

*На правах рукописи*



**Орлов Александр Валерьевич**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТРЕПАНИЯ ЛЬНА  
БАРАБАНАМИ С ВИНТОВЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ БИЛ**

05.19.02 – Технология и первичная обработка текстильных материалов и сырья

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иваново – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования **«Костромской государственный университет» (ФГБОУ ВО «КГУ»)** на кафедре механических технологий волокнистых материалов технологического факультета.

Научный руководитель:

**Пашин Евгений Львович**,  
Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механических технологий волокнистых материалов ФГБОУ ВО «Костромской государственный университет».

Официальные оппоненты:

**Севостьянов Пётр Алексеевич**,  
Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления ФГБОУ ВО «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)».

**Жукова Светлана Владимировна**  
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры ремонта машин и технологии металлов ФГБОУ ВО «Костромская государственная сельскохозяйственная академия».

Ведущая организация:

**ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт механизации льноводства» (ВНИИМЛ)**, г. Тверь.

Защита состоится 13 апреля 2017 года в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.355.02 на базе ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: 153000, г. Иваново, Шереметевский пр., 21, ауд. У-109.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО "Ивановский государственный политехнический университет": [www.ivgpu.com](http://www.ivgpu.com)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.355.02,  
д.т.н., профессор



Е.Н. Никифорова

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследовательской темы.** В последнее время в Российской Федерации наблюдаются сокращения объёмов выработки льняного волокна. Во многом это связано с уменьшением посевных площадей под льном-долгунцом. Причиной тому – снижение уровня государственной поддержки сельхозпроизводителей. В такой ситуации для стабилизации объёмов выработки наиболее ценного трепаного волокна, особенно в условиях импортозамещения, требуется увеличение его выхода на льнозаводах. Одним из направлений решения этой задачи является совершенствование машинной технологии переработки льна, в частности, процесса трепания с использованием существующей на предприятиях техники.

В условиях повсеместного использования стланцевой льнотресты и рулонной технологии её уборки упомянутое совершенствование должно осуществляться с учетом свойств сырья. Прежде всего, это касается повышенного варьирования длины стеблей и их степени вылежки. При этом следует учитывать, что применяемые на льнозаводах мяльно-трепальные агрегаты (МТА) были созданы применительно к переработке более однородной моченцовой тресты. Однако при переработке стланцевой тресты выявились недостатки используемой на практике техники. Из этого вытекает необходимость совершенствования конструкций МТА и режимов их работы для повышения выхода длинного стланцевого волокна с требуемым качеством.

В настоящее время актуальность работ в этом направлении возросла в связи с необходимостью обеспечения льнокомбинатов сырьём. Это подтверждается поручением Президента РФ от 20 января 2016 года № ПР-79 в адрес Председателя Правительства РФ о необходимости обеспечения текстильной промышленности отечественным сырьём. В частности, в нем указано требование по ежегодному наращиванию объёмов производства отечественного льна и льноволокна. Необходимость этого согласуется с планами развития производства льна, предусмотренных Государственной программой развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013–2020 гг. (утверждена Правительством РФ, постановление № 717 от 14 июля 2012 г.).

### **Степень научной разработанности темы.**

В настоящее время на практике при получении трепаного льняного волокна применяются машины, содержащие конструкции трепальных барабанов с винтообразным расположением бил и конусной формой входной части. Однако анализ результатов исследовательских работ, связанных с изучением процесса трепания, выявил недостаточное обоснование параметров их рабочих органов. Известны лишь некоторые исследования, связанные с оценкой влияния отдельных элементов конструкций на изменение условий трепания.

Между тем, известно, что основная доля волокнистых отходов при трепании формируется при прохождении материалом входной конусной части барабанов, что не в полной мере объясняется известными результатами исследований. Также дополнительного изучения требует задача по оценке влияния на технологический эффект повышенного варьирования исходного льняного сырья. Обзор литературных источников не выявил работ, связанных с этой проблемой.

Общепризнанные итоги исследовательских работ базируются на допущении о малой значимости перемещения прядей в плоскости, параллельной осям барабанов, что не позволяет учесть влияние винтообразной формы бил.

**Цель и задачи исследования.** Целью исследования является повышение выхода трепаного волокна на основе совершенствования процесса трепания льна и параметров машины для его реализации.

Для достижения обозначенной цели решены следующие задачи исследования:

- обоснованы возможные направления исследований по совершенствованию процесса трепания льна с применением существующих на практике МТА;
- развиты теоретические положения процесса трепания льняного сырца барабанами с наличием конусной части в начале их длины и с винтовым расположением бил;
- проведено исследование параметров процесса и конструкции барабанов при обработке стланцевого льна с характерными для него свойствами;
- обоснованы условия, обеспечивающие улучшение процесса трепания;
- проведена экспериментальная проверка основных теоретических выводов и разработать новые технические решения для улучшения процесса трепания;
- оценена технологическая и экономическая эффективность новых решений для улучшения конструкции трепальных барабанов.

**Научная новизна работы** заключается в разработке моделей процесса перемещения участков прядей сырца при их обработке в трепальной машине барабанами с винтовым расположением бил и наличием конусного участка, обеспечивших выявление ранее не известных угловых смещений пряди в продольной плоскости зоны трепания, расчет их конечных величин в условиях изменения длины волокон, параметров процесса и бил, а также обоснование направлений совершенствования конструкции трепальных барабанов.

В диссертационной работе впервые:

- получена модель перемещения свободного концевой участка пряди в вертикальной продольной плоскости активной зоны обработки при его перемещении с одного барабана на другой, с использованием которой выявлено возникновение углового смещения (угла свала) участка в плоскости, параллельной оси вращения барабанов. Величина этого смещения зависит от угла конуса барабана, угла подъёма винтовой линии била, ускорения конца свободного участка пряди при его перемещении вдоль била в момент схода, длины и массы пряди;
- разработаны модели для расчета угловых смещений в продольной плоскости поля трепания участков пряди по её длине, предшествующих свободному концевому участку и определяющих величину конечного углового свала;
- выявлены причины образования перекрещивания разнодлинных прядей в процессе трепания, ухудшающие выход длинного наиболее ценного волокна;
- предложена методика экспериментальной оценки угловых смещений пряди при расположении их свободных участков на подбильной решётке.

**Теоретическая значимость работы** состоит в развитии недостаточно проработанных положений теории процесса трепания льна, в частности, особенностей взаимодействия пряди с билами применяемых на практике винтообразных трепальных барабанов в их входной зоне, имеющей форму конуса. Впервые созданы математические модели, описывающие движение обрабатываемых прядей различной длины не только в поперечном, но и в продольном сечениях активной зоны обработки, что позволило обнаружить и исследовать негативные эффекты, способствующие возрастанию волокнистых потерь, а также предложить рекомендации по их предотвращению.

**Практическая ценность полученных в работе результатов** состоит в разработке практических рекомендаций по совершенствованию применяемых в настоящее время на практике конструкций барабанов с винтовым расположением бил путем установки на них параллелизирующих решёток. Они приняты для использования Ивановским механическим заводом им. Г.К. Королева для модернизации конструкции существующей трепальной машины мяльно-трепального агрегата МТА-2Л. Учитывая простоту конструкции решёток, их изготовление и монтаж возможно осуществлять непосредственно силами льнозавода.

