелин	Фольга
Волокнистый состав, %	Отходы кромки грунтовой ткани – 50 %, полиэфирное бикомпонентное волокно марки 4DE51Слон, производства Корея – 10 %, регенерированное волокно (измельченные межлекальные отходы швейного производства) – 40 %	ПЭ – 100 %	Алюминий марки А5

Недостатками фольгированного слоя являются: появление коррозии при высокой влажности и больших перепадах температур, подвергается влиянию кислот, щелочей и других агрессивных веществ.

В лабораторных условиях предприятия ОАО «Акотерм Флакс» были наработаны образцы ПТЗЛТ при использовании материалов, указанных в таблице 4.4. Результаты исследований при различных режимах ламинирования представлены в таблице 4.5.

Разрывная нагрузка флизелина до ламинирования равна 0,058 кН, разрывное удлинение 16 мм, фольги – 0,032 кН и 14 мм, соответственно.

Испытания проводились согласно ГОСТу 15902.3-79 «Полотна нетканые. Методы определения прочности».

Измерения разрывной нагрузки и удлинения ПТЗЛТ в ходе эксперимента снимались, как только разрушался слой прокладки, так как происходил останов машины.

Рассмотрим зависимости разрывного удлинения и разрывной нагрузки от толщины ПТЗЛТ (оказывает влияние на поверхностную плотность, пористость материала – отчет за первый этап НИР), от толщины клеевой пленки и при использовании двухстороннего ламинирования.

В таблице 4.6 представлена зависимость исследуемых показателей от толщины ПТЗЛТ при ламинировании флизелином при толщине клеевой пленки 0,6 мм.

Как видно из таблицы 4.6, разрывная нагрузка увеличивается для образцов ПТЗЛТ, причем при увеличении толщины нетканого полотна разрывная нагрузка увеличивается пропорционально на 18,1 %, 59,5 %, 204,0 %, для толщины 100 мм, 200 мм и 500 мм, соответственно.

Что касается разрывного удлинения ПТЗЛТ, здесь все наоборот, при ламинировании разрывное удлинение увеличилось (таблица 4.7) на 4,3 мм, на 1,7 мм для образцов толщиной 100 и 200 мм и уменьшилось на 45,9 % для образцов толщиной 500 мм. Это связано с тем, что разрывная машина останавливалась, как только разрушался слой прокладки ПТЗЛТ, а в образцах без ламинации разрыв фиксировался до разрыва самого полотна.

Зависимости прочности на раздирание от толщины ПТЗЛТ по результатам таблицы 4.5 выявлено не было, вследствие срыва эксперимента, следовательно, можно сделать вывод о том, что данная методика не подходит для определения раздирающей нагрузки ПТЗЛТ.

Рассмотрим зависимость исследуемых показателей от толщины клеевой пленки при ламинировании ПТЗЛТ флизелином, при одинаковой толщине нетканого материала, равной 100 мм (таблица 4.7). Данному исследованию были подвергнуты именно эти образцы, так как необходимо выявить зависимость адгезионного слоя, а не самого полотна. Результаты эксперимента показали, что разрывное удлинение ПТЗЛТ увеличилось в обоих случаях, но при увеличении толщины клеевой пленки на 0,2 мм удлинение меньше на $53,3 - 21,7 = 31,7$ %. Разрывная нагрузка увеличилась для образца ПТЗЛТ с толщиной клеевой пленки 0,6 мм на 18,1 %, а вот для образца ПТЗЛТ с толщиной клеевой пленки 0,4 мм – уменьшилась на 0,143 кН. Прочность на раздирание у этих образцов увеличилась при увеличении толщины клеевой пленки (таблица 4.7) и равна $0,040 - 0,025 = 0,015$ кН.

При ламинировании нетканого полотна с двух сторон при одинаковой толщине клеевого слоя – 0,6 мм и толщине полотна 500 мм увеличились значения обоих показателей (таблица 4.7). Как видно из данных таблицы, при двойном ламинировании разрывная нагрузка ПТЗЛТ увеличилась на 0,825 кН, при том что в одинарном ламинировании тоже произошло увеличение, но значительно меньше – на 0,051 кН. Разрывное удлинение ПТЗЛТ при двойном ламинировании уменьшилось на 12,3 %, однако это меньше по сравнению с образцами

ламинированными с одной стороны на $87,7 - 74,1 = 13,6$ %. Прочность на раздирание ПТЗЛТ увеличилась в обоих случаях (таблица 4.8). При двойном ламинировании по сравнению с одинарным разница составила 0,03 кН.

В таблице 4.9 представлены результаты испытаний для фольгированных образцов толщиной 100 мм. Из таблицы видно, что разрывное удлинение ПТЗЛТ увеличилось, а вот разрывная нагрузка ПТЗЛТ уменьшилась. Такая же ситуация наблюдается и с образцами ПТЗЛТ при двойном ламинировании. Но известным является тот факт, что такие образцы обладают повышенными теплозащитными свойствами, поэтому для обеспечения увеличения разрывной нагрузки необходимо подобрать другой тип фольги.

Полученные нетканые композиционные материалы нашли применение:

- в строительстве в качестве тепло- и звукоизоляции жилых и нежилых помещений, подложки под ламинат [67];
- в производстве мебели, матрасников [67];
- в машиностроении в качестве тепло- и звукоизоляции автомобилей, и в производстве автоаксессуаров – автомобильных органайзеров в багажник автомобиля, адаптеров ремня безопасности; при производстве чехлов для уплотнения поверхности сиденья, с целью устранения провисания и растяжения ткани в процессе эксплуатации [117–120];
- в производстве одежды специального назначения для защиты от холода, механических воздействий и др. [121–126].

