

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ,  
НАУКИ И КАДРОВОЙ ПОЛИТИКИ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ  
ОРДЕНОВ ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ  
И ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПИЩЕВЫХ И ХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ»

# **ПОЛУЧЕНИЕ СЕМЯН В ЛИНИИ ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЛЬНА**

*Монография*

Горки  
Белорусская государственная  
сельскохозяйственная академия  
2025

**Получение семян в линии первичной переработки льна /**  
В. А. Левчук, В. А. Шаршунов, М. В. Цайц [и др.]. – Горки : Бело-  
рус. гос. с.-х. акад., 2025. – 192 с. : ил. – ISBN 978-985-882-718-2.

В монографии приведены краткие сведения о состоянии отрасли льноводства в Республике Беларусь, проведен анализ механизированных технологий уборки льна-долгунца и устройств для отделения семенной части от стеблей. Выполнено обоснование технологической схемы очесывающе-плющильного аппарата для отделения семенной части от стеблей льна в линии первичной переработки. Выполнен анализ исследований морфологических и агробиологических свойств льна, приведены результаты исследований процесса отделения семенной части от стеблей льна. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований разработанного устройства, применяемого при реализации процесса отделения семян льна в линии первичной переработки «Van Dommele», а также результаты производственных испытаний и оценки экономической эффективности его применения. Разработана методика настройки технологических параметров аппарата, в зависимости от условий эксплуатации.

Издание предназначено для научных сотрудников, специалистов АПК инженерно-технического профиля, учащихся и студентов средних специальных и высших учебных заведений, а также для слушателей курсов повышения квалификации кадров и их переподготовки.

Табл. 18. Ил. 81. Библиогр.: 181 назв.

Печатается по решению Научно-технического совета  
Белорусской государственной сельскохозяйственной академии.  
Протокол № 4 от 26 апреля 2025 г.

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры управления охраной труда  
УО «Белорусский государственный аграрный  
технический университет» Л. В. Мисун;  
кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер центра  
подготовки, повышения квалификации и переподготовки кадров  
комитета по сельскому хозяйству и продовольствию  
Могилевского облисполкома в г. Горки А. Е. Кондраль

**ISBN 978-985-882-718-2**

© Левчук В. А., Шаршунов В. А.,  
Цайц М. В., Коцуба В. И.,  
Курзенков С. В., Кругленя В. Е., 2025  
© Белорусская государственная  
сельскохозяйственная академия, 2025

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $a_b$  – толщина кромки бича, м;  
 $B_{л.ср}$  – средняя ширина ленты льнотресты, м;  
 $b_b$  – ширина рабочего органа (бича), м;  
 $d_{вст}$  – диаметр стебля льнотресты у верхушечной части, м;  
 $d_k$  – диаметр семенной коробочки льна, м;  
 $d_{кст}$  – диаметр стебля льнотресты у комлевой части, м;  
 $d_{ст}$  – диаметр стебля льна, м;  
 $E$  – модуль Юнга, Па;  
 $E_{об}$  – степень обмолота;  
 $F_{упр}$  – сила упругого сжатия коробочки льна, Н;  
 $h_b$  – толщина ленты льнотресты в верхушечной части, м;  
 $h_3$  – высота зуба бича, м;  
 $h_k$  – толщина слоя стеблей в точке начала взаимодействия бича с лентой льнотресты, м;  
 $h_n$  – толщина слоя ленты льнотресты, м;  
 $h_n$  – глубина погружения бича в слой стеблей, м;  
 $h_{ст}$  – высота слоя стеблей в зоне контакта бича со стеблями льна, м;  
 $k_c$  – конусность стебля;  
 $L_{эт}$  – участок стебля в зажимном транспортере, м;  
 $L_{кст}$  – комлевая часть стебля, м;  
 $L_n$  – смещение ленты льнотресты относительно обмолачивающего устройства, м;  
 $L_{мз}$  – участок стебля, не подверженный воздействию рабочего органа («мертвая» зона), м;  
 $L_{об}$  – длина стебля, выступающего из зажимного транспортера, м;  
 $L_{ср}$  – средняя общая длина стеблей, м;  
 $L_{ст}$  – участок стебля, подверженный воздействию рабочего органа (бича) при обмолоте, м;  
 $l$  – длина шатуна, м;  
 $m_n$  – масса погонного метра ленты льнотресты, кг;  
 $n_b$  – частота вращения рабочего органа (бича),  $c^{-1}$ ;  
 $n_3$  – количество зубьев бича, шт.;  
 $n_c$  – количество стеблей льна, шт.;  
 $n_{ст}$  – количество семян в коробочке льна, шт.;  
 $R$  – длина кривошипа, м;  
 $R_1$  – длина коромысла, м;  
 $S$  – площадь поперечного сечения семенной коробочки льна,  $m^2$ ;

$S_6$  – площадь зоны контакта бича с лентой льнотресты,  $\text{м}^2$ ;  
 $t$  – время, с;  
 $V_{\text{р.з}}$  – объем слоя стеблей,  $\text{м}^3$ ;  
 $V_{\text{с}}$  – объем семени льна,  $\text{м}^3$ ;  
 $v_{\text{л}}$  – скорость подачи ленты льнотресты, м/с;  
 $v_{\text{тр}}$  – скорость зажимного транспортера, м/с;  
 $v_{\text{с}}$  – скорость рабочего органа, м/с;  
 $z_3$  – ширина основания зуба бича, м;  
 $\alpha_6$  – угол установки плоскости бича к плоскости ленты, рад;  
 $\alpha_3$  – угол при вершине зуба бича, рад;  
 $\delta$  – угол поворота коромысла относительно горизонтали, рад;  
 $\mu$  – растянутость ширины ленты льнотресты;  
 $\omega$  – угловая скорость кривошипа, рад/с;  
 $\eta$  – угол изгиба стеблей рабочим органом, рад;  
 $\psi$  – угол отгиба стебля в момент обрыва, рад;  
 $\varepsilon$  – степень сжатия семенной коробочки льна;  
 $\varepsilon_6$  – уплотняющая способность бича;  
 $\varepsilon_{\text{ст}}$  – относительное удлинение участка стебля льна;  
 $\xi$  – угол перекоса стеблей в ленте льнотресты, рад;  
 $\Delta$  – зазор между рабочим органом (бичом) и сепарирующей решеткой (декой), м;  
 $\Delta_{\text{кз}}$  – поперечная деформация семенной коробочки, м;  
 $\Delta_6$  – деформация эластичного рабочего органа при сжатии и взаимодействии с коробочкой льна, м;  
 $\Pi_{\text{с}}$  – отход стеблей в путанину;  
 $C_{\text{п}}$  – степень повреждения стеблей;  
 $T_{\text{с}}$  – степень повреждения семян.

## ВВЕДЕНИЕ

Лен-долгунец является одной из важнейших технических культур Республики Беларусь. Продукция льна всегда занимала особое место в экономике сельского хозяйства страны [140].

Лен является уникальным ресурсом Республики Беларусь, цветок льна украшает государственный герб. Лен традиционно считается в нашей стране стратегической культурой. Выращивание его актуально наряду с производством калийных удобрений и молочным производством. Льняной комплекс достаточно развит, в нем заняты значительные трудовые ресурсы, и самое главное, что эта отрасль ориентирована как на внутренний рынок, так и на экспорт товаров изо льна [156].

Лен и изделия из продукции льна востребованы на международном рынке и служат одним из источников валютных поступлений в республику. Лен является возобновляемым источником уникального натурального, экологически чистого сырья для производства широкого спектра товаров технического и бытового назначения. Практическое использование составляет 95–96 % массы стебля культуры. В Республике Беларусь это единственная природная сырьевая база для текстильной промышленности [159].

Беларусь входит в пятерку лидеров по производству льняного волокна, заняв в 2024 году третью позицию в мире после Франции и России [49]. За последние десять лет посевные площади льна-долгунца в Республике Беларусь сократились на 28 % и установились на уровне 50 тыс. га. При этом наблюдается рост урожайности как волокна, так и семян [65].