Установлено, что применение предложенного решения приводит к увеличению на 1% (абс.) выхода длинного волокна при переработке льняной тресты с повышенной неоднородностью по длине без ухудшения массовой доли в нём костры. Это может обеспечить годовой экономический эффект в виде формирования годовой прибыли на льнозаводе в расчете 0,23 тыс. рублей на одну тонну тресты при условии её среднего номера 0,75.

Определённую практическую ценность представляет требующее дальнейшего совершенствования техническое решение по применению входной горки с установленными на неё упругими элементами для снижения пиковых натяжений в прядях.

Полученные результаты используются в учебном процессе КГТУ при подготовке инженеров, бакалавров, магистров в рамках дисциплин «Технология и оборудование производства натуральных волокон» и «Проектирование текстильных машин». Это относится к использованию созданного модернизированного экспериментального стенда для трепания льняного сырца барабанами с винтовым расположением бил и наличием конусной части.

**Методы исследования.** Методологической основой исследования являются работы отечественных и зарубежных ученых в области первичной переработки льняного волокна.

При проведении теоретических исследований использовались методы теоретической механики, дифференциального и интегрального исчисления. Модели отдельных явлений и процессов реализованы с применением математического пакета MathCAD.

В экспериментальных исследованиях использовались методы планирования эксперимента, тензометрии и скоростной видеосъемки, а также впервые предложенный оригинальный метод эксперимента, основанный на фиксации формы свободного участка пряди. Обработка результатов экспериментов проводилась с использованием алгоритмов математической статистики, реализованных в пакете прикладных программ STATISTICA.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

- доказательства нового явления углового смещения прядей льносырца в продольной плоскости поля трепания и причины образования перекрещивания неоднородных прядей, ухудшающие выход длинного наиболее ценного волокна;
- дифференциальное уравнение, описывающее движение пряди в продольной плоскости свободного участка пряди
- методики расчета величины конечного углового смещения пряди разной длины и массы в продольной плоскости поля трепания и в разных зонах по его высоте;
- модернизированный лабораторный станок, имитирующий процесс трепания барабанами с винтовым расположением бил и наличием конусного участка, а также методика экспериментального определения положения участка пряди в поле трепания и подбильной решётке;
- новые рабочие органы трепального барабана для исключения перекрещивания прядей разной длины на начальных этапах процесса трепания.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность результатов исследований, выводов и рекомендаций обеспечена корректным применением законов механики и аэродинамики, и подтверждается сходством результатов моделирования с общепринятыми представлениями и современными результатами в области изучения процесса трепания льна, а также итогами наблюдений и экспериментальных исследований с применением положений математической статистики.

Основные результаты диссертационной работы были доложены и получили одобрение: на международной научно-технической конференции «Лен-2012» (г. Кострома, КГТУ, 2012); на международной научно-технической конференции «Текстиль-2012» (г. Москва, ФГБОУ ВПО «МГТУ им. А.Н. Косыгина», 2012); на международной научно-технической конференции «Прогресс-2013» (г. Иваново, ИВГПУ, 2013); на международной научно-практической конференции «Инновационные разработки для производства и пере-

работки лубяных культур» (г. Тверь, ВНИИМЛ, 2016); на межвузовской научно-технической конференции молодых ученых и студентов «Студенты и молодые ученые КГТУ – производству» (г. Кострома, КГТУ, 2014, 2016); на международной научно-технической конференции «Лен-2014» и «Лен-2016» (г. Кострома, КГТУ, 2014, 2016); на Всероссийском семинаре по теории машин и механизмов (г. Кострома, КГТУ, 2014, 2016 г.); на Всероссийском семинаре по научным проблемам агропромышленной переработки лубо-волоконистых материалов (г. Кострома, КГТУ, 2014 г.); на расширенных заседаниях кафедры технологии производства льняного волокна КГТУ (г. Кострома, КГТУ, 2013, 2014, 2015); на Общероссийском научном семинаре «Технология текстильных материалов» (г. Кострома, КГТУ, 2016 г.); на расширенном заседании кафедры механических технологий волоконистых материалов (г. Кострома, КГТУ, 2015, 2016 г.); на расширенном заседании кафедры технологии и проектирования текстильных изделий ИГПУ (г. Иваново, ИГПУ, 2016 г.).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 19 работ, в том числе 5 статей в журналах, входящих в «Перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий, рекомендованных ВАК», 7 в научно-технических журналах, 6 тезисов докладов, одна монография (в соавторстве). Техническая новизна решений, соавтором которых является соискатель, защищена 2 патентами РФ на полезные модели.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из четырех глав, изложена на 138 страницах машинописного текста, содержит 75 рисунков, 10 таблиц, список литературных источников из 90 наименований, а также имеет выводы и приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы ее цель и задачи, представлена общая характеристика работы, включающая описание использованных теоретических и экспериментальных методов исследований, формулировку новых научных результатов и их научной новизны, практической значимости, достоверности и обоснованности выводов, полученных в результате диссертационного исследования.

**В первой главе** представлены результаты аналитического анализа разработок и опубликованных источников по изучению процесса трепания льна.

Установлено, что изучением процесса трепания льна начали активно заниматься с начала прошлого столетия. Одновременно с этим происходило совершенствование техники для реализации этого процесса на основе эмпирических знаний.

Теоретические основы процесса трепания льна сформированы благодаря исследованиям А.А. Разуваева, А.Б. Кузьминского, Н.А. Неронова, Н.Н. Сулова, В.И. Савиновского, Г.К. Кузнецова, А.М. Ипатова, И.Н. Левитского, А.Б. Лапшина, В.А. Дьячкова, С.Н. Разина, С.В. Бойко, Е.Л. Пашина, В.В. Коновалова и др.

Отмечены особенности переработки современного льняного сырья, получаемого вследствие использования интенсивных механизированных процессов уборки льна-долгунца. Из-за повышенной неоднородности стеблей по длине и степени вылежки стланцевой тресты, а также в условиях недостаточной подсушки стеблей из-за высокой стоимости энергоресурсов в условиях льнозаводов, применение существующих МТА не обеспечивает требуемых условий переработки. В условиях дефицита финансовых ресурсов одним из направлений повышения эффективности процесса переработки льна является модернизация существующих техники и процессов – в частности, трепания. На этой основе было установлено, что процесс трепания льна с использованием существующих на практике машин с барабанами с винтовым расположением бил требует дополнительного изучения. Анализ работ В.И. Савиновского, А.Б. Лапшина, А.Г. Гришина, С.В. Бойко, С.Н. Разина, А.М. Ипатова, Е.Л. Пашина, М.С. Енина и др. выявил необходимость более полного обоснования влияния

на особенности поведения пряжи при трепании углов конуса и винтового расположения бил барабанов и, особенно, в связи с обработкой стеблей разной длины. Была констатирована необходимость рассмотрения состояний участков пряжи по зонам её длины от линии зажима: зона 1 – до начальной точки соприкосновения с бильной планкой; зона 2 – между точками контакта с бильными планками; зона 3 – концевой свободный участок.