Таблица 4.5 – Результаты испытаний образцов ПТЗЛТ

№ образ-ца	Толщина нетканого полотна ПТЗЛТ, мм/толщины клеевого слоя, мм	Результаты испытаний до ламинирования ПТЗЛТ		Результаты испытаний после ламинирования ПТЗЛТ			Примечание
		Разрывная нагрузка при разрыве, кН	Разрывное удлинение при разрыве, мм	Разрывная нагрузка при разрыве, кН	Разрывное удлинение при разрыве, мм	Прочность при раздирании, кН	
		Размер элементарной пробы нетканого полотна 50×200 мм		Размер элементарной пробы ламинированного нетканого полотна 50×200 мм		Размер элементарной пробы 70×200 мм	
1	2	3	4	5	6	7	8
ламинирование флизелином							
1	200/0,6	0,070	24	0,115	25	0,600	При испытании прочности при раздирании в элементарной пробе произошел разрыв язычка
				0,112	26		
				0,108	26		
2	500/0,6	0,025	37	0,075	17	0,025	Прокладка сдерживала разрыв элементарной пробы нетканого полотна
				0,075	21		
				0,078	22		
3	100/0,4	0,350	20	0,215	32	0,025	
				0,210	29		
				0,195	31		
4	100/0,6	0,350	20	0,340	22	0,040	Надрыва как такового не было в основном шло расслоение полотна
				0,440	25		
				0,460	26		
двухстороннее ламинирование флизелином							
5	500/0,6	0,025	37	0,850	22	0,028	При раздирании шло раздирание прокладки перпендикулярно срезу пробы
				0,850	25		
				0,800	24		

Окончание таблицы 4.5

1	2	3	4	5	6	7	8
ламинирование фольгой							
6	100/0,6	0,35	20	0,215	35	0,065	Раздирание элементарной пробы пошло перпендикулярно срезу, а не в низ, как требует эксперимент
				0,220	32		
				0,175	24		
7	100/0,4	0,35	20	0,190	32	0,040	
				0,170	30		
				0,180	32		
двухстороннее ламинирование фольгой							
8	100/0,4	0,35	20	0,250	39	0,045	
				0,230	40		
				0,230	38		

Таблица 4.6 – Зависимость разрывного удлинения и разрывной нагрузки ПТЗЛТ от толщины нетканого полотна

Разрывная нагрузка, кН															Абсолютное отклонение среднего от значения для образца без ламинации, кН			Темп роста, %		
без ламинирования			толщина нетканого материала												для толщины, мм			для толщины, мм		
			100 мм				200 мм				500 мм				100	200	500	100	200	500
для толщины, мм			№ испытания				№ испытания				№ испытания									
100	200	500	1	2	3	среднее	1	2	3	среднее	1	2	3	среднее						
0,350	0,070	0,025	0,340	0,440	0,460	0,413	0,115	0,112	0,108	0,112	0,075	0,075	0,078	0,076	0,063	0,042	0,051	118,1	159,5	304,0
Разрывное удлинение, мм																				
20	24	37	22	25	26	24,3	25	26	26	25,7	17	21	22	20,0	4,3	1,7	-17,0	121,7	106,9	54,1

Таблица 4.7 – Зависимость разрывного удлинения и разрывной нагрузки ПТЗЛТ от толщины клеевой пленки

Разрывная нагрузка, кН									Абсолютное отклонение среднего от значения для образца без ламинации, кН		Темп роста, %	
без ламинирования	толщина клеевой пленки								для толщины клеевой пленки, мм		для толщины клеевой пленки, мм	
	0,4 мм				0,6 мм				0,4	0,6	0,4	0,6
	№ испытания				№ испытания							
	1	2	3	среднее	1	2	3	среднее				
0,350	0,215	0,210	0,195	0,207	0,340	0,440	0,460	0,413	-0,143	0,063	59,0	118,1
Разрывное удлинение, мм												
20	32	29	31	30,7	22	25	26	24,3	10,7	4,3	153,3	121,7

Таблица 4.8 – Зависимость разрывного удлинения и разрывной нагрузки ПТЗЛТ от вида ламинации

Разрывная нагрузка, кН									Абсолютное отклонение среднего от значения для образца без ламинации, кН		Темп роста, %	
без ламинирования	односторонняя ламинация				двухсторонняя ламинация				односторонняя ламинация	двухсторонняя ламинация	односторонняя ламинация	двухсторонняя ламинация
	№ испытания				№ испытания							
	1	2	3	среднее	1	2	3	среднее				
0,025	0,075	0,075	0,078	0,076	0,850	0,850	0,850	0,850	0,051	0,825	304,0	34 пп
Разрывное удлинение, мм												
27	17	21	22	20,0	22	25	24	23,7	-7,0	-3,3	74,1	87,7

Таблица 4.9 – Зависимость разрывного удлинения и разрывной нагрузки фольгированных образцов от толщины клеевой пленки

Разрывная нагрузка, кН									Абсолютное отклонение среднего от значения для образца без ламинации, кН		Темп роста, %	
без ламинирования	толщина клеевой пленки								для толщины клеевой пленки, мм		для толщины клеевой пленки, мм	
	0,4 мм				0,6 мм				0,4	0,6	0,4	0,6
	№ испытания				№ испытания							
	1	2	3	среднее	1	2	3	среднее				
0,350	0,190	0,170	0,180	0,180	0,215	0,220	0,175	0,203	-0,170	-0,147	51,4	58,1
Разрывное удлинение, мм												
20	32	30	32	31,3	35	32	24	30,3	11,3	10,3	156,7	151,7

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии представлен анализ видов нетканых композиционных материалов и способов их получения, на основании которого разработана новая их классификация, учитывающая максимальное многообразие признаков. Осуществленный анализ рынка нетканых материалов показал, что с каждым годом наблюдается динамика роста их выпуска, а анализ видов и свойств отходов, образующихся на предприятиях текстильной и легкой промышленности, выявил резервы их вторичного использования в производстве нетканых композиционных материалов различного назначения. Для практического их применения предложено использовать технологический процесс производства полотен способом термофиксации.