В связи с нехваткой трудовых ресурсов и необходимой материально-технической базы, на данный момент стоит вопрос о сохранении существующих темпов выращивания этой культуры, а также о повышении качества и выхода длинного льноволокна.

Несмотря на все преимущества, льноводство в течение последних лет отставало в своем развитии. Это обусловлено высокой трудоемкостью возделывания льна, недостаточным уровнем механизации ряда технологических процессов, а также нехваткой семян высоких посевных кондиций, которые приходится закупать за рубежом [38, 109, 132].

Программой развития легкой промышленности на 2020–2025 годы с перспективой до 2030 года предусмотрена разработка новых и усо-

вершенствование существующих технологий для повышения качества выпускаемой продукции, снижения затрат на ее производство. Достичь высокого качества льнопродукции и ее рентабельной реализации всеми уровнями льняной отрасли в рыночных условиях на внутреннем и внешнем рынках возможно лишь за счет выведения льноводства на современный технологический уровень путем технического переоснащения и совершенствования организации производства [26, 65]. Таким образом, комплексная механизация льняной отрасли является приоритетной задачей для обеспечения устойчивого развития подотрасли и будет способствовать повышению ее рентабельности.

В целях сокращения сроков уборки льна, а соответственно, и потерь качественной тресты и семенного материала в Беларуси по опыту европейских стран применяется раздельная и заводская технология уборки льна-долгунца. Их внедрение позволяет начать уборочный период на 12 дней раньше (в настоящее время средняя продолжительность уборки льна составляет более 30 дней), снизить энергозатраты на последующую переработку льновороха [109].

Одним из путей повышения эффективности льняной отрасли является совершенствование процессов уборки, первичной переработки и оборудования для ее осуществления. Кроме высокой энергоемкости и трудоемкости уборочных работ и первичной переработки (до 70 % всех трудозатрат), уровень совершенства проводимых при этом операций в значительной степени определяют качество получаемой продукции, размер потерь [119, 158]. Основопологающим этапом, обеспечивающим получение качественной льнопродукции, является процесс отделения семенной части от стеблей. В зависимости от применяемой технологии уборки и первичной переработки (комбайновая, раздельная или заводская), отделение семенных коробочек от стеблей производится при различных стадиях их созревания и на различных стадиях уборки: при тереблении по комбайновой технологии; при подборе лент льнотресты по раздельной технологии; при размотке рулонов в линии первичной переработки по заводской технологии [158]. При этом физико-механические свойства стеблей и коробочек значительно отличаются и их состояние существенно влияет на качество дальнейшей продукции. Величина урожая семян и волокна, размер потерь, качество льнопродукции, трудоемкость и энергоемкость сушки и обработки льновороха зависят от уровня совершенства процесса отделения семян от стеблей льна-долгунца [151, 158].

В Республике Беларусь функционируют 20 льнозаводов, на кото-

рых установлена 41 линия первичной переработки льна, и только 9 из них оборудованы очесывающими устройствами для отделения семенной части. Учитывая особенности перерабатываемых лент льнотресты (высокую растянутость, относительный перекося стеблей в ленте и скрутки), очесывающие устройства из-за неэффективной работы отключают с целью сохранения качества волокна.

Таким образом, задачи по разработке и совершенствованию машин и оборудования для отделения семенной части урожая льна от стеблей в условиях линии первичной переработки являются актуальными. В связи с этим возникает необходимость исследования процесса очеса и выделения семян льна на основе изучения процесса взаимодействия различных типов рабочих органов с лентой льнотресты, теоретического и экспериментального обоснования рациональных значений основных конструктивных и технологических параметров, обеспечивающих высокую производительность машин без снижения качества обрабатываемого материала.

Для решения этой задачи ведутся работы по созданию новых и совершенствованию существующих машин. Однако разработка высокопроизводительных, надежных, с высокими показателями качества работы машин для условий Республики Беларусь сдерживается отсутствием научно обоснованных конструкторских и технологических решений, в связи с чем и выбрана тема данной работы [109].

Целью исследований является повышение эффективности процесса отделения семенной части льнотресты в линии первичной переработки очесывающе-плющильным аппаратом, теоретическое и экспериментальное обоснование его основных параметров и режимов работы.

Монография предназначена для научно-исследовательской работы специалистов АПК инженерно-технического профиля, учащихся и студентов средних специальных и высших учебных заведений, а также для слушателей курсов повышения квалификации кадров и их переподготовки.

# 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

## 1.1. Состояние отрасли льноводства в Республике Беларусь и перспективы ее развития

Лен-долгунец – древнейшая прядильная культура. Еще в доисторические времена первобытный человек использовал для получения волокна и масла дикий лен, заросли которого были обнаружены академиком Н. И. Вавиловым в Северной Испании у пещеры первобытного человека. Искусство же возделывания этой культуры зародилось почти 9 тыс. лет назад в горных с влажным климатом районах Индии, где впервые начали изготавливать льняные ткани [108].

Лен-долгунец, который называют северным шелком, возделывают для получения волокна и семян. Основная продукция льна – волокно, которое идет на изготовление различных тканей, обладающих, как известно, многими ценными свойствами. Изделия из льна красивы, добротны и прочны, легки и эластичны; они хорошо пропускают воздух и впитывают влагу (в несколько раз быстрее по сравнению с шелком, вискозой и даже хлопком) [108].

Прочность льняной пряжи на обрыв при одинаковой толщине в 2–3 раза выше хлопчатобумажной и шерстяной [108, 149].

В среднем из 1 кг льняного волокна вырабатывают 2,4 м<sup>2</sup> бытовых или 1,6 м<sup>2</sup> технических тканей. Масса 1 м<sup>2</sup> льняной ткани составляет от 100 (батист) до 1000 г и более (брезент) [47, 108, 139].

Из льна текстильной промышленностью Беларуси вырабатывается очень широкий ассортимент товаров бытового назначения: полотенца, белье, одежда, одеяла и другие изделия, и технического – брезент, приводные ремни, парусина, мешочный и упаковочный материалы, шпагат, нитки, веревки и др. [108].

На изготовление тонких полотен, плательного и рубашечного материала идет длинное волокно в среднем 12–14-го номеров, которые можно получить из льняной тресты номеров 1,5–2 и выше [5, 108].

Короткое льняное волокно (номеров 4, 3, 2), получаемое в процессе переработки льнотресты, используют в основном для производства грубых тканей: мешочных, упаковочных, бортовки [108].

Для нужд народного хозяйства можно использовать почти все растение льна-долгунца. Из семян получают льняное масло, которое применяют для приготовления высококачественной олифы, а также лаков, красок, клеенок, линолеума, термоизоляционных проводов; среди тех-

нических масел оно по объему производства занимает первое место в мире [108, 163].

В небольшом количестве рафинированное льняное масло применяют в промышленном консервировании продуктов, кулинарии и кондитерском производстве [108].

Льняной жмых, выход которого составляет 65–70 кг из 100 кг семян, – лучший концентрированный корм. В 1 кг его содержится 1,15 корм. ед., 185 г переваримого белка, 4,3 г кальция, 8,5 г фосфора. В 1 кг половы (измельченные коробочки после отделения семян) содержится 0,27 корм. ед., 20 г переваримого протеина. Она также используется на корм скоту [136, 139].

Отходы льноволокна (паклю) используют в качестве упаковочного и конопаточного материала, а в зарубежных странах – в качестве наполнителя пластмассовых панелей люксовых марок легковых автомобилей [108].

Лен-долгунец не только одевает и кормит, но и лечит. Он входит в число 200 растений, из которых изготавливают лекарственные препараты. Семена содержат белок, углеводы, органические кислоты, витамин А, ферменты. Залитые водой, они, спустя 2–3 ч, разбухают и принимают вид желеобразной массы. Ее применяют при воспалительных и язвенных процессах на слизистых оболочках, особенно в желудочно-кишечном тракте. Семена используют также для компрессов и припарок, а льняное масло широко применяют в питании людей с нарушением обмена веществ, при атеросклерозе; в фармацевтической практике из него получают препарат линетол [108].