В заключительной части главы сформулированы направления диссертационного исследования. Это касается разработки теоретических положений, обеспечивающих моделирование поведения пряжи в процессе трепания, алгоритмов расчета параметров процесса её перемещения и взаимодействия с билами барабанов с наличием конуса и винтовым расположением бил, а также разработка и проверка новых технических решений для модернизации существующей трепальной машины с целью повышения выхода длинного волокна.

**Во второй главе** на основе предложенного позонного рассмотрения расположения и поведения участков пряжи по её длине в поле трепания изучены её участки до начала свободного участка, перемещающегося с одного била к другому. При наличии бил с винтовым расположением и конуса во входной части барабана с учетом результатов исследования процесса одностороннего трепания М.С. Енина высказана гипотеза о возникновении сгуживания пряжей в слое посредством формирования угла сгуживания  $\psi_1$  (рис. 1). При его определении полагали, что участок пряжи от точки зажима до точки удара билом прямолинейный, воздействие сил сопротивления воздушных потоков отсутствует, толщина пряжи и ширина бильной планки не учитываются. На основании допущения о том, что при трепании прядь стремится занять положение, перпендикулярное кромке бильной планки (винтовой линии), определено положение участка пряжи (её точки зажима и точки взаимодействия с кромкой била) в условиях одновременного перемещения точки зажима пряжи и поворота била. Для этих условий получено выражение угла сгуживания:

$\psi_1 = \varepsilon \pm \Delta\psi_1$ , где  $\Delta\psi_1 = \frac{\pi}{2} - \arccos\left(\frac{k_{mp} \cdot F_N}{F_T}\right)$ . В них  $\varepsilon$  – угол сгуживания без учёта воздействия

сил трения и натяжения;  $\Delta\psi_1$  – поправка на силу трения;  $k_{mp}$  – коэффициент трения пряжи по кромке била;  $F_N$  – величина силы нормального давления била на прядь;  $F_T$  – величина силы натяжения пряжи в зажиме. Определение упомянутых сил осуществляли на основе зависимостей, предложенных А.Б. Лапшиным.

Из анализа полученного выражения следует существенное влияние на угол сгуживания угла винта  $\gamma$  и угла конуса  $\alpha$ . Значения этих углов будут влиять на расположение последующих по высоте поля трепания (ниже лежащих) участков прядей.

Поэтому дальнейшей задачей явилась оценка угла наклона прядей, одновременно соприкасающихся с соседними кромками бил, следующими ниже линии зажима.

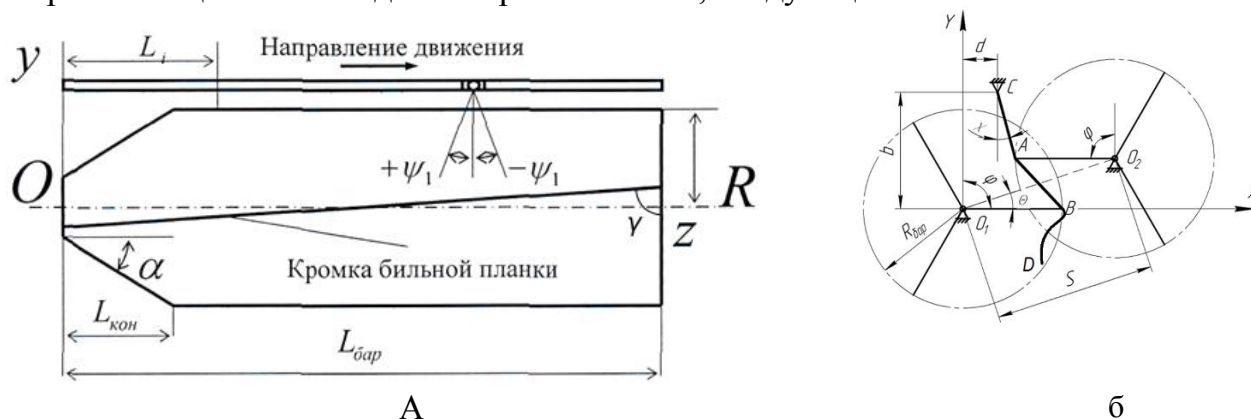


Рис. 1. Геометрические параметры барабана (а) и расположение участков пряжи в поле трепания (б)

Для участка АВ угол наклона составит:  $\psi_{\Gamma 2} = \arctg\left(\frac{Z_{Bk} - Z_{Aj}}{Y_{Aj} - Y_{Bk}}\right)$ . По аналогии с расчётом угла сгруживания участка АС, определение поправки от наличия трения, связанного с натяжением пряди, осуществляем согласно:  $\Delta\psi_2 = \frac{\pi}{2} - \arccos\left(\frac{kN_2(Z_3)}{T_2(Z_3)}\right)$ . Отсюда итоговое значение угла наклона равно:  $\psi_2 = \psi_{\Gamma 2} + \Delta\psi_2$ .

Используя полученные зависимости, был разработан метод расчета угла сгруживания для участка АС, который позволил констатировать определённую связь с частотой вращения барабана и углом поворота бил, но самое важное – статистически доказуемую зависимость от значения углов  $\gamma$  и  $\alpha$  (рис. 2).

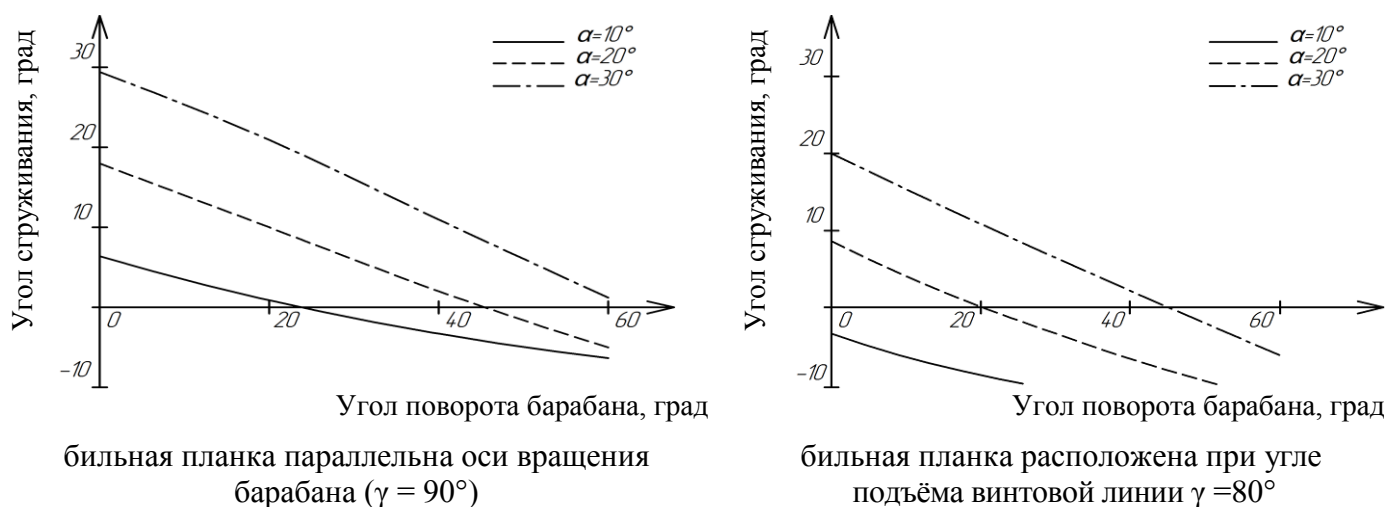


Рис. 2. Изменение угла сгруживания при вращении барабанов для различных углов конуса и подъема винтовой линии