Освещены результаты испытаний и оптимизации технологии изготовления нетканых композиционных материалов с использованием текстильных отходов в производственных условиях ОАО «Акотерм Флакс» г. Ореховск; представлены рекомендации по составу смесей при производстве нетканых материалов с использованием вторичных материальных ресурсов; представлен анализ особенностей и ассортимента утеплителей теплоизоляционных звукопоглощающих ламинированных термоскрепленных, предназначенных для звуковой и тепловой изоляции на рынке строительных материалов, с указанием свойств компонентов, входящих в их состав; определены основные показатели качества нетканых композиционных материалов.

По результатам наработки опытной партии проведены и представлены результаты исследований свойств нетканых полотен для выявления их дальнейшей области применения. С целью улучшения физико-механических свойств нетканых материалов и расширения области их применения предложено использовать технологический процесс их ламинирования. Установлено, что для реализации процесса в производственных условиях ООО «Акотерм Флакс», г. Ореховск на линии нетканых материалов Lap FormAir компании Cormatex необходима модернизация некоторых узлов технологического оборудования, для этого рекомендовано использовать устройство для ламинирования нетканых композиционных материалов. В качестве покрывного слоя предлагается применять нетканый материал – флизелин и фольгу. Представлен вариант оптимизации структурной схемы технологической линии производства нетканых материалов Lap FormAir компании Cormatex на ООО «Акотерм Флакс», г. Ореховск.

Описание технологических процессов производства нетканых композиционных материалов сопровождается теоретическими исследованиями: исследован процесс нанесения клея валичным способом, процессы измельчения отходов, процесс формирования

полотен и др. На базе теоретических исследований получены результаты конструктивных и кинематических параметров клеенамазного узла, которые хорошо согласуются с параметрами устройств для нанесения клея валичным способом, применительно к линии, установленной на предприятии ООО «Акотерм Флакс», г. Ореховск; параметров и режимов оборудования для измельчения и получения нетканых композиционных материалов. Проведены теоретические исследования работы адгезии, поверхностного натяжения и прочности покрытия при процессах склеивания слоев материала. Установлены аналитические зависимости толщины наносимого слоя и объемного расхода как функций плотности, кинематической вязкости, скорости, мощности при производстве ламинированных нетканых материалов.

В результате проведенного анализа свойств полученных материалов выявлена область их дальнейшего применения: в строительстве в качестве тепло- и звукоизоляции жилых и нежилых помещений, подложки под ламинат; в производстве мебели, матрасников; в машиностроении в качестве тепло- и звукоизоляции автомобилей и в производстве автоаксессуаров – автомобильных органайзеров, адаптеров ремня безопасности; в производстве чехлов для автомобилей; в производстве одежды специального назначения для защиты от холода, механических воздействий и др.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Киселев, М. В. Конкурентоспособные композиты для оборонных и гражданских секторов экономики России / М. В. Киселев, Ю. М. Трещалин // Актуальные проблемы социально-экономического развития России. Научно-аналитический журнал. – 2012. – № 4. – С. 31–34.
2. Трещалин, Ю. М. Техничко-экономическая эффективность применения нетканых полотен в производстве полимерных композиционных материалов / М. Ю. Трещалин, М. В. Киселев, Ю. М. Трещалин // Полимерные материалы. Изделия, оборудование, технологии. – 2013. – № 2 (165). – С. 36–37.
3. Мымрин, В. Н. О европейском рынке нетканых материалов / В. Н. Мымрин // Полимерные материалы. – 2017. – № 8. – С. 33–41.
4. Сергеенков, А. П. Новые разработки по совершенствованию и расширению ассортимента нетканых материалов / А. П. Сергеенков // Полимерные материалы. – 2015. – № 8. – С. 26–31.
5. Зими́на, Е. Л. Ресурсосберегающие технологии в швейной промышленности : монография / Е. Л. Зими́на, В. И. Ольшанский ; УО «ВГТУ». – Витебск, 2016. – 91 с.
6. Коган, А. Г. Новое в технике прядильного производства: учебное пособие для студентов спец. «Технология пряжи, тканей, трикотажа и нетканых материалов», «Машины и аппараты легкой, текстильной промышленности и бытового обслуживания» вузов / А. Г. Коган, Д. Б. Рыклин, С. С. Медвецкий ; под ред. А. Г. Когана. – Витебск : УО «ВГТУ», 2005. – 195 с.
7. Производство и методы испытаний нетканых материалов : монография / М. Ю. Трещалин [и др.] ; под ред. М. Ю. Трещалина – Москва : МАТГР : Телер, 2008. – 147 с.
8. Усенко, В. А. О классификации и стандартизации химических волокнистых материалов и терминологии для их обозначения // Химические волокна. – 2000. – № 2. – С. 54–58.
9. Горчакова, В. М. Оборудование для производства нетканых материалов / В. М. Горчакова, А. П. Сергеенков, Т. Е. Волощик. – Ч. I. – Ч. II. – Москва : МГТУ им. А. Н. Косыгина, 2006. – 680 с.
10. Брусанов, М. С. Технологии производства нетканых материалов с использованием ПЭТ / М. С. Брусанов // Полимерные материалы. – 2021. – № 1. – С. 28–34.
11. Композиционные материалы : справочник / В. В. Васильев [и др.] ; под общ. ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. – Москва : Машиностроение, 1990. – 512 с.
12. Ясинская, Н. Н. Композиционные текстильные материалы : монография / Н. Н. Ясинская, В. И. Ольшанский, А. Г. Коган. – Витебск : УО «ВГТУ», 2015. – 298 с.

13. Довгяло, В. А. Композиционные материалы и покрытия на основе дисперсных полимеров. Технологические процессы / В. А. Довгяло, О. Р. Юркевич. – Минск : Навука і тэхніка, 1992. – 256 с.

14. Батаев, А. А. Композиционные материалы: строение, получение, применение / А. А. Батаев, В. А. Батаев. – Новосибирск : НГТУ, – 2002. – 384 с.

15. Промышленность Республики Беларусь. Статистический буклет / Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – Минск, 2021. – 52 с.