Льноводство Республики Беларусь – доходная отрасль, хотя до сих пор остается трудоемкой. В среднем в урожае льна-долгунца льносолома составляет 70–75 %, семена – 10–15 %, полова – 10–15 %. Выход тресты из урожая соломы – 70 %. Содержание волокна в соломе – 20–25 %, в тресте – 28–32 % [108, 109].

Семена льна-долгунца содержат до 40 % высококачественного жира, около 25 % белка и около 35 % высококачественного масла [40, 66, 108].

Широко применяется льняная костра, которая содержит до 65 % целлюлозы. Костра с 1 га посевов льна заменяет примерно 4 м<sup>3</sup> деловой древесины. Это равно приросту древесины за год на 1 га леса 80-летнего возраста, а пеллеты и брикеты из нее используются как высокоэнергетическое топливо [20, 66, 108].

В последние годы в Республике Беларусь посевные площади льна-

долгунца значительно сократились (в 2024 г. они составляли 49 тыс. га, что в 4 раза меньше, чем в 1970 г.) [66, 150].

Однако, несмотря на снижение объемов производства льноволокна, эта отрасль по-прежнему остается прибыльной и каждый шестой гектар, занятый под культурой льна в мире, засеян льном-долгунцом [4, 93, 66].

Внедрение прогрессивных технологий и агротехнических приемов возделывания льна, обеспечивающих, как правило, рост урожайности льноволокна на некоторых участках до 12–14 ц/га и более, позволяет сохранять уровень объемов производства льна [109].

В Республике Беларусь, несмотря на невысокую эффективность отрасли в целом, некоторые хозяйства получают урожайность волокна на уровне 10–12 ц/га и семян – 4–6,7 ц/га [66, 150]. При этом средняя урожайность волокна в республике в 2024 году составила 9,4 ц/га.

В условиях интенсификации сельскохозяйственного производства особую значимость приобретает обеспечение хозяйств высококондиционными семенами районированных сортов, которые наиболее полно соответствуют почвенно-климатическим условиям республики [24, 47, 66].

Одной из проблем возделывания льна является низкая всхожесть высеваемых семян, обусловленная несвоевременностью уборки семенных посевов, когда уборку комбайновой технологией начинают в стадии ранней желтой спелости льна. Стандартами льносеющих стран Европы не допускается высев семян льна со всхожестью ниже 98 % и засоренностью выше 2 %. В этом вопросе большинство льносеющих хозяйств Республики Беларусь значительно отстает [66, 159].

Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы должны быть направлены на создание высокопроизводительных, малоресурсоемких, универсальных машин, позволяющих существенно повысить уровень механизации при значительном сокращении затрат производственных ресурсов [66, 110].

Основным условием для дальнейшего развития производства продукции является необходимость совершенствования семеноводства в льняной отрасли АПК с целью получения достаточного количества семян высокого качества как гаранта реализации поставленных Программой социально-экономического развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы задач в льноводстве [65, 66].

## 1.2. Обзор и анализ технологий уборки и переработки льна

Уборка льна является наиболее трудоемким процессом в технологии его производства (до 70 % всех трудозатрат) и во многом определяет экономические показатели льноводства в целом [67]. Потери урожая и качества получаемой продукции в значительной степени зависят от применяемых технологий уборки и сроков их проведения [9, 67, 84].

В настоящее время в мировой практике различают четыре технологии: сноповую, комбайновую, раздельную и заводскую. Сноповая уборка сопряжена с большими затратами ручного труда и применяется в основном в селекции и семеноводстве, а также исключительно при неблагоприятных погодных условиях.

Технология комбайновой уборки (рис. 1.1) включает в себя теребление растений с одновременным очесом семенных коробочек и расстилом льносоломы в ленты. Полученный в результате очеса стеблей льна льноворох обмолачивается зерноуборочным комбайном, досушивается, разделяется на фракции, производится очистка семян. Разостланную в поле ленту стеблей льна для получения льнотресты подвергают одно-двухразовому оборачиванию, вспушиванию. После вылежки льнотреста подбирается и прессуется в рулоны и отправляется для переработки на льнозавод.

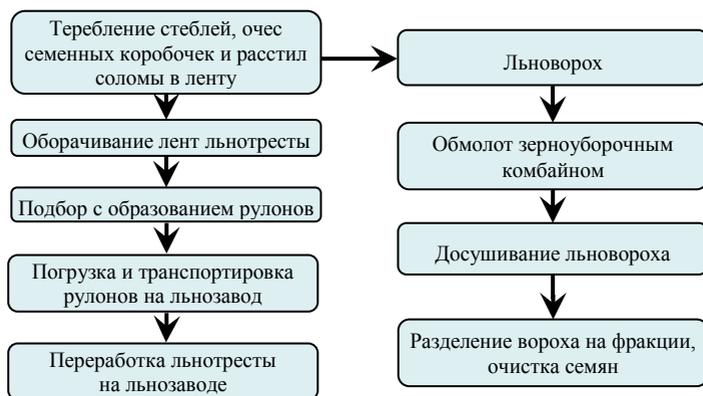


Рис. 1.1. Схема комбайновой уборки льна

Оптимальными сроками уборки по комбайновой технологии являются желтая и бурая стадии спелости, что позволяет получать семенной материал высокого качества, в то же время оптимальным сроком

уборки льна для получения качественного волокна является стадия ранней желтой спелости [9, 67, 110]. Комбайновая технология позволяет уменьшить затраты труда в 1,7–3,4 раза по сравнению со сноповой уборкой и в наименьшей степени зависит от погодных условий [9, 37, 67, 84].

Существенным недостатком комбайновой уборки является ее высокая энергоемкость из-за больших затрат энергоресурсов на искусственную сушку сырого льновороха при получении семян, более 48 кг/га топлива, т. е. около 30 % от затрат на всю технологию [9, 67, 84, 102]. Позднее начало уборки ведет к недобору урожая волокна.

Технология раздельной уборки включает в себя теребление стеблей льна и расстил их на поле в ленты, естественную сушку, подъем лент льнотресты с очесом семенных коробочек, расстил очесанных лент льно-соломы на льнище (рис. 1.2) [67]. Полученный в результате очеса стеблей льна льноворох поступает на первичную очистку, досушивается, обмолачивается, производится очистка семян. Дальнейшие операции по приготовлению льнотресты такие же, как и при комбайновой технологии.



Рис. 1.2. Схема раздельной уборки льна

Раздельная технология позволяет начать уборку льна в оптимальные сроки для получения качественного волокна. При этом недозре-

шие семена льна при благоприятных погодных условиях дозревают в вытеребленной ленте льна. Семенной ворох, полученный в результате очеса, более концентрированный и практически не нуждается в сушке.

Основной недостаток ее заключается в большой зависимости от погодных условий с точки зрения получения семенного материала. Затраты труда при комбайновой и раздельной уборке практически одинаковы и равны примерно 70 чел.-ч/га [9, 44, 67, 84].

Заводская технология уборки (рис. 1.3) отличается от раздельной технологии тем, что отделение семенной части урожая производится в линии первичной переработки льна на льнозаводе, что снижает ее зависимость от погодных условий с точки зрения получения семян льна. Кроме того, она позволяет сократить количество операций, проводимых в поле (подбор с очесом и транспортировка семенного вороха на льнозавод), а трудозатраты на отделение семенной части урожая от стеблей распределить равномерно на более длительный период, связанный с переработкой полученной льнотресты с семенными коробочками на льнозаводе [9, 54, 67, 77].