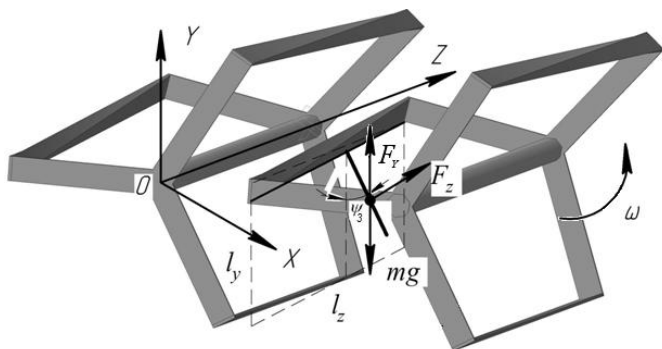


Рис. 3. Силы, способствующие угловому смещению свободного участка пряди  $\psi_3$  вращения барабанов. Сделан вывод, что при винтовом расположении бил к моменту потери контакта била с прядью она, вероятно, совершает вращательное движение относительно второй (расположенной выше в зоне обработки) точки контакта. Таким образом, формируется движение в плоскости, расположенной вдоль оси вращения барабанов. Изучение особенностей этого ранее неизвестного движения представляет интерес в части его влияния на поведение последующих за ним участков пряди.

В третьей главе исследовано поведение свободного участка при его перемещении от била одного барабана к другому. Рассмотрена система сил, приводящих к его движению (рис. 3). Начальный угол отклонения пряди  $\psi_3$  и скорость его изменения  $\dot{\psi}_3$ , следует определять с учетом того, что начиная с момента потери контакта с кромкой била

Установлено, что в процессе взаимодействия била с прядью угол сгруживания меняется. Величина угла сгруживания может достигать значительных величин, что определяется координатой расположения пряди от начала длины поля трепания, длиной прядей и сочетания угла подъема винтовой линии била  $\gamma$  и угла конуса  $\alpha$ . Выявлена изменчивость угла сгруживания по мере



$t_0 = \frac{\varphi_{L\max}}{\omega}$  и в течение времени  $\Delta t = \frac{\varphi_{2\min} - \varphi_{1L\max}}{\omega}$  прядь не будет контактировать с каким-либо билом. Высказано предположение, что в этот период прядь будет сохранять свою угловую скорость. После вхождения в контакт с очередным билом свободный участок пряди, подобно маятнику с изменяющейся длиной подвеса, будет смещаться в плоскости, параллельной оси барабана, образуя угол  $\psi_3$  (угол свала). При таких условиях, воспользовавшись теоремой об изменении кинетического момента и без учёта сопротивления воздуха, было получено нелинейное дифференциальное уравнение, описывающее процесс свала пряди:

$$\ddot{\psi}_3(t) + \frac{3\dot{\psi}_3(t)\dot{l}_{yz}(t)}{l_{yz}(t)} + \frac{3}{2l_{yz}(t)} \cdot \sqrt{(g + a_{uy'}(t))^2 + a_z(t)^2} \cdot \sin\left(\psi_3(t) - \arctan\left(\frac{a_z(t)}{g + a_{uy'}(t)}\right)\right) = 0,$$

где  $l_{yz}$  – длина проекции свободного участка пряди на плоскость YZ,  $g$  – ускорение свободного падения,  $a_{uy'}$  – ускорение, испытываемое точкой контакта пряди с кромкой в связи с вращательным движением барабана,  $a_z$  – ускорение, испытываемое точкой контакта пряди с кромкой в связи со сгуживанием вышележащего участка.

Решение этого уравнения, представленное графически на рисунке 4, выявило некорректность получаемых результатов. Из расчетов вытекало, что все пряди в момент прекращения перемещения должны располагаться вдоль бильной планки. Поэтому из анализа было исключено допущение об отсутствии влияния на процесс перемещения пряди воздушных масс, что согласуется с мнением А.Б. Кузьминского.

Используя методику анализа С.Н. Разина, было получено уточнённое дифференциальное уравнение, описывающее процесс формирования угла свала:

$$\ddot{\psi}_3(t) + \frac{3\dot{\psi}_3(t)\dot{l}_{yz}(t)}{l_{yz}(t)} + \text{sign}(\dot{\psi}_3(t)) \cdot \frac{3\rho}{8\mu} \cdot c_x \cdot d \cdot l_{yz}(t) \cdot \dot{\psi}_3(t)^2 + \frac{3}{2l_{yz}(t)} \cdot \sqrt{(g + a_{uy'}(t))^2 + a_z(t)^2} \cdot \sin\left(\psi_3(t) - \text{arctg}\left(\frac{a_z(t)}{g + a_{uy'}(t)}\right)\right) = 0 \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха;  $c_x$  – коэффициент лобового сопротивления;  $d$  – характерный размер сечения элемента слоя.

Результаты расчётов с использованием уточнённого уравнения движения существенно отличались от тех, которые были получены на основе модели, не учитывающей сопротивления воздуха (рис. 5). Максимальный угол свала достигал 20...25 град.

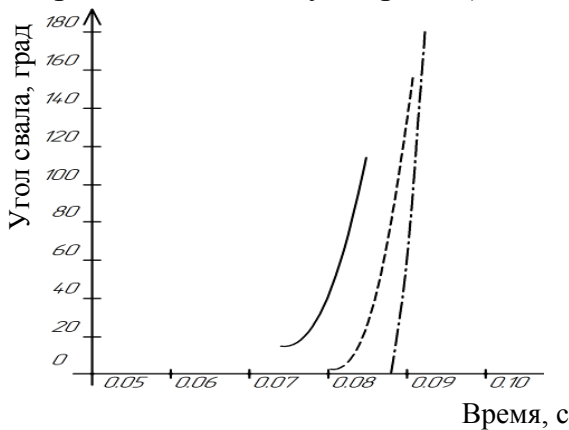


Рис. 4. Изменение угла свала по времени для разных углов конуса ( $\gamma = 84^\circ$ ,  $n_0 = 200 \text{ мин}^{-1}$  и  $l_n = 30 \text{ см}$ )

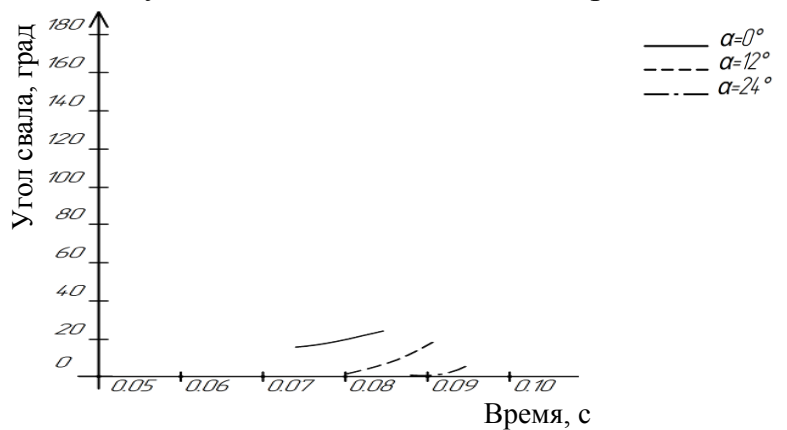


Рис. 5. Изменение угла свала по времени с учётом влияния воздушной среды для разных углов конуса ( $\gamma = 84^\circ$ ,  $n_0 = 200 \text{ мин}^{-1}$ ,  $l_n = 30 \text{ см}$ )

Было проведено исследование параметров процесса формирования свала с использованием уточнённой модели его движения. Установлена доля влияния на величину угла свала основных параметров процесса, конструкции барабана и сырья. Оказалось, что наибольшее влияние на формирование свала оказывают угол подъёма винтовой линии била, скорость движения транспортера и радиус трепального барабана. Установлено также влияние длины прядей.