16. Калиновская, И. Н. Высокоэффективные технологии получения многослойных текстильных материалов с использованием волокнистых отходов и короткого льняного волокна / И. Н. Калиновская, Е. Л. Кулаженко, Е. В. Чукасова-Ильюшкина // Высокоэффективные технологии как неотъемлемая часть развития современного общества : монография / В. Н. Антонов [и др.]. – Одесса, 2015. – Гл. 7.2. – С. 159–174.

17. Нетканые материалы на основе полимеров, используемые для производства медицинской одежды и белья, стерилизуемой радиационным излучением: виды материалов, технологии производства / Ю. Н. Хакимуллин [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 23. – С. 97–103.

18. Слоистый нетканый материал. Stratifié non tissé-élastomère-non tissé : заявка № 2893036 Франция, МПК D 04 H 13/00 / Aplix S A, Marche Thierry ; заявл. 08.11.2005 ; опубл. 11.05.2007.

19. Нетканый материал, ламинированный материал, изделие из нетканого материала, многокомпонентное волокно, холст и способ изготовления нетканого материала : патент на изобретение RU 2573817 C2, 27.01.2016 / Д. Д. Ньюкирк, Ю. Ф. Рудольф, Х. Хартль ; патентообладатель Фитеза Джермани ГмбХ (DE), ФАЙБЕРВЕБ, ИНК (US). – Заявка № 2013122883/12 от 19.10.2011.

20. Многослойный текстильный материал. Mehrschichtiges textiles Flächengebilde : заявка № 102005049099 Германия, МПК D 04 H 13/00, D 04 H 3/10 / Lindenfarb – Textilveredlung Julius Probst GmbH u. Co. KG, Nickel Axel, Läßle Markus ; заявл. 13.10.2005 ; опубл. 19.04.2007, – 2 с. : ил.

21. Калиновская, И. Н. Производство текстильных настенных покрытий / И. Н. Калиновская, Н. Н. Ясинская // Межвузовская научно-техническая конференция аспирантов и студентов «Молодые ученые – развитию текстильной и легкой промышленности» (ПОИСК-2004) : тезисы докладов / ИГТА. – Иваново, 2004. – С. 56–57.

22. Бершев, Е. Н. Печать ворсом / Е. Н. Бершев, Л. В. Лобова. – Москва : Легпромбытиздат, 1989. – 225 с.

23. Шляхтенко, Г. Ш. Способы и устройства электростатической сепарации и электрофлокирования / Г. Ш. Шляхтенко // Технико-технологические проблемы сервиса. – 2012. – № 1 (19). – С. 59–65.

24. Ворсистый материал и способ его получения. Matériau floqué et procédé d'application de ce matériau sur une pièce : заявка 2880362 Франция, МПК 8 D 04 H 11/00, В 29 С 45/14 / Ind. Tapla S. L., Talavera Barcelo José ; заявл. 17.05.2005 ; опубл. 07.07.2006.

25. Катц, Н. В. Металлизация тканей / Н. В. Катц. – Москва : Легкая индустрия, 1972. – 144 с.

26. Князькин, С. В. Разработка технологии создания текстильных армирующих компонентов композиционных материалов, применяемых в атомной промышленности : автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук спец. 05.19.02 «Технология и первичная обработка текстильных материалов и сырья» / С. В. Князькин ; Московский государственный университет дизайна и технологии. – Москва, 2016. – 18 с.

27. Способ изготовления нетканого текстильного материала, включающий процессы обработки для придания материалу защитных и антистатических свойств : патент на изобретение RU 2560351 С2, 20.08.2015 / Ф. Кляска [и др.]. – Заявка № 2012149807/12 от 18.04.2011. Патентообладатель(и) : ПЕГАС НОНУОВЕНС С.Р.О. (CZ)

28. Многослойный огнезащитный материал : пат. 2305035 Российская Федерация, МПК В 32 В 25/04, В 32 В 27/12 / Е. Л. Смирнова, А. В. Лукашевич, А. В. Шемаков ; заявл. 25.04.2006 ; опубл. 27.08.2007.

29. Зими́на, Е. Л. Технология производства нетканых материалов из текстильных отходов / Е. Л. Зими́на // Инновации в текстильной промышленности : монография / УО «ВГТУ» ; Н. А. Абрамович [и др.] . – Витебск, 2016. – Гл. 8. – С. 142–157.

30. Армированный слоистый материал на основе нетканых материалов. Reinforced stratiform product based on non-woven fabric, particulary for bituminization, and method for producing the product : заявка №1584737 ЕПВ, МПК D 06 N 5/00, D 04 H 13/00 / O. R. V. Ovattificio Resinatura Valpadana S. p. A., Peruzzo Maurizio ; заявл. 08.07.2004 ; опубл. 12.10.2005.

31. Комбинированный текстильный материал. Complexe textile destine a renforcer mecaniquement un revetement d'etanchéité a base de bitume : заявка № 2881443 Франция, МПК 8 D 04 13/00, В 32 В 5/12 / Chomarar Composites SaS, Chabal Claude ; заявл. 28.01.2005 ; опубл. 04.08.2006.

32. Огнестойкий волокнистый материал. Flame-retardant sheet and formed article therefrom : заявка № 1669490 ЕПВ, МПК 7 D 06 М 11/74, D 06 М 11/79 / Nagoya Oilchemical Co., Ltd, Ogawa Masanori, Ito Kuninori, Hirano Morimichi ; заявл. 20.08.2004 ; опубл. 14.06.2006.

33. Способ и машина для получения волокнистого материала. Method and apparatus of producing fibrous aggregate : пат. 1637637 ЕПВ, МПК D 04 Н 3/04 / Japan Vilene Company, Ltd. Amagasa, Masahiro; Kojima, Yukio; Kawabe, Masaaki ; заявл. 16.09.2005 ; опубл. 22.03.2006.

34. Система для изготовления композиционного материала, содержащего натуральные волокна льна и сизали. Procédé et dispositif de fabrication d'un ruban, meche, ficelle, fil ou tissu composit constitue avec des fibres naturelles, notamment du lin, du chanvre, du sisal,..., produits obtenus : заявка №2898140 Франция, МПК D 02 G 3/02 / Dehondt Guy ; заявл. 03.03.2006 ; опубл. 07.09.2007.