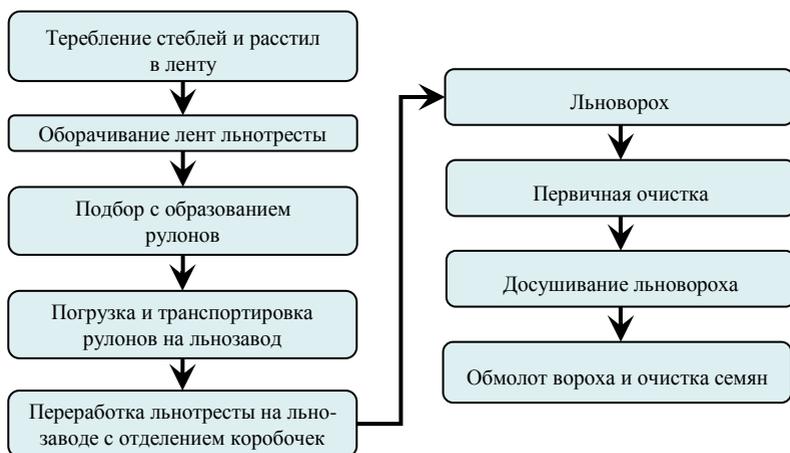


Рис. 1.3. Схема заводской технологии уборки льна

К недостаткам этой технологии относятся большие потери семян (до 70 %), как в поле во время вылежки и подбора с образованием рулонов, так и на льнозаводе из-за некачественной работы очесывающего устройства [9, 67, 77].

### 1.3. Обзор и анализ устройств для отделения семенной части от стеблей льна

С целью выбора способа отделения семенной части от стеблей льна и обоснования конструкции устройства для его осуществления необходимо провести анализ способов и существующих и перспективных очесывающих и обмолачивающих устройств (рис. 1.4).

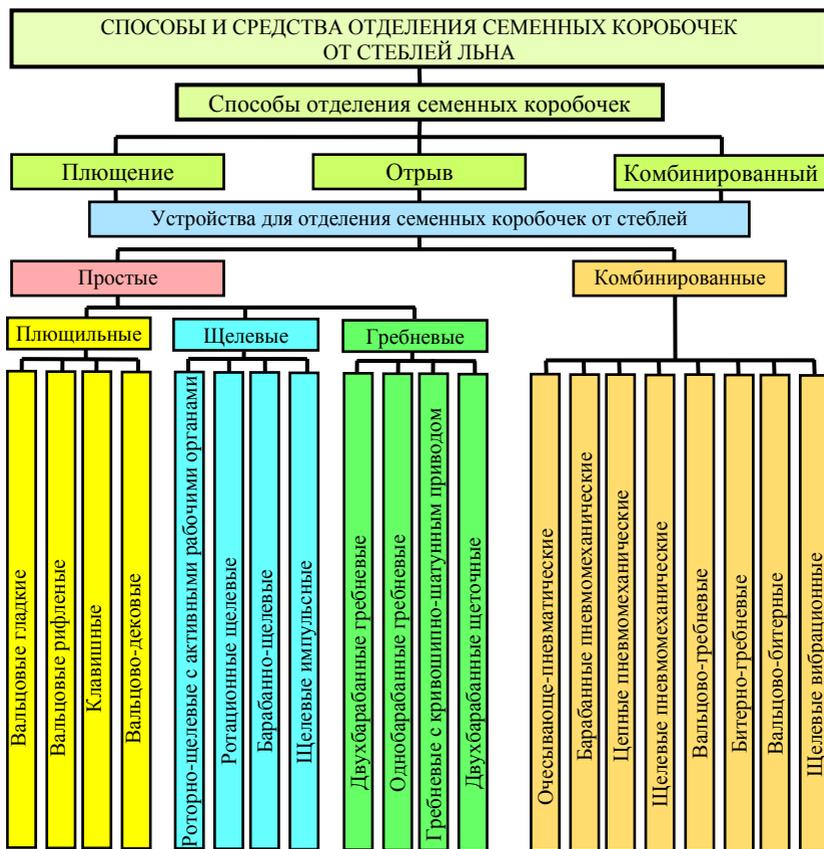


Рис. 1.4. Классификация способов и устройств для отделения семенных коробочек от стеблей льна

Процесс отделения семенной части от стеблей является ответственной операцией, в значительной мере влияющей на количество и качество получаемой продукции, а также производительность всего комплекса машин [7, 22].

Способы отделения семенных коробочек от стеблей льна и устройства для их осуществления отличаются большим многообразием. Изучение характера воздействия рабочих органов различных устройств на стебли льна и процесса отделения семенных коробочек или выделения из них семян позволяет заключить, что достичь данного результата можно тремя способами: площения, отрыва и их комбинацией [11, 22, 52, 134].

В соответствии с приведенной классификацией способов отделения семенных коробочек от стеблей льна все известные до настоящего времени типы устройств, предназначенные для этих целей, могут быть разделены на две группы: простые и комбинированные (см. рис. 1.4) [11, 22, 52]. Общим для всех аппаратов, предназначенных для отделения семенной части от стеблей, является наличие зажимных устройств для комлевой части стеблей, которые увлекают ленту льна в рабочее пространство. Задача отделяющего элемента заключается в создании (обеспечении) возрастающего давления на коробочки или прочеса стеблей, под действием которых и происходит их разрушение или отрыв [52].

К устройствам, которые обеспечивают выделение семян льна способом площения коробочек на стебле, относятся вальцовые, клавишные и вальцово-дековые аппараты [22]. Вальцовые устройства использовались в стационарных льномолотилках «Эдди», ЛМС-5 и МПЛ-10. Их конструкция (рис. 1.5, *а* и *б*) [11, 52, 154] включала зажимной транспортер *1* и несколько пар установленных перпендикулярно ему друг над другом гладких вальцов *19*. Верхние вальцы прижимались к нижним с помощью пружин. При проходе стеблей между вальцами коробочки разрушаются, а выделившиеся семена просыпаются сквозь слой стеблей на транспортер [22]. Такие устройства позволяют обеспечить полноту выделения семян кондиционной спелости до 98 %.

Высокая чистота обмолота в таких устройствах достигалась путем многократного воздействия на материал сопряженными вальцами.

Достоинствами аппаратов вальцового типа являются низкий отход стеблей в путанину (0,5–1,0 %) и меньшее их повреждение при работе на льне с влажностью стебельной массы до 15 % [22]. При повышении влажности свыше 15 % наблюдается снижение производительности, увеличение потерь семян и повреждений стеблей и отход их в путанину [11, 12, 52].

Отличие клавишного аппарата (рис. 1.5, в) заключается в том, что клавиши имеют значительно меньшие размеры по сравнению с вальцами и являются пассивным рабочим органом. Клавишные устройства в процессе испытаний не обеспечили хороших эксплуатационно-технологических показателей работы и не нашли дальнейшего практического применения [22, 33].

Вальцово-дековые молотильные устройства (рис. 1.5, з) включают в себя вращающийся барабан 2 с закрепленными по его окружности вальцами 19 и деку 21. Они имеют небольшие габариты, достаточно высокую производительность и почти такие же показатели качества работы, как и вальцовые.

Высокая степень обмолота обеспечивается многократностью воздействия вальцов барабана на обрабатываемый материал. Данные устройства имеют зависимость производительности и потерь семян от влажности льна, а также изгибающее воздействие вальцов барабана на стебли приводит к большому отходу их в путанину [11, 33, 52].

В зависимости от применяемых устройств по классификации Л. В. Родионова отделение семенных коробочек от стеблей способом отрыва может осуществляться различными способами: использования подвижных щелевых элементов, волочения или прочеса [12, 134].

В щелевых устройствах (рис. 1.5, д) отделение коробочек происходит за счет волочения стеблей через зазор, образованный установленными под углом к зажимному транспортеру 1 двумя параллельными контурами в виде ремней или цепей специальной конструкции 7. Преимуществом таких устройств является отсутствие прочесывания слоя, вследствие чего перекосы стеблей в ленте льна не вызывают повышения образования путанины. Недостатками таких аппаратов являются: низкая производительность, затруднение сбора продуктов очеса и зависимость качества работы от подачи материала, при увеличении которой полнота очеса существенно снижается, а содержание путанины в ворохе возрастает [94].