Для проверки соответствия результатов теоретического анализа с реальным поведением пряди в поле трепания были изготовлены экспериментальные барабаны с винтовым расположением бил и наличием конусной части. Используя скоростную видеосъёмку и впервые предложенную нами оригинальную методику фиксации расположения прядей на подбильной решётке в момент окончательного свала, были выявлены определённые особенности фактического смещения свободных участков. Получив подтверждение наличия предсказанного теорией углового смещения, был констатирован факт, что в конечном итоге прядь располагается на подбильной решётке не прямолинейно.

Для исследования причин этого использовали алгоритмы расчёта перемещения пряди в поле трепания, предложенные С.В. Бойко. Согласно им прядь соприкасается с подбильной решёткой не одновременно всей длиной, а вначале выпуклой зоной, расположенной примерно в средней части длины свободного участка. При таких условиях предложено процесс свала рассматривать в два этапа: до момента соприкосновения с решёткой (*первичный свал*  $\psi_3$ ) и после (*вторичный свал*  $\psi_4$ ). В итоге, располагаясь на решётке, у пряди формируется *итоговый* первичный и вторичный свал.

Применительно ко второму этапу было получено уравнение, позволяющее описать движение концевой части пряди:

$$\ddot{\psi}_4(t) + \frac{6\dot{\psi}_4(t) \cdot \dot{l}_{yz}(t)}{l_{yz}(t)} + \text{sign}(\dot{\psi}_4(t)) \cdot \frac{3\rho}{8\mu} \cdot c_x d \cdot \frac{1}{2} l_{yz}(t) \cdot \dot{\psi}_4(t)^2 + \frac{3}{l_{yz}(t)} \cdot \sqrt{(g + a_y(t))^2 + a_z(t)^2} \cdot \sin\left(\psi_4(t) - \arctg\left(\frac{a_z(t)}{g + a_y(t)}\right)\right) = 0 \quad (2)$$

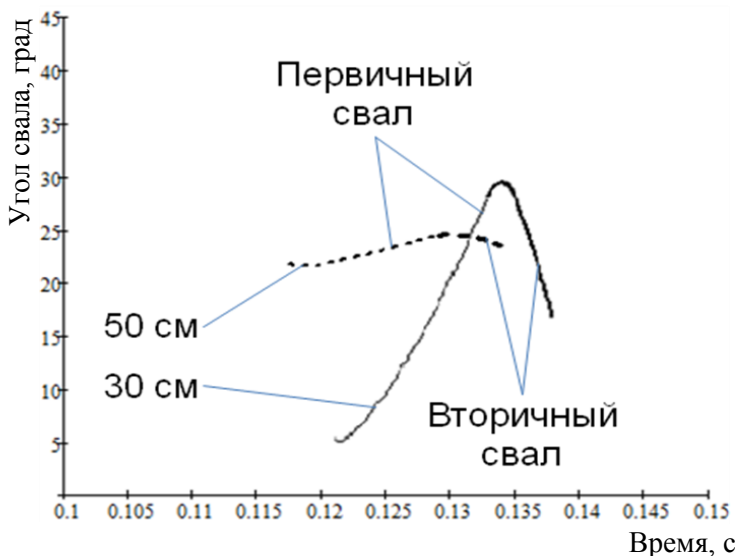


Рис. 6. График изменения угла свала пряди по времени ( $\gamma = 78^\circ$ ,  $\alpha = 12^\circ$ ,  $l_n = 30$  см,  $n_0 = 150$  мин<sup>-1</sup>)

Используя зависимости формирования первичного свала (1) и вторичного свала (2), оказалось возможным провести оценку характера изменения угла свала свободного участка пряди к моменту его полного соприкосновения с подбильной решёткой (рис. 6). Полученные теоретические результаты на качественном уровне стали совпадать с экспериментальными.

На заключительных этапах теоретического анализа было проведено исследование влияния параметров полученных моделей перемещения свободного участка пряди в поле трепания. Изучили зависимость итогового угла свала от режимно-конструктивных параметров и длины пряди (рис. 7).

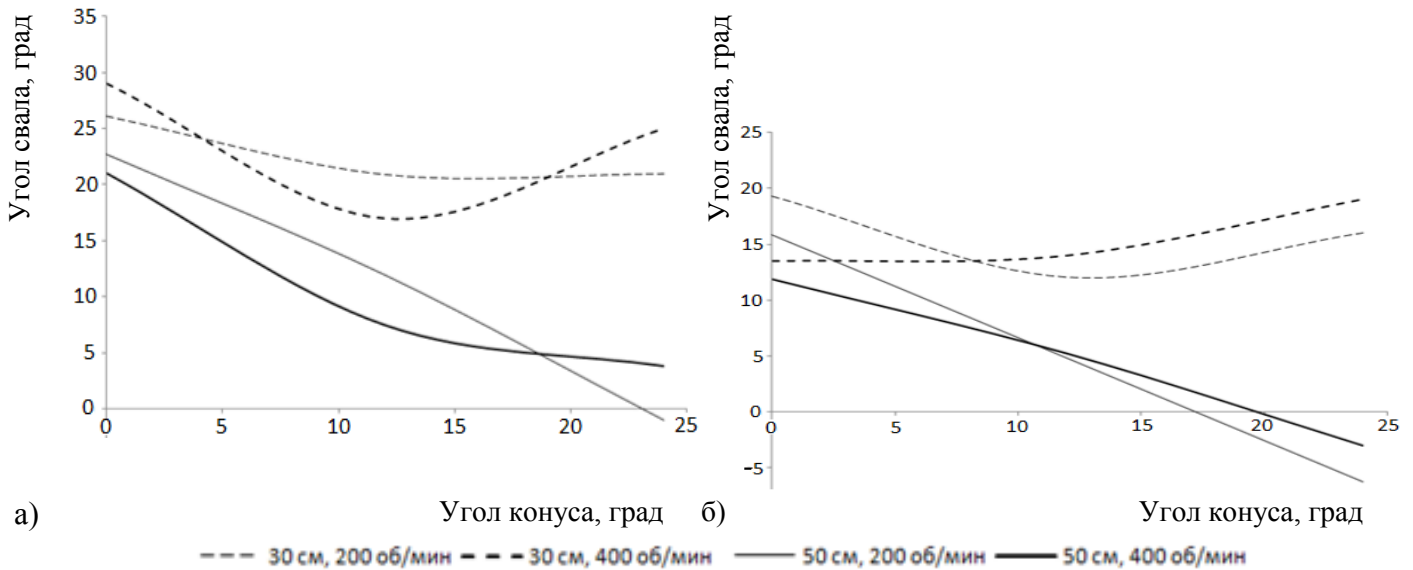


Рис. 7. Изменение величины итогового угла вторичного свала  $\psi_4$  в зависимости от угла конуса барабана  $\alpha$  для угла подъема винтовой линии  $\gamma 78^\circ$  (а) и  $84^\circ$  (б), а также для различных длин обрабатываемого участка пряжи и скоростей вращения барабанов