35. Пористые полимерные материалы на основе отходов обувных пенополиуретанов / В. Д. Борозна [и др.] // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2019. – № 2 (37). – С. 62–75.

36. Баранова, А. А. Современные технологии в текстильной промышленности : учебное пособие для студ. вузов по специализациям «Экономика и управление на предприятии промышленности», «Производственный менеджмент», «Бухгалтерский учет, анализ и аудит в промышленности» / А. А. Баранова, А. Г. Коган, Ю. И. Аленицкая. – Витебск : УО «ВГТУ», 2003. – 251 с.

37. Капустин, И. И. Резание и режущий инструмент : учебное пособие для вузов / И. И. Капустин. – Москва : Гизлегпром, 1950. – 377 с.

38. Кукин, Г. Н. Текстильное материаловедение (исходные текстильные материалы) : учебник для вузов / Г. Н. Кукин, А. Н. Соловьев. – 2-е изд. перераб. и доп. – Москва : Легпромиздат, 1985. – 216 с.

39. Садыкова, Ф. Х. Текстильное материаловедение и основы текстильного производства : учебник для вузов / Ф. Х. Садыкова. – Москва : Легкая индустрия, 1967. – 364 с.

40. Желиговский, В. А. Экспериментальная теория резания лезвием / В. А. Желиговский. – Москва : ТРМиМЭСХ, 1941. – 27 с.

41. Резник, Н. Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов / Н. Е. Резник. – Москва : Машиностроение, 1975. – 311 с.

42. Капустин, И. И. Машины-автоматы и автоматические линии в швейном и обувном производствах : учебное пособие для вузов / И. И. Капустин, И. И. Галынкер. – Минск : Легкая индустрия, 1966. – 422 с.

43. Майзель, М. М. Автоматика, телемеханика и системы управления производственными процессами : учебное пособие для вузов / М. М. Майзель. – Москва : Высшая школа, 1972. – 463 с.

44. Прошков, А. Ф. Машины для производства химических волокон. Конструкции, расчет и проектирование : учебное пособие для

студентов вузов / А. Ф. Прошков. – Москва : Машиностроение, 1974. – 472 с.

45. Гарбарук, В. Н. Расчет и конструирование трикотажных машин : учебное пособие для вузов текстильной промышленности / В. Н. Гарбарук. – Москва : Машиностроение, 1966. – 524 с.

46. Слываков, В. Е. Теория и практика штапелирования жгутовых химических нитей дифференцированным разрезанием / В. Е. Слываков. – Москва : Легкая индустрия, 1976. – 208 с.

47. Михайлов-Тепляков, В. А. Автоматизированная лазерная резка материалов / В. А. Михайлов-Тепляков, М. П. Богданов. – Москва : Машиностроение, 1976. – 425 с.

48. Соколов, В. Н. Научно-технические основы технологического резания в легкой промышленности : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Спец. 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы» / В. Н. Соколов ; Московский государственный университет дизайна и технологии. – Москва, 2007. – 47 с.

49. Савостицкий, А. В. Технология швейных изделий / А. В. Савостицкий, Е. Х. Меликов, И. А. Куликова. – Москва : Легкая индустрия, 1971. – 598 с.

50. Кулаженко, Е. Л. Исследование процесса резания упругопластичных материалов / Е. Л. Кулаженко // Вестник учреждения образования «Витебский государственный технологический университет». – 2009. – Вып. 16. – С. 57–61.

51. Карасев, Е. И. Развитие производства древесных плит : учебное пособие / Е. И. Карасев. – 2-е изд. – Москва : Изд-во МГУЛ, 2002. – 128 с.

52. Волынский, В. Н. Технология стружечных и волокнистых древесных плит : учебное пособие для вузов / В. Н. Волынский. – Таллин : Дезидерага, 2004. – 192 с.

53. Устройство для непрерывной рубки нити, жгута, ленты и тому подобного исходного материала : пат. 2119895 Россия, МПК С 03 В 37/16, В 23 D 27/00 / Научно-исследовательский центр по проблемам управления ресурсосбережением и отходам. – № 97115841/03 ; заявл. 24.09.1997 ; опубл. 10.10.1998.

54. Устройство для повторяющейся выдачи пучков со случайной ориентацией волокон : пат. 2124482 Россия, МПК С 03 В 37/16 / Аппликатор Систем АБ. – № 9613061/03 ; заявл. 19.11.1993 ; опубл. 16.11.1994.

55. Установка для изготовления рубленой стеклонити : пат. 1585301 Россия, МПК С 03 В 37/16 / С. В. Переплетчиков, К. А. Зверев-Степной. – № 4374944/23-33 ; заявл. 09.02.1990 ; опубл. 15.08.1990.

56. Устройство для поперечной резки резиново-кордной трубчатой заготовки : пат. 881023 Россия, МПК С 03 В 37/16 /

В. Б. Волостнов, А. М. Марамыгин. – № 2542000/23-05 ; заявл. 10.11.1977 ; опубл. 07.04.1981.

57. Гаврилов, К. А. Исследование дисковых фрикционных ножниц и возможности применения их для разрезания штучных тканых изделий : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Спец. 05.02.13 «Машины и агрегаты легкой промышленности» / К. А. Гаврилов ; Ленинградский институт текстильной и легкой промышленности имени С. М. Кирова. – Ленинград, 1974. – 28 с.

58. Глебов, И. Т. Резание древесины / И. Т. Глебов. – Екатеринбург : Уральский государственный лесотехнический университет, 2001. – 151 с.

59. Зими́на, Е. Л. Методика оценки экологического аспекта устойчивого развития предприятия / Е. Л. Зими́на, Д. К. Панкевич, С. М. Горячева // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2019. – № 1 (36). – С. 128–137.

60. Использование отходов текстильной промышленности в производстве строительных композитов / В. Е. Румянцева [и др.] // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2021. – № 6 (396). – С. 21–29.