Ротационные очесывающие аппараты (рис. 1.5, е) представляют собой пару установленных под углом к транспортеру 1 цилиндрических роторов 9, образующих щелевое пространство, в которое подается обрабатываемый материал. Активное действие обусловлено только силами трения, направлено вдоль стеблей, что уменьшает их повреждаемость, однако приводит к снижению эффективности очеса [11, 52]. Данные устройства имеют преимущества и недостатки рассмотренных выше щелевых аппаратов.

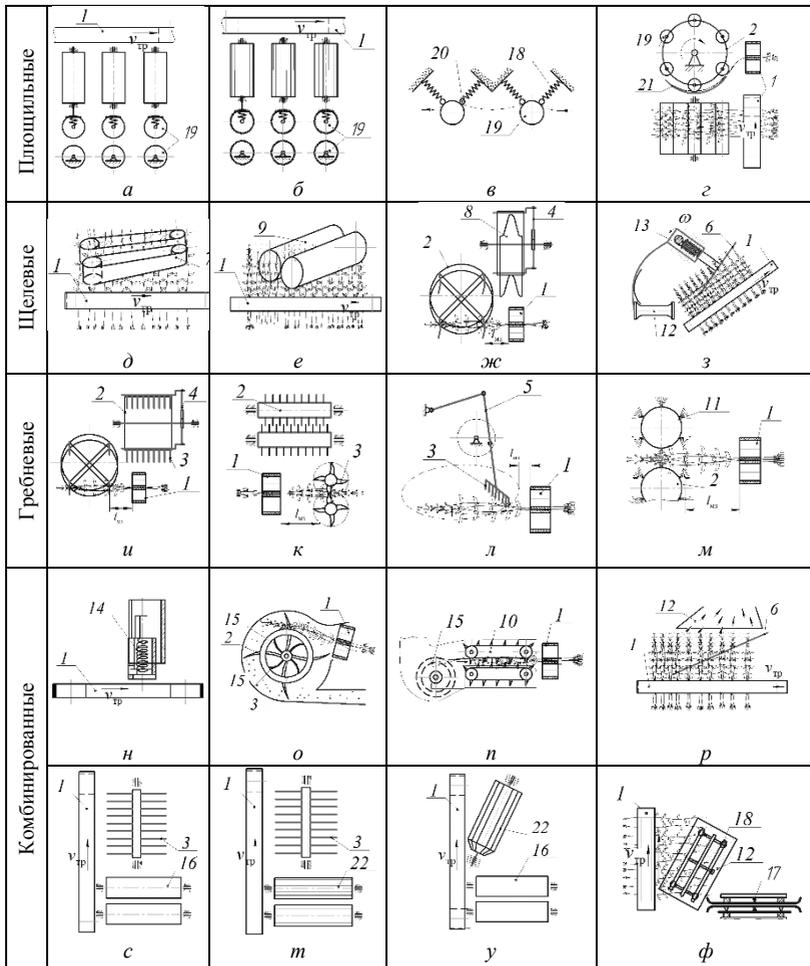


Рис. 1.5. Схемы устройств для отделения семенных коробочек от стеблей льна и выделения из них семян:

- 1 – зажимной транспортер; 2 – барабан; 3 – система зубьев (гребни); 4 – параллелограммный механизм; 5 – кулисный механизм; 6 – планки очесывающие; 7 – контур параллельный цепной (ременной); 8 – лопатки; 9 – цилиндрические роторы; 10 – цепочно-зубовой транспортер; 11 – щетки; 12 – сборное устройство; 13 – механизм образования импульса; 14 – пневмоустройство; 15 – центробежный вентилятор; 16 – валец; 17 – вибратор; 18 – упругий элемент; 19 – валец; 20 – клавиша; 21 – дека; 22 – биту;  $v_{\text{тр}}$  – скорость движения зажимного транспортера;  $L_{\text{мс}}$  – «мертвая» зона;  $\omega$  – угловая скорость

В устройствах роторно-щелевого типа с динамически активными рабочими органами очесывающими элементами являются шарнирно установленные на барабане 2 совершающие плоскопараллельное движение лопатки 8 серповидной формы с регулируемым по ширине прорезями (рис. 1.5, ж). В обоих случаях оси вращения лопаток перпендикулярны зажимному транспортеру 1. Форма лопаток 8 обеспечивает эффективное разделение стеблей на порции, направление их в щелевое пространство и отрыв коробочек в результате воздействия с боковыми гранями щели [52].

Достоинство очесывающих аппаратов роторно-щелевого типа состоит в том, что траектория движения рабочих элементов в плоскости слоя очесываемых стеблей уменьшает их излом относительно зажимной ленты и тем самым снижает повреждения и отход стеблей в путанину [22]. Однако эти устройства обеспечивают удовлетворительное качество работы в ограниченном диапазоне спелости, влажности и подачи материала [11, 22, 52, 67, 134, 135].

Основным конструктивным элементом импульсного очесывающего устройства (рис. 1.5, з) являются установленные под углом к зажимному транспортеру 1 очесывающие планки 6, образующие щель и совершающие возвратно-поступательное движение. Отрыв коробочек обеспечивает ускоренное движение планок при рабочем ходе, обусловленное действием пружины, освобождаемой от сжатия кулачковым механизмом. Расположение очесывающих планок под углом к зажимному транспортеру обеспечивает продольное воздействие на стебли при относительно небольшом ходе планок, и зажатые в щелевом пространстве коробочки льна отрываются и просыпаются в сборное устройство 12 [11, 112, 52].

Воздействие планок боковой поверхностью на стебли без проникания внутрь ленты льнотресты уменьшает обрыв стеблей и их отход в путанину. Плавное движение планок при холостом ходе минимизирует изгибающее воздействие устройства на стебли [52]. Однако на качество очеса данным устройством в значительной степени влияет толщина ленты льнотресты. К его недостаткам также можно отнести усложнение сбора и транспортирования продуктов очеса [11, 52].

Как показали исследования, из-за меньшей интенсивности воздействия на стебли и отсутствия эффекта расчесывания ленты при работе очесывающих аппаратов щелевого типа по сравнению с гребневыми аппаратами снижается повреждение стеблей в 3–3,5 раза, отход

их в путанину в 2–2,5 раза, разрушаемость семенных коробочек в 1,5 раза. Однако эти очесывающие аппараты не нашли пока применения в производстве главным образом из-за низкой пропускной способности [36].

Наиболее компактными в конструктивном исполнении из устройств, работающих по методу прочеса, являются однобарабанные очесывающие аппараты с плоскопараллельным движением гребней (рис. 1.5, *и*) [22]. Они имеют установленный под углом или параллельно зажимному транспортеру барабан 2, гребни которого благодаря наличию параллелограммного механизма 4 совершают плоскопараллельное движение [160]. Зубья 3 гребней проникают в слой стеблей, разделяют их на порции, прочесывают ленту льнотресты с выравниванием стеблей и производят отрыв коробочек [11, 52, 154]. При установке барабана параллельно зажимному транспортеру зона воздействия зубьев на ленту стеблей остается неизменной [29]. При установке барабана под углом к зажимному транспортеру происходит последовательный очес от вершинной части слоя ленты к его комлевой части с постепенным расширением зоны воздействия зубьев на стебли [160]. Благодаря этому снижается обрыв и отход стеблей в путанину, но из-за уменьшения числа прочесов в среднем на 2–3 % по сравнению с параллельным расположением барабана снижается полнота очеса [52, 154].

При снабжении гребней барабана дополнительно лопастями одновременно с очесом стеблей происходит и вывод льновороха из камеры очеса, т. е. устройство становится многофункциональным, что является его большим достоинством [22].