Важнейшим итогом оказалось, что при использовании винтовых бил и при наличии конуса при трепании в условиях изменения частоты вращения барабанов у пряжей разной длины формируются различия по углам их свала на подбильную решетку, образуя перекрещивания пряжей. Это, по заключению А.Б. Лапшина, может приводить к перераспределению сил натяжения в прядях и повышению их обрывности. Была проведена оценка влияния длины и массы пряжи на возникающие углы перекрещивания (рис. 8). Констатировано доминирующее влияние длины, различия которой до 20 см могут вызывать формирование угла перекрещивания 10...15 град.

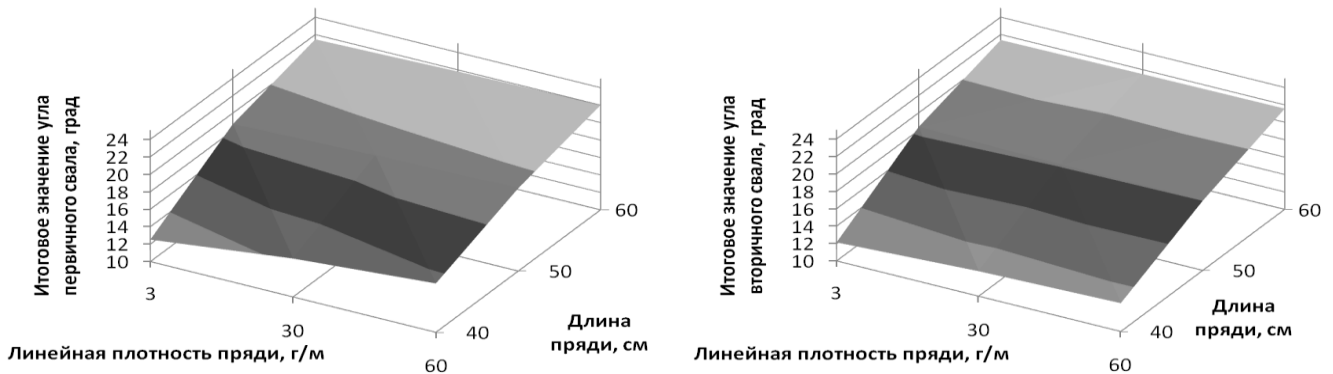


Рис. 8. Зависимость итоговых углов свала от параметров пряжи

Из этого вытекает необходимость разработки рекомендаций (технических решений) для улучшения конструкции трепальных барабанов с использованием их входной конической части и винтового расположения бил, что должно обеспечить снижение углов перекрещивания пряжей разной длины.

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований, подтверждающих основные теоретические выводы, результаты проверки технологической и экономической эффективности новых технических решений для повышения эффективности процесса трепания льна барабанами с винтовым расположением бил. Указаны рекомендации по их использованию на практике.

Для проведения опытов был модернизирован существующий экспериментальный трепальный станок путем разработки и изготовления барабанов с винтовым расположением бил и наличием конусного участка. С использованием скоростной фотофиксации подтверждено возникновение угловых смещений свободных участков прядей в момент их соприкосновения с подбильной решёткой. Исследованы распределения величин указанных смещений. Оказалось, что они подвержены варьированию, причиной которого являются случайные изменения скорости и направления воздушных потоков, входящих в зону трепания от торцов барабанов и детально исследованных Н.Н. Суловым. Влияние этих потоков и сложность их учета при моделировании формирования улов свала привели к выводу о возможности подтверждения образования таких углов только на качественном уровне. Эксперименты показали, что при разности длин прядей в 20 см в условиях трепания при частоте вращения барабанов 300 об/мин формируются углы перекрещивания  $\approx 15$  град, что согласуется с результатами расчетов по моделям (1) и (2).

Важнейшей составляющей четвертой главы явились результаты по обоснованию технических решений по улучшению конструкции трепального барабана с целью ликвидации последствий от перекрещивания прядей.

На начальных этапах было предложено использовать эффект амортизации обрабатываемых прядей при вводе в зону трепания путем их перемещения по упругим элементам конструкции (рис. 9). С помощью метода тензометрии было доказано, что использование упругих элементов снижает пиковые значения натяжения прядей. Однако такое

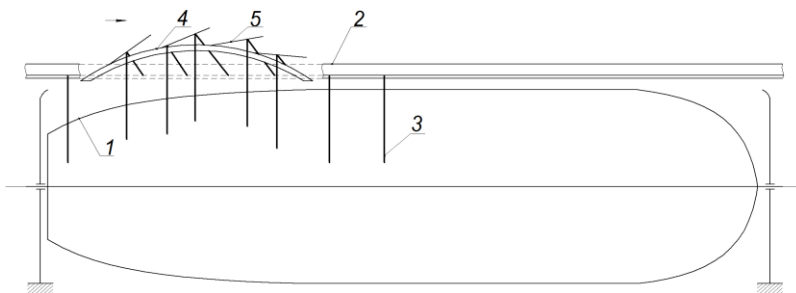


Рис. 9. Схема входной горки с упругими элементами  
1 – трепальный барабан, 2 – зажимной транспортер,  
3 – пряди сырца, 4 – основание горки,  
5 – упругие элементы

решение оказалось неприемлемым, поскольку условия снижения пиковой величины натяжения прядей зависят от длины прядей и жесткости, что требует создания специальной системы непрерывного контроля сырья и системы управления степенью упругости амортизирующих элементов.

Поэтому последующие изыскания были связаны с разработкой решения для принудительной параллелизации свободных участков прядей в процессе их падения на подбильную решетку (рис. 10). Для этого предложены параллелизующие решетки (у каждого била), выполненные в виде консольно закреплённых элементов.

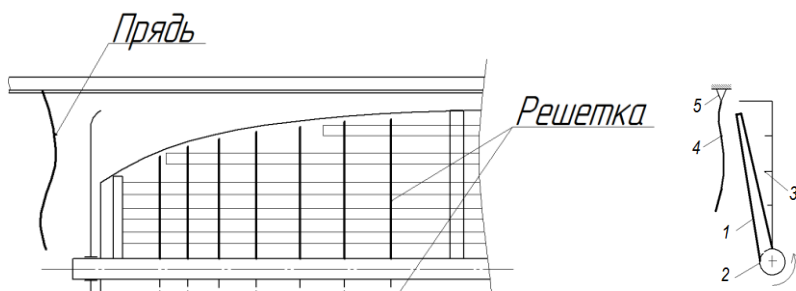


Рис. 10. Схема установки параллелизующей решетки  
1 – пластины решетки, 2 – вал барабана, 3 – подбильная  
решетка барабана, 4 – слой сырца, 5 – зажим

фотофиксации и с использованием дисперсионного анализа данных доказано статистически значимое совместное влияние длины пряди и предложенной решетки на уменьшение угла свала прядей. Установлено, что при трепании разнотолщинных прядей применение решетки снижает угол свала в 1,4 раза в сравнении с обработкой без неё.