61. Зими́на, Е. Л. Анализ возможности использования отходов легкой промышленности в производстве материалов строительного назначения / Е. Л. Зими́на // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2016. – Вып. 2 (31). – С. 39–46.

62. Бетонное полотно (ткань), рулонный бетон: технические характеристики, плюсы и минусы (2021) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://1beton.info/vidy/betonnoe-polotno>. – Дата доступа : 14.06.2022.

63. Arikan, H. Fracture behavior of textile glass fiber reinforced polymer concrete according to mixed-mode / H. Arikan, // Journal of Thermoplastic Composite Materials. – V.25. – Is. 6. – 2011. – P. 663–677.

64. Impact sound insulation and viscoelastic properties of underlay manufactured from recycled carpet waste / I. Rushforth [and etc.] // Applied Acoustics. – V. 66. – Is. 6. – 2005. – P. 731–749.

65. Технологии переработки отходов химического волокна коврового производства / Е. Л. Зими́на [и др.] // Химические волокна. – 2019. – Вып. 1. – С. 23–25.

66. Использование базальтовых волокон в битумных мастиках (2021) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.novitsky1.narod.ru/bazalt.html>. – Дата доступа : 14.06.2022.

67. Зими́на, Е. Л. Технологические и теоретические основы получения материалов с использованием текстильных отходов : монография / Е. Л. Зими́на, А. Г. Коган, В. И. Олышанский ; УО «ВГТУ». – Витебск, 2019. – 230 с.

68. Чукасова-Ильющкина, Е. В. Технология многослойных текстильных материалов с использованием коротковолокнистых отходов : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. спец. 05.09.02 «Технология и первичная обработка текстильных материалов и сырья / Е. В. Чукасова-Ильющкина ; Витебский государственный технологический университет. – Витебск, 2008. – 288 с.

69. Карпеня, А. М. Технология нетканых материалов технического назначения с использованием волокнистых отходов: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по спец. 05.19.02 «Технология и первичная обработка текстильных материалов и сырья (технические науки)» / А. М. Карпеня ; УО «ВГТУ» ; науч. рук. А. Г. Коган. – Витебск, 2013. – 233 с.

70. Мурычева, В. В. Технология композиционных текстильных материалов способом импрегнирования : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.19.02 «Технология и первичная обработка текстильных материалов и сырья (технические науки)» / В. В. Мурычева ; УО «ВГТУ» ; науч. рук. А. Г. Коган. – Витебск, 2014. – 214 с.

71. Ясинская, Н. Н. Теоретические и технологические основы формирования комбинированных текстильных материалов : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук спец. 05.19.02 «Технология и первичная обработка текстильных материалов и сырья» / Н. Н. Ясинская ; ФГБОУ ВО «РГУ им. А. Н. Косыгина» ; УО «ВГТУ» ; науч. рук. А. Г. Коган. – Витебск, 2019. – 33 с.

72. Кулаженко, Е. Л. Технология композиционных текстильных материалов механического способа формирования : диссертация ... кандидата технических наук : 05.19.02 : защищена 09.02.10 : утв. 05.05.10 / Е. Л. Кулаженко. – Витебск, 2009. – 234 с.

73. Бабарика, Е. С. Рациональное использование отходов текстильных материалов на предприятиях Республики Беларусь / Е. С. Бабарика, В. Д. Дельцова, Л. И. Трутченко // Тезисы докладов IX научно-технической конференции преподавателей и студентов университета / УО ВГТУ. – Витебск, 2001. – С. 105–106.

74. Ковергович, Е. А. Использование текстильных отходов при производстве многослойных материалов / Е. А. Ковергович, Е. Л. Кулаженко // С наукой в будущее : материалы международной научно-практической конференции высших и средних специальных учебных заведений, Барановичи, 18 мая 2012 г. / УО «Барановичский государственный колледж легкой промышленности им. В. Е. Чернышева». – Барановичи, 2012. – С. 185–188.

75. Кулаженко, Е. Л. Перспективы применения отходов текстильной промышленности / Е. Л. Кулаженко, Н. Н. Ясинская,

А. Г. Коган // Международная научно-техническая конференция «Современные наукоемкие технологии и перспективные материалы текстильной и легкой промышленности» (ПРОГРЕСС-2008) : сборник материалов, 27–30 мая 2008 г. : в 2 ч. / ГОУ «ИГТА». – Иваново, 2008. – Ч. 1. – С. 16–17.

76. Кулаженко, Е. Л. Классификация текстильных отходов и вторичная их переработка / Е. Л. Кулаженко, Т. Г. Кирьякова, Н. Н. Бодяло // Материалы докладов 41 научно-технической конференции преподавателей и студентов университета / УО «ВГТУ». – Витебск, 2008. – С. 135–136.

77. Кулаженко, Е. Л. Основные направления ресурсосбережения на предприятиях швейной промышленности / Е. Л. Кулаженко, Н. В. Ульянова // Межвузовская научно-техническая конференция аспирантов и студентов «Молодые ученые – развитию текстильной и легкой промышленности» (ПОИСК-2011) : сборник материалов, 26–28 апреля 2011 г. : в 2 ч. / ИГТА. – Иваново, 2011. – Ч. 1. – С. 209–210.

78. Зимина, Е. Л. Разработка методов совершенствования складирования, транспортировки и управления отходами на ОАО «Витебские ковры» / Е. Л. Зимина // Внешние и внутренние рынки сбыта товаров и услуг организаций Витебской области : состояние, проблемы и направления расширения на основе логистических технологий : монография / Витебский филиал УО «Международный университет «МИТСО»; Е. И. Бекиш [и др.]. – Витебск : ВГУ имени П. М. Машерова, 2021. – Гл. 11. – С. 125–142.

79. Зимина, Е. Л. Подготовка текстильных отходов при производстве нетканых материалов, полученных способом мокрого прессования / Е. Л. Зимина, А. Г. Коган, В. И. Ольшанский // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2016. – Вып. 31. – С. 47–54.

80. Зимина, Е. Л. Исследование процесса резания текстильных материалов / Е. Л. Зимина, А. Г. Коган // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2017. – № 2 (33). – С. 14–20.