К достоинствам однобарабанных очесывающих аппаратов с плоскопараллельным движением гребней можно отнести простоту конструкции, надежность и универсальность, т. е. способность осуществлять процесс очеса в широком диапазоне спелости и влажности стеблей льна. К недостаткам – повышенные обрыв и отход стеблей в путанину, возникающие в результате прочесывания слоя спутанных и сцепленных между собой стеблей. Вне зависимости от варианта расположения барабана относительно зажимного транспортера однобарабанным аппаратам присуще снижение полноты очеса на короткостебельном льне из-за относительно большой величины «мертвой» зоны  $L_{мз}$  [11].

Несмотря на некоторые отличия в конструкции и осуществлении технологического процесса, недостатки, отмеченные выше, в полной

мере присущи и двухбарабанному гребневому аппарату (рис. 1.5, к), имеющему два очесывающих барабана 2 с жестко закрепленными на них гребнями 3 [11]. Для выполнения последовательного очеса, начиная с вершинной части стеблей на всю ширину зоны расположения коробочек в слое, зубья гребней аппарата имеют различную длину. Барабаны, вращаясь навстречу друг другу с постоянной угловой скоростью, обеспечивают вхождение зубьев в слой стеблей, разделение их на порции, прочесывание с отрывом коробочек и вынос вороха из зоны очеса [93].

Достоинствами двухбарабанного очесывающего аппарата являются высокая полнота выделения продуктов очеса из слоя стеблей и технологическая надежность. Недостатками – значительные повреждения и отход стеблей в путанину. Таким образом, общий для всех гребневых очесывающих аппаратов рабочий элемент – проникающий в слой стеблей зуб – является как их достоинством, обеспечивая отрыв коробочек и выделение продуктов очеса при любом состоянии льна, так и недостатком, поскольку результатом его жесткого воздействия является повышенный обрыв стеблей и отход их в путанину. Вместе с тем практика использования гребневых очесывающих аппаратов показывает, что повреждение и отход стеблей в путанину может иметь минимальное значение при очесе неполеглых посевов льна [15, 22, 154]. Эти аппараты получили наибольшее распространение в конструкции льноуборочных машин.

В линиях первичной переработки льна наибольшее распространение получили гребневые аппараты (рис. 1.5, л) с кривошипно-шатунным механизмом привода с коромыслом 5, обеспечивающим движение гребня 3 по эллипсоидной кривой, т. е. аппараты представляют собой рычажный механизм [66]. Они обеспечивают лучшие, по сравнению с барабанными аппаратами, технологические показатели. Более плавное движение рабочего органа в зоне очеса обуславливает меньшее отклонение обрабатываемых стеблей от плоскости ленты. Движение рабочего органа по эллипсоидной траектории значительно уменьшает величину «мертвой» зоны  $L_{мз}$ . Однако такие аппараты отличаются большими габаритами, что сдерживает их применение в мобильной льноуборочной технике [11, 52]. Им присущи также все недостатки гребневых очесывающих аппаратов.

С целью уменьшения последствий жесткого прочесывания слоя стеблей зубьями гребней произвели замену последних щетками из мягкого полимерного материала или резины [11, 116, 114]. Рабочим

органом таких аппаратов (рис. 1.5, *м*) является пара цилиндрических роторов, поверхность которых снабжена тонкими гибкими элементами – щетками 11 [88, 155]. Недостатками являются низкая степень очеса, склонность к наматыванию стеблей на роторы, быстрое изнашивание щеток и недостаточная надежность [22].

Стремление полностью исключить повреждение стеблей и семян льна при отделении коробочек натолкнуло ученых и конструкторов на мысль о создании пневматического очесывающего аппарата. Такой аппарат был создан в Центральном научно-исследовательском проектно-технологическом конструкторском институте механизации льноводства (рис. 1.5, *н*) [118]. Он имел пневмоустройство 14, которое создает импульсные вихревые потоки, обеспечивающие отделение коробочек от стеблей. Это происходит без механического воздействия жестких рабочих органов и не сопровождается деформацией стеблей. Все это в совокупности обеспечивает минимальное повреждение стеблей и отход их в путанину. Однако предложенный пневматический очесывающий аппарат не прошел производственной проверки и не нашел практического применения [11].

Барабанный пневмомеханический очесывающий аппарат (рис. 1.5, *о*) имеет камеру очеса, в которой установлен очесывающий барабан 2 с гребнями 3 и торцевыми дисками и центробежный вентилятор [11]. С целью уменьшения потерь семян и повышения надежности выполнения технологического процесса в торцевых дисках очесывающего барабана и в боковых стенках камеры очеса выполнены окна для подсоса воздуха, при этом с каждой боковой стороны камеры очеса под проемами для прохода ленты стеблей через камеру очеса и окнами подсоса воздуха установлены семяловители. Устройство данного типа имеет низкую эффективность работы на короткостебельном льне из-за относительно большой величины непрочесываемой зоны  $L_{мз}$  [11, 52].

Рабочими органами цепного пневмомеханического очесывающего аппарата (рис. 1.5, *п*) являются два расположенных один над другим и перпендикулярно зажимному транспортеру цепочно-планчатых очесывающих транспортера 10, планки которых снабжены зубьями. С противоположной от зажимного транспортера 1 стороны камеры очеса смонтирован центробежный вентилятор 15.

Аппарат работает следующим образом. Зажимной транспортер 1 перемещает стебли в направлении, перпендикулярном направлению движения цепочно-планчатых транспортеров, со стороны входа в оче-

сывающую камеру к ее выходу, и стебли, попадая в зазор между верхним и нижним очесывающими транспортерами, вследствие движения очесывающих гребенок в направлении от зажимного транспортера прочесываются ими, и происходит отделение семенных коробочек от стеблей [118]. Очесанный льноворох падает на ленту нижнего очесывающего транспортера и перемещается к всасывающей зоне центробежного вентилятора 15, где за счет движения потока воздуха через окна очесывающей камеры происходит съем льновороха с транспортера и далее под воздействием ротора вентилятора вывод его из очесывающего устройства [118].

Разновидностью пневматических аппаратов являются также пневмощеточные очесывающие аппараты. Рабочими органами таких аппаратов являются гребни из капроновых прутков и вентилятор со всасывающим (вакуумно-щеточные) или нагнетательным (пневмощеточные) потоком. Аэродинамический эффект используется для повышения полноты отделения коробочек от стеблей льна и транспортирования вороха, что снижает потери семян.

Известен очесывающий аппарат [1], имеющий в очесывающей камере барабан с лопатками и гребнями и вентилятор с соплом, расположенный со стороны зажимного транспортера. Барабан со стороны входа стеблей в камеру очеса имеет лопатки, а со стороны выхода стеблей – зубья. В аппарате происходит выравнивание стеблей лопатками с последующим очесом их гребнями, что несколько снижает отход стеблей в путанину. Воздушный поток при этом играет вспомогательную роль – только прижимает стебли к лопаткам. Однако отделение семенных коробочек от стеблей происходит при жестком воздействии гребней на стебли, что обуславливает значительные осевые нагрузки стеблей и их деформацию. Поэтому повреждение стеблей и выход их в путанину остаются значительными.

В аппаратах (рис. 1.5, *p*) отрыв коробочек осуществляется протяжкой стеблей через зазор, образованный установленными в одной плоскости под углом к зажимному транспортеру 1 планками. Сбор получаемого при протяжке ленты льнотресты сквозь зазор между планками вороха осуществляется с помощью пневматического устройства 12 [52]. Наиболее существенным преимуществом таких устройств является отсутствие прочесывания слоя, вследствие чего неправильная ориентация стеблей в нем относительно рабочего органа не вызывает образования путанины. Недостатками данных очесывающих аппаратов являются: низкая производительность, сложность сбора продуктов

очеса и значительная зависимость качества работы от подачи. При ее увеличении чистота очеса существенно снижается, а содержание путанины в ворохе возрастает [11].