В заключительной части четвертой главы представлены результаты оценки технологической эффективности процесса трепания. Данные для расчетов были получены на основе планирования эксперимента. В качестве исследуемых факторов приняты частота вращения барабанов, длина прядей и условия трепания (типовая конструкция барабана и с использованием предложенной параллелизующей решётки). Используя t-критерий Стьюдента при доверительной вероятности 95%, установлено, что предложенное решение для параллелизации свободных участков прядей обеспечивает увеличение выхода длинного волокна на 1%, без статистически значимого изменения массовой доли костры в волокне (см. табл. 1). Особо этот эффект проявляется при повышенной частоте вращения трепальных барабанов.

Таблица 1.

Результаты расчета t-критерия для оценки значимости различий средних

Параметры	Выход длинного волокна, %	Массовая доля костры, %
Табличное значение t-критерия	1,984	1,984
Расчетное значение t-критерия	2,022	1,724
Среднее значение для типового варианта	12,0	11,1
Среднее значение для предлагаемого варианта	13,0	9,8

Полученные результаты исследований позволили предложить вариант модернизации существующих трепальных барабанов с винтовым расположением бил путем применения упомянутых параллелизующих решёток. Данное решение было принято для использования Ивановским механическим заводом им. Г.К. Королёва. Отмечено, что реализацию предложенного малозатратного варианта модернизации трепальных барабанов можно осуществить непосредственно в условиях льнозавода.

Ожидаемый годовой экономический эффект от использования признанного изобретением предложенного технического решения по модернизации конструкции трепальной машины за счет увеличения выхода длинного волокна применительно к работе двухагрегатного льнозавода, перерабатывающего тресту средним номером 0,75 может достигать 0,23 тысяч рублей на одну тонну тресты.

## ИТОГИ ВЫПОЛНЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

1. По результатам анализа исследовательских работ, связанных с трепанием льна, констатировано, что данный процесс применительно к использованию барабанов с винтовым расположением бил и наличием конусной части изучен недостаточно. Требуется дополнительное исследование особенностей поведения прядей в активной зоне обработки, а именно в конусной части барабанов с учетом неоднородности льняной тресты по длине стеблей.

2. Получены математические модели поведения пряди в активной зоне обработки по зонам её длины: зона 1 – до начальной точки соприкосновения с бильной планкой; зона 2 – между точками контакта с бильными планками; зона 3 – концевой свободный участок. Особенностью моделей является учёт частоты вращения барабанов, особенностей расположения бил (угол подъема винтовой линии и угол конуса), скорости перемещения слоя, линейной плотности прядей и их длины.

3. Исследование применительно к зоне 1 выявило возможность существования углового смещения прядей, вызывающего их сгуживание (угол сгуживания  $\psi_1$ ). В конусной части барабана угол сгуживания меняется в зависимости от угла подъема винтовой

линии била  $\gamma$  и угла конуса барабана  $\alpha$ . При наихудших сочетаниях этих параметров угол сгруживания прядей может достигать 30 градусов и увеличивать их линейную плотность более чем на 13%, что снижает эффективность процесса обработки льна. Установлено, что существование зоны 2 определяется длиной пряди и в этой зоне также формируется её угловое смещение (угол наклона  $\psi_2$ ).

4. Моделирование поведения участков пряди в зонах 1 и 2 выявило изменчивость углов сгруживания и наклона прядей по мере перемещения бил. Характер изменения определяется расположением пряди в поле трепания относительно его начала, длиной прядей и сочетанием  $\gamma$  и  $\alpha$ . Изменение углов  $\psi_1$  и  $\psi_2$  означает существование вращательного движения соответствующих участков пряди, сохраняющегося после момента схода конца пряди с рабочей кромки била.

5. В результате исследования поведения концевой свободной части пряди в зоне 3 разработана математическая модель его движения. Её анализ позволил предсказать ранее не известное явление углового смещения этого участка (угол свала пряди  $\psi_3$ ) в плоскости, параллельной осям вращения барабанов. Экспериментально, применяя новую методику фиксации формы участков пряди на подбильной решётке и модернизированный трепальный станок, была доказана необходимость уточнения модели путём учёта влияния воздушной среды и особенностей падения свободной части пряди на подбильную решётку.

6. Величина угла свала  $\psi_3$  зависит не только от геометрических и режимных параметров процесса трепания, но и от длины прядей, достигая 30-40 градусов. В конусной части барабанов направление свала может меняться. Отношение углов свала коротких и длинных прядей может достигать 3-4 раз, что вызывает их перекрещивание, недопустимое перераспределение между ними натяжений и, как следствие, ухудшение результатов процесса трепания льна.

7. Значения максимальных углов свала для прядей разной длины могут быть минимизированы за счёт определённого сочетания  $\gamma$  и  $\alpha$ . Однако в условиях случайного исходного изменения длины прядей выбор рациональных условий обработки, при которой снижается вероятность их перекрещивания, за счёт изменения  $\gamma$  и  $\alpha$  нецелесообразен.

8. Предложено два варианта предотвращения негативных последствий от перекрещивания прядей: амортизировать обрабатываемые пряди при вводе в зону трепания путём их перемещения по упругому основанию или принудительно параллелизовать свободные участки прядей в процессе их перемещения на подбильную решётку. Наличие упругого основания обеспечивает снижение пиковых натяжений прядей, степень которого зависит от их длины. Поэтому для эффективного снижения натяжений потребуется система контроля длины исходного льна и управления степенью упругости амортизирующего основания. Это значительно усложняет конструкцию трепальной машины и является причиной отказа от этого варианта.

9. Для принудительной параллелизации свободных участков прядей предложены параллелизующие решётки (у каждого била) в виде консольно закреплённых элементов (прутья либо пластины с уменьшающейся от оси вала барабана шириной). Экспериментально посредством скоростной фотосъёмки доказано положительное влияние такой конструкции на уменьшение углов свала и перекрещивание прядей разной длины, особенно при повышенной частоте вращения барабанов.

10. По результатам экспериментального изучения технологической эффективности процесса трепания с использованием решёток для параллелизации свободных участков



прядей установлено статистически значимое увеличение выхода длинного волокна на 1% (абс.) без изменения в нём массовой доли костры.

### **РЕКОМЕНДАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ**

Для совершенствования конструкции трепальных барабанов с винтовым расположением бил и наличием конусной части предложены новые рабочие органы в виде съёмных параллелизующих решеток, устанавливаемых перед каждым билом в конусной части барабана. Их конструкция рекомендована к использованию ОАО «Ивановский механический завод им. Г.К. Королева», а также для применения ООО «Премиум» (Шолоховский льнозавод). Ожидаемый годовой экономический эффект от использования новых рабочих органов, как элементов модернизации конструкции трепальной машины, за счет увеличения выхода длинного волокна применительно к работе двухагрегатного льнозавода может достигать 0,23 тыс. рублей на одну тонну тресты средним номером 0,75.