81. Бобров, В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – Москва : Машиностроение, 1975. – 344 с.

82. Трифоненко, Е. Оборудование для измельчения текстильных отходов / Е. Трифоненко, Е. Л. Зимина // Тезисы докладов 50-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов, посвященной Году науки / УО «ВГТУ». – Витебск, 2017. – С. 194.

83. Попок, Н. Н. Теория резания : учебное пособие для студ. машиностроительных спец. / Н. Н. Попок. – Новополоцк : ПГУ, 2006. – 228 с.

84. Дмитриев, С. В. О взаимосвязи энергетических законов дробления Кика-Кирпичева и Риттингера с индексом работы Бонда / С. В. Дмитриев, О. Н. Тихонов // Обогащение руд. – 2004. – № 2. – С. 9–10.

85. Майзель, М. М. Автоматика, телемеханика и системы управления производственными процессами : учебное пособие для вузов / М. М. Майзель. – Москва : Высшая школа, 1972. – 463 с.

86. Слываков, В. Е. Теория и практика штапелирования жгутовых химических нитей дифференцированным разрезанием / В. Е. Слываков. – Москва : Легкая индустрия, 1976. – 208 с.

87. Машиностроение : энциклопедия / ред. совет К. В. Фролов [и др.] . – Москва. – Машиностроение // Машины и агрегаты текстильной и легкой промышленности. – Т. IV – 13 / И. А. Мартынов [и др.] ; под общ. ред. И. А. Мартынова . – 1997. – 608 с.

88. Зимина, Е. Л. Разработка технологии шумоизоляционных материалов с использованием отходов / Е. Л. Зимина, Н. В. Ульянова, О. Д. Ващенко // Химические волокна. – 2020. – № 5. – С. 43–45.

89. Технология производства нетканых материалов : учебник для ВУЗов / Е. Н. Бершев, А. И. Куриленко, П. Смирнов. – Москва : Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 352 с.

90. Федута, А. А. Теоретическая механика и методы математики: учебное пособие / А. А. Федута, А. В. Чигарев, Ю. В. Чигарев. – Минск : Технопринт, 2000. – 504 с.

91. Ражапов О. О. Условия получения равномерной смеси из хлопко-нитронового волокна с минимальной неравномерностью смешивания / О. О. Ражапов, К. Г. Гафуров, Ж. Арабов // Universum: технические науки. – 2020. – № 11 (80). [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/10949>. – Дата доступа : 25.07.2022.

92. Рыклин, Д. Б. Гипотетическая неровнота смешивания волокон в идеальном многокомпонентном продукте / Д. Б. Рыклин // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2006. – № 3 (290). – С. 41–43.

93. Глобин, А. Н. Дозаторы : монография / А. Н. Глобин, И. Н. Краснов. – Зеленоград : ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2012. – 348 с.

94. Химические волокна: основы получения, методы исследования и модифицирование : учебное пособие для студентов вузов по направлению 240100 «Химическая технология и биотехнология», спец. 240201 «Технология и оборудование производства химических волокон и композиционных материалов на их основе» и 280202 «Инженерная защита окружающей среды» / Т. В. Дружинина [и др.] ; под ред. Т. В. Дружининой. – Москва : МГТУ им. А. Н. Косыгина : Совъяз Бево, 2006. – 472 с.

95. Гусев, В. Е. Химические волокна в текстильной промышленности / В. Е. Гусев. – Москва : Легкая индустрия, 1971. – 608 с.

96. Тепловой расчет одежды для защиты от холода в условиях эксплуатации на территории Республики Беларусь / О. В. Ващенко [и др.] // Материалы и технологии. – 2019. – № 1 (3). – С. 36–40.

97. Ольшанский, В. И. Метод определения теплофизических свойств нетканых материалов / В. И. Ольшанский, В. Г. Мульц, Е. Л. Зими́на // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2021. – № 2 (41). – С. 43–50.

98. Карпович, О. И. Формообразование изделий из композиционных материалов. Лабораторный практикум : учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-36 01 08 «Конструирование и производство изделий из композиционных материалов» / О. И. Карпович. – Минск : БГТУ, 2014. – 122 с.

99. Орлов, Г. А. Основы теории прокатки и волочения труб : учебное пособие / Г. А. Орлов. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 204 с.

100. Тимофеев, С. И. Теоретическая механика (динамика) / С. И. Тимофеев, С. С. Савченкова. – Ростов-на-Дону : ФЕНИКС, 2005. – 443 с.

101. Федута, А. А. Теоретическая механика и методы математики : учебное пособие / А. А. Федута, А. В. Чигарев, Ю. В. Чигарев. – Минск : Технопринт, 2000. – 504 с.

102. Кудинов, В. А. Гидравлика : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлениям подготовки (специальностям) в области техники и технологии / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов. – 3-е изд., стер. – Москва : Высшая школа, 2008. – 199 с.

103. Куликовский, В. В. Разработка конкурентоспособных волокнисто-пористых фильтрующих материалов для гражданских секторов экономики : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по спец. 05.19.01 – Материаловедение производства текстильной и легкой промышленности / В. В. Куликовский; УО «КГУ» ; науч. рук. М. В. Киселев. – Кострома, 2021. – 124 с.

104. Горлов, Ю. П. Технология теплоизоляционных и акустических материалов и изделий : учебное пособие. – Москва : Высшая школа, 1989. – 384 с.

105. Процессы и оборудование производства волокнистых и пленочных материалов : учебное пособие / И. Н. Жмыхов [и др.]. – Минск : Высшая школа, 2013. – 592 с.

106. Бондалетова, Л. И. Полимерные композиционные материалы (часть 1) : учебное пособие / Л. И. Бондалетова, В. Г. Бондалетов. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 118 с.

107. Кузьмичев, В. Е. Теория и практика процессов склеивания деталей одежды : учебное пособие для студентов высших учебных заведений / В. Е. Кузьмичев, Н. А. Герасимова. – Москва : Издательский центр «Академия», 2005. – 256 с.