Главными недостатками пневмомеханических аппаратов являются повышенные повреждения стеблей из-за совместного воздействия механических рабочих органов (лопастей, гребней, пальцев) и воздушного потока. Кроме того, эти аппараты еще не прошли производственной проверки, что не позволяет сделать окончательный вывод об их пригодности к практическому применению [11, 52].

Попытки повысить степень отделения коробочек от стеблей привели к созданию устройств, сочетающих различные способы воздействия на обрабатываемый материал.

Конструктивно-технологическая схема вальцово-гребневого аппарата (рис. 1.5, *с*) включает установленные вслед за плющильными вальцами 16 под углом к зажимному транспортеру 1 гребневые аппараты 3. За счет проникновения гребней 3 в слой стеблей обеспечивается более полное выделение из него разрушенных коробочек и семян независимо от спелости и влажности льна [11, 22, 52, 73].

Конструкция битерно-гребневого аппарата (рис. 1.5, *м*) [86] включает последовательно расположенные в камере очеса пару битеров 22 и гребневое очесывающее устройство 3 [22].

Конструкция вальцово-битерного аппарата (рис. 1.5, *у*) включает попарно установленные перпендикулярно зажимному транспортеру 1 друг над другом подпружиненные гладкие вальцы 16 и битеры 22. Технологический процесс отделения коробочек от стеблей в таком аппарате осуществляется в два приема. Гладкие вальцы 16 производят плющение коробочек, а битеры 22 – вытряхивание вороха из слоя стеблей. Вальцово-битерные аппараты обеспечивают большую, по сравнению с вальцовыми, производительность и меньшие потери семян. Однако с увеличением влажности льна из-за ухудшения сепарации продуктов очеса из слоя стеблей потери семян возрастают, а склонность битеров к образованию намоток снижает технологическую надежность таких аппаратов [22]. Ухудшение сепарации при повышении влажности обусловлено изменением фрикционных свойств льновороха и условий выделения его из ленты, вследствие чего семена и коробочки, находящиеся внутри нее, выносятся из камеры очеса [22].

В щелевом вибрационном очесывающем устройстве (рис. 1.5, *ф*), с целью исключения забивания, планки, закрепленные на эластичных опорах 18 и образующие щель, снабжены вибраторами 17, выполнен-

ными в виде приводных валов с неуравновешенными грузами [11, 52]. Колебание планок способствует освобождению щели от очесанных коробочек. За счет вибрации осуществляется также транспортировка очесанных коробочек в бункер по транспортирующей доске 12.

Общим недостатком рассмотренных выше конструкций комбинированных аппаратов является нецелесообразность сочетания в одной схеме вальцов с битерами или гребневыми барабанами, поскольку наличие вальцов снижает технологическую надежность из-за налипания на них продуктов обмолота при повышении влажности обрабатываемого материала. Кроме того, они имеют большие габариты и массу [22]. Существенным недостатком их, так же как и других аппаратов, является затруднение сбора продуктов очеса.

Анализ известных конструкций очесывающих аппаратов и существующих способов обмолота льнотресты позволяет сделать вывод о том, что наиболее эффективным с учетом физико-механических свойств стеблей и коробочек льна, подаваемых на обмолот в линии первичной переработки, является комбинированное воздействие рабочих органов на обрабатываемый материал. Наиболее полное и качественное отделение коробочек от стеблей может быть достигнуто путем сочетания очесывающего и плющильного воздействия, поскольку подаваемая на обмолот лента льнотресты в линиях первичной переработки имеет влажность 13–15 % [11, 12, 106]. Применение при этом рабочего органа из эластичного материала максимально снизит степень повреждения как стеблей, так и семян льна.

За базовую схему устройства для отделения семян от стеблей в линии первичной переработки примем аппарат с кривошипно-шатунным механизмом и коромыслом, который обеспечивает движение рабочего органа по замкнутой эллипсоидной кривой, что значительно уменьшает величину «мертвой» зоны. При этом рабочий орган в зоне очеса будет иметь более плавное движение и производить меньшее отклонение обрабатываемых стеблей льна от плоскости ленты. Установка в нижней части устройства сепарирующей решетки (деки) обеспечивает противоудар и сепарацию обмолоченной массы.

#### **1.4. Обоснование конструкции очесывающе-плющильного аппарата в линии первичной переработки льна**

По заводской технологии уборки и первичной переработки льна отделение коробочек от стеблей осуществляется в линиях первичной переработки льна «Van Dommele» или «Depoortere». В них используются очесывающие аппараты с кривошипно-шатунным механизмом и коромыслом, оборудованные одним гребневым рабочим органом.

Работа этих аппаратов на льняной тресте, перерабатываемой отечественными льнозаводами, сопровождается [38, 68, 109]:

- повреждением стеблей (до 6 %);
- отходом стеблей в путанину (до 8 %) [132];
- повышенной повреждаемостью семян (до 3 %);
- намоткой стеблей на рабочий орган.

Это вызвано непригодностью используемых аппаратов к дефектам лент льнотресты, поступающей на очес (относительный перекос стеблей в ленте, растянутость и скрутки).

В связи с этим важной задачей являются совершенствование процесса обмолота лент льнотресты в линии первичной переработки льна и разработка обмолачивающего устройства, позволяющего повысить степень отделения семенной части от стеблей [75].

Авторами предложен очесывающе-плющильный аппарат с эластичным рабочим органом (бичом) и сепарирующей решеткой (декой) (рис. 1.6) [50, 51, 69, 70, 72, 77, 113, 115, 143].

Аппарат включает подающий транспортер льнотресты 1, ленточно-дисковый зажимной транспортер 2 и устройство для отделения семенных коробочек от стеблей льнотресты, состоящее из эластичного рабочего органа 6 с зубчатой нижней кромкой и сепарирующей решетки (деки) 7. Сепарирующая решетка 7 установлена относительно эластичного рабочего органа 6 с регулируемым зазором, уменьшающимся от входа к выходу. Кривошипно-шатунный механизм с коромыслом 4 обеспечивает движение зубчатой кромки по эллипсоидной кривой [38, 75].

Устройство работает следующим образом. Лента льнотресты подводится транспортером льнотресты к зажимному транспортеру, который подает ее в зону обмолота, где за счет удара эластичного рабочего органа по верхушечной части стеблей и протаскивания их через молотильный зазор, образуемый бичом и декой, происходит отделение семенных коробочек. Обмолачивающее воздействие эластичного рабо-

чего органа при взаимодействии с обрабатываемой лентой льнотресты приводит к разрушению связей между коробочками и стеблями, смятию коробочек и их разрушению с выделением семян [75].

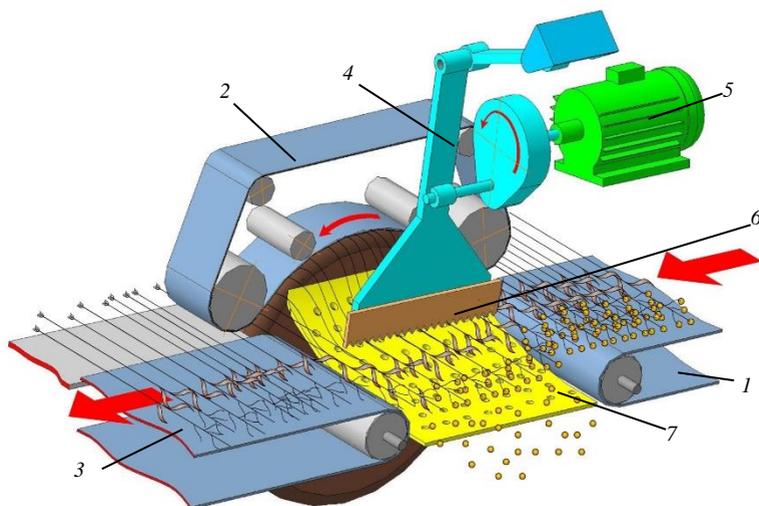


Рис. 1.6. Схема очесывающе-плющильного аппарата:  
1 – подающий транспортер; 2 – зажимной транспортер; 3 – отводящий транспортер;  
4 – кривошипно-шатунный механизм с коромыслом; 5 – электродвигатель;  
6 – эластичный рабочий орган (бич); 7 – сепарирующая решетка (дека)

Зубчатая форма нижней кромки эластичного рабочего органа за счет внедрения зубьев в обрабатываемую ленту льнотресты обеспечивает частичное выравнивание стеблей и вычесывание коробочек и семян льна из внутренних слоев ленты. Щадящее воздействие рабочего органа существенно снижает повреждаемость стеблей, увеличивая выход длинного волокна.