Для оптимизации параметров конструкции предложенных рабочих органов требуется дальнейшее развитие теоретических положений, объясняющих особенности взаимодействия обрабатываемого материала с билами барабана. Для этого предусматривается разработка моделей, в которых учитывается возможность деформации на изгиб обрабатываемого материала, влияние воздушных потоков в активной зоне обработки, взаимодействие составляющих слоев прядей друг с другом.

### **ПУБЛИКАЦИИ, ОТРАЖАЮЩИЕ ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

#### **Журналы, входящие в «Перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий»**

1. Орлов, А.В. Оценка степени сгруживания прядей в слое льняного сырца при трепании / А.В. Орлов, С.В. Бойко, Е.Л. Пашин, М.С. Енин. // Известия ВУЗов. Технология текстильной промышленности. – 2012. – №6(342) с. 44 – 49 (лично автором 3 с).
2. Орлов, А.В. Оценка угла наклона льняных прядей к кромкам бил в поле трепания / А.В. Орлов, С.В. Бойко, Е.Л. Пашин, М.С. Енин // Известия ВУЗов. Технология текстильной промышленности. – 2014. – №1(349) с. 37 – 42 (лично автором 3,5 с).
3. Орлов, А.В. Анализ углового смещения свободных участков прядей льна при их перемещении в поле трепания / А.В. Орлов, С.В. Бойко, Е.Л. Пашин // Известия ВУЗов. Технология текстильной промышленности. – 2014. – №2(350) с. 32 – 37 (лично автором 4 с).
4. Орлов, А.В. Исследования условий снижения интенсивности воздействий на пряди льняного сырца на начальных этапах трепания / А.В. Орлов, Е.Л. Пашин, С.В. Бойко, М.С. Енин // Известия ВУЗов. Технология текстильной промышленности. – 2014. – №3(351) с. 35 – 40 (лично автором 3,5 с).
5. Орлов, А.В. Оценка влияния параллелизующих решеток трепальной машины на снижение угловой дезориентации льняных прядей разной длины / А.В. Орлов, Е.Л. Пашин // Известия ВУЗов. Технология текстильной промышленности. – 2015. – №5(359) с. 72 – 74 (лично автором 2,5 с).

#### **Научно-технические издания и сборники научных трудов**

6. Енин, М.С. Совершенствование процесса и технических средств подготовки и обработки льняного сырца / М.С. Енин, Е.Л. Пашин, А.В. Орлов // Кострома : Изд-во Костромского государственного технологического университета, 2014 ISBN 978-5-8285-0731-3
7. Орлов, А.В. Исследование условий формирования угла свала прядей льняного сырца при трепании / А.В. Орлов, Е.Л. Пашин // Кострома, Вестник КГТУ. – 2013. – №2(31) с. 10 – 12 (лично автором 2 с).
8. Орлов, А.В. Исследование свала пряди сырца при трепании в зависимости от её длины и параметров этого процесса / А.В. Орлов // Кострома, Вестник КГТУ. – 2014. – №1(32) с. 16 – 18 (лично автором 3 с).

9. Орлов, А.В. Технологическая эффективность использования направляющих для параллелизации прядей льносырца в процессе трепания / А.В. Орлов, Е.Л. Пашин, М.С. Енин // Кострома, Вестник КГТУ. – 2015. – №1(34) с. 7 – 9 (лично автором 2 с).
10. Орлов, А.В. Особенности расположения прядей разной длины на подбильной решетке при трепании льняного сырца / А.В. Орлов, Е.Л. Пашин // Кострома, Вестник КГТУ. – 2015. – №2(35) с. 3 – 6 (лично автором 3 с).
11. Орлов, А.В. Совершенствование конструкции станка для экспериментального исследования процесса трепания / А.В. Орлов, Е.Л. Пашин, М.С. Енин // Сборник «Научные труды молодых ученых КГТУ». – Кострома, КГТУ, 2015 с. 3 (лично автором 0,5 с).
12. Орлов, А.В. Оценка влияния воздушных потоков на перемещения прядей сырца разной длины и массы в продольной плоскости зоны трепания льна / А.В. Орлов, Е.Л. Пашин // Кострома, Вестник КГТУ. – 2016 – №1(36) с. 3 – 6 (лично автором 3 с).
13. Орлов, А.В. Влияние перекрещивания прядей льняного сырца в поле трепания на изменение сил их натяжения [Электронный ресурс] / А.В. Орлов, Е.Л. Пашин // Кострома, Вестник КГТУ. – 2016 – Режим доступа <http://vestnik.kstu.edu.ru/Images/ArticleFile/2016-1-6.pdf>, свободный – 7 с (лично автором 5 с).

**Сборники материалов и тезисы докладов на Международных, всероссийских и межвузовских конференциях**

14. Орлов, А.В. Регрессионный анализ модели сгруживания прядей сырца при трепании / А.В. Орлов // Междунар. науч.-техн. конф. «Текстиль». – М.: ФГБОУ ВПО «МГТУ им. А.Н. Косыгина», 2012 с. 26 (лично автором 1 с).
15. Орлов, А.В. Особенности формирования угла сгруживания пряжи сырца при трепании льна / А.В. Орлов, Е.Л. Пашин, С.В. Бойко // Междунар. науч.-техн. конф. «Лен». – Кострома, КГТУ, 2012 с. 25 (лично автором 0,5 с).
16. Орлов, А.В. Причины спутывания свободных участков прядей льняного сырца при трепании / А.В. Орлов, Е.Л. Пашин // Междунар. науч.-техн. конф. «Прогресс». – Иваново, ИВГПУ, 2013, с. 57 (лично автором 1 с).
17. Пашин, Е.Л. Влияние предварительного обескостривания стеблей льна на содержание костры в однотипном волокне / Е.Л. Пашин, А.В. Орлов, С.В. Кузьмичев, А.Г. Носов // Межвуз. науч.-техн. конф. «Студенты и молодые ученые КГТУ – производству». – Кострома, КГТУ, 2014 с. 94 (лично автором 0,5 с).
18. Орлов, А.В. Влияние длины прядей сырца и параметров конструкции барабанов на формирование угла свала в поле трепания / А.В. Орлов, С.В. Бойко // Междунар. науч.-техн. конф. «Лен». – Кострома, КГТУ, 2014 с. 16 (лично автором 0,5 с).
19. Смирнов, Н.Р. Модернизация барабанов трепальной машины для получения длинного льноволокна / Н.Р. Смирнов, А.В. Орлов, Е.Л. Пашин // Межвуз. науч.-техн. конф. «Студенты и молодые ученые КГТУ – производству». – Кострома, КГТУ, 2016 с. 5 – 6 (лично автором 1 с).

**Техническая новизна важнейших решений подтверждена патентами:**

1. Пат. RU 151853 Россия, МПК D01B 1/14. Секция трепальной машины для обработки лубяных волокон / Е.Л. Пашин, Д.А. Волков, А.В. Орлов – Опубл. 20.04.15 Бюл. №11.
2. Пат. RU 155864 Россия, МПК D01B 1/14. Барабан трепальной машины для обработки лубяных волокон / А.В. Орлов, Е.Л. Пашин – Опубл. 20.10.15 Бюл. №29.



Подписано в печать 30.01.2017  
Формат 1/16 60x84. Плоская печать.  
Усл. печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 0,89. Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_\_

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»  
Издательский центр ДИВТ  
153000 г. Иваново, Шереметевский проспект, 21