108. Калекин, А. А. Гидравлика и гидравлические машины : учебное пособие / А. А. Калекин. – Москва : Мир, 2005. – 512 с.

109. Применение утеплителей с фольгой: ознакомились с видами утеплителей с фольгой и их названием [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://stroyday.ru/stroitelstvo-doma/stroitelnye-materialy/primenenie-uteplitelej-s-folgoj.html>. – Дата доступа : 22.01.2020.

110. Жуков, А. Д. Технология теплоизоляционных материалов. Ч. 1. Теплоизоляционные материалы. Производство теплоизоляционных материалов : учебное пособие / А. Д. Жуков. – Москва : МГСУ, 2011. – 431 с.

111. Клеи и герметики / Д. А. Кардашов [и др.] ; под ред. Д. А. Кардашова. – Москва : Химия, 1978. – 200 с.

112. Кардашов, Д. А. Полимерные клеи. Создание и применение / Д. А. Кардашов, А. П. Петрова. – Москва : Химия, 1983. – 256 с.

113. Шайдоров, М. А. Клеевые материалы и клеевые соединения при производстве одежды : учебное пособие по курсу «Технология швейных изделий» для студентов спец. «Технология и конструирование швейных изделий» вузов / М. А. Шайдоров. – Витебск : УО «ВГТУ», 2003. – 133 с.

114. Суторшина, Л. М. Модификация полимеров для улучшения качества клеевых прокладочных материалов / Л. М. Суторшина, Г. Е. Собко // Швейная промышленность. – 1996. – № 2. – С. 41–42.

115. Шкуренко, С. И. Низкоплавкие сополиамиды для швейной промышленности / С. И. Шкуренко // Швейная промышленность. – 1993. – № 5. – С. 39.

116. Кулаженко, Е. Л. Нанесение клея валичным способом на поверхность рулонных материалов / Е. Л. Кулаженко, В. И. Ольшанский // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2011. – № 4 (18). – С. 41–44.

117. Кулаженко, Е. Л. Оптимизация клеевого состава при производстве многослойных материалов на тканой основе / Е. Л. Кулаженко // Вестник учреждения образования «Витебский государственный технологический университет». – 2008. – Выпуск 15. – С. 83–86.

118. Казимиренко, В. М. Автомобильный органайзер из отходов швейного производства / В. М. Казимиренко, Н. В. Ульянова, Е. Л. Зими́на // Сборник материалов Межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов «Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы» (ПОИСК-2019). – Иваново, 2019. – № 1 (1). – С. 222–224.

119. Зими́на, Е. Л. Внедрение новых видов нетканых материалов в автомобильной швейной промышленности / Е. Л. Зими́на, Н. В. Улья́нова, А. Г. Коган // Сборник научных трудов «Технологии, дизайн, наука, образование в контексте инклюзии». – Москва, 2018. – С. 200–204.

120. Зими́на, Е. Л. Использование текстильных отходов при изготовлении аксессуаров в автомобиль / Е. Л. Зими́на, Н. В. Улья́нова // Сборник материалов Межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов «Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы» (ПОИСК-2018). – Иваново, 2018. – № 1 (1). – С. 103–104.

121. Милеева, Е. С. Использование нетканых материалов строительного назначения в производстве одежды / Е. С. Милеева, Е. Л. Зими́на, И. Н. Герасимук // Сборник материалов Межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов «Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы» (ПОИСК-2019). – Иваново, 2019. – № 1 (1). – С. 214–216.

122. Ващенко, О. В. Методы обработки специальной одежды с использованием утепляющих прокладок / О. В. Ващенко, С. Н. Мороз, Е. Л. Зими́на // Матеріали V-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу – 2019», випуск 5. – Херсон : ХНТУ, 2019. – С. 74–77.

123. Зими́на, Е. Л. Практическое применение нетканых материалов из текстильных отходов, полученных способом термофиксации / Е. Л. Зими́на, А. Г. Коган, С. М. Горячева // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Научные исследования и разработки в области дизайна и технологий». – Кострома, 2019. – С. 274–277.

124. Использование новых текстильных материалов при изготовлении специальной одежды / Е. В. Панова [и др.] // Международная научно-техническая конференция «Современные технологии и оборудование текстильной промышленности» (ТЕКСТИЛЬ-2011) : тезисы докладов, 29–30 ноября 2011 г. / ФГБОУ ВПО «МГТУ им. А. Н. Косыгина». – Москва, 2011. – С. 96–97.

125. Макеева, И. В. Ресурсосберегающие технологии изготовления специальной одежды / И. В. Макеева, Е. В. Панова, Е. Л. Кулаженко // Международная научно-техническая конференция «Современные технологии и оборудование текстильной промышленности» (ТЕКСТИЛЬ-2011) : тезисы докладов, 29–30 ноября 2011 г. / ФГБОУ ВПО «МГТУ им. А. Н. Косыгина». – Москва, 2011. – С. 76.

126. Герасимук, И. Н. Исследование показателей качества клеевого соединения слоев материалов в пакет / И. Н. Герасимук, Е. Л. Лукьянова, Н. В. Улья́нова // Материалы и технологии. – 2022. – № 1 (9). – С. 19–23.

Научное издание

Лукьянова Елена Леонидовна

**КОМПОЗИЦИОННЫЕ НЕТКАНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ИЗ
ВТОРИЧНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ ОТХОДОВ**

Монография

Редактор *Т.А. Осипова*
Корректор *Т.А. Осипова*
Компьютерная верстка *Н.В. Карпова*

Подписано к печати 27.01.2023. Формат 60x90 ¹/₁₆. Усл. печ. листов 11,8.
Уч.-изд. листов 14,9. Тираж 100 экз. Заказ № 45.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»

210038, г. Витебск, Московский пр-т, 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования

«Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.

Е. Л. Лукьянова

**КОМПОЗИЦИОННЫЕ
НЕТКАНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ИЗ
ВТОРИЧНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ
ОТХОДОВ**

Монография

Витебск
2023