### 1.5. Выбор и обоснование материала эластичного рабочего органа

Влияние параметров эластичной поверхности рабочих органов обмолачивающих устройств исследовалось Г. А. Хайлисом [147], Г. А. Райляном [130] при обмолаоте ленты льнотресты, А. Н. Кудрявцевым при обмолаоте льновороха [53] и др.

При разработке эластичного рабочего органа особенно важным является выбор его материала, который должен соответствовать следующим требованиям:

- иметь твердость не более 95 единиц по Шору (шкала А), исходя из необходимости меньшего травмирования и повреждения семян и стеблей льна;
- выдерживать механические нагрузки и множество циклов сжатия и изгиба;
- сохранять упругие свойства в широком диапазоне изменения температур;
- обладать высокой эластичностью и устойчивостью к воздействию абразивных веществ, присутствующих при постоянном контакте со стеблями льна.

Анализ источников информации о наиболее распространенных эластомерах показал, что всем вышеперечисленным требованиям наиболее полно отвечает полиуретан [32, 42, 55, 56, 80, 83, 107, 131, 164, 166, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 178, 179].

Полиуретан имеет большой диапазон твердости, эластичности, низкую истираемость, высокое сопротивление раздиру, маслобензостойкость, кислотостойкость и рабочий температурный интервал от  $-70$  до  $+125$  °С [21].

Большое количество марок полиуретана позволяет подобрать наиболее подходящее сырье для изготовления конкретного изделия.

Основные физико-механические и эксплуатационные характеристики полиуретана и резины приведены в табл. 1.1 [4].

Таблица 1.1. Основные физико-механические и эксплуатационные характеристики полиуретана и резины

Показатель	Полиуретан	Резина
Твердость по Шору (шкала А)	40–98	65–75
Предел прочности при обрыве, кг/см <sup>2</sup>	312	115
Относительное удлинение при обрыве, %	500–600	300
Сопротивление раздиру, кг/см <sup>2</sup>	58	20
Усадка, %	33,5	35–40
Эластичность, %	40	30
Абразивная стойкость (Н22)	10	2
Температурный предел хрупкости, °С	–77	–70
Рабочий диапазон температур, °С	–70...+125	–30...+50
Коэффициент морозостойкости	58	20
Истираемость, м <sup>3</sup> /МДж	11,25–26,6	45–80

На основании анализа априорной информации в качестве материала рабочего органа был выбран полиуретан марки Адипрен 167, который обладает следующими свойствами:

- эластичностью (относительное удлинение при разрыве – 400 %);
- низкой истираемостью (истираемость – 20,3–26,6 м<sup>3</sup>/МДж, условная износостойкость в 3 раза выше, чем у резины);
- высокой прочностью (условная прочность при растяжении – 49,7 МПа);
- высоким сопротивлением раздиру и многократным деформациям (сопротивление раздиру – не менее 50 кН/м);
- повышенной твердостью (до 95 единиц Шора).

Исследования на сжатие полиуретановых изделий при статических и динамических нагрузках проводились С. Н. Яковлевым [165, 167].

На рис. 1.7 приведены зависимости напряжения сжатия от деформации полиуретанов твердостью 65 ShA, 85 ShA и 95 ShA. Рост напряжения для полиуретанов различной твердости меняется с увеличением деформации неодинаково, так что эластичность не может быть оценена в полной мере с помощью модуля Юнга.

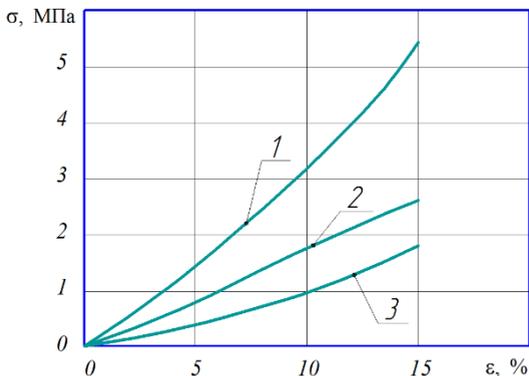


Рис. 1.7. Зависимости напряжения от деформации полиуретанов различной твердости:

- 1 – полиуретан твердостью 95 ShA; 2 – полиуретан твердостью 85 ShA;  
3 – полиуретан твердостью 65 ShA

Приведенные на рис. 1.7 зависимости хорошо описываются зависимостью нагрузка – деформация:

$$F = E_{cm0} \cdot S \left( \frac{1}{\lambda^2} - \lambda \right), \quad (1.1)$$

где  $F$  – нагрузка на образец, Н;

$E_{ст0}$  – начальный модуль упругости при сжатии, Па;

$S$  – площадь поперечного сечения образца, м<sup>2</sup>;

$\lambda = 1 - \delta H$  – отношение высоты деформированного образца к начальной высоте;

$\delta$  – деформация образца, м;

$H$  – начальная высота образца, м.

В процессе эксплуатации рабочего органа из полиуретана за счет сил трения вероятно существенное изменение его температуры. Учитывая, что основным физическим параметром, определяющим деформативность полиуретана, является модуль упругости, С. Н. Яковлевым была построена зависимость модуля упругости от температуры для полиуретанов твердостью 75 ShA, 85 ShA и 95 ShA. Полученные зависимости представлены на рис. 1.8.

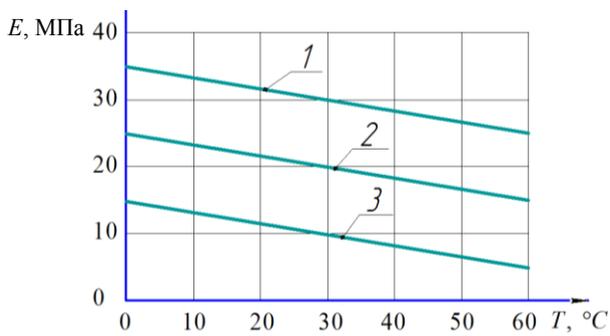


Рис. 1.8. Зависимость модуля упругости полиуретана от температуры:  
1 – полиуретан твердостью 95 ShA; 2 – полиуретан твердостью 85 ShA;  
3 – полиуретан твердостью 65 ShA.

Приведенные на рис. 1.8 зависимости хорошо описываются следующим уравнением:

$$E = 35 - 0,16T - (95 - \text{ShA}), \quad (1.2)$$

где  $E$  – модуль упругости, МПа;

$T$  – температура, °C;

ShA – твердость полиуретана в единицах по Шору.

## 1.6. Обзор исследований морфологических и агробиологических свойств льна

Исследованиям конусности стеблей льна посвящена работа М. М. Ковалева [44]. Им получены эмпирические зависимости общей конусности сухих (влажностью  $W_c = 11,2 \dots 13,7$  %) стеблей льна от диаметра комлевой части (рис. 1.9, а) и технической длины стеблей (рис. 1.9, б):

$$k_c = 0,066d_{\text{кст}} + 0,0002, \quad (1.3)$$

где  $d_{\text{кст}}$  – диаметр комлевой части стеблей льна, м;

$$k_c = -6 \cdot 10^{-8} \cdot l_{\text{ст}} + 0,0018, \quad (1.4)$$

где  $l_{\text{ст}}$  – техническая длина стеблей льна, м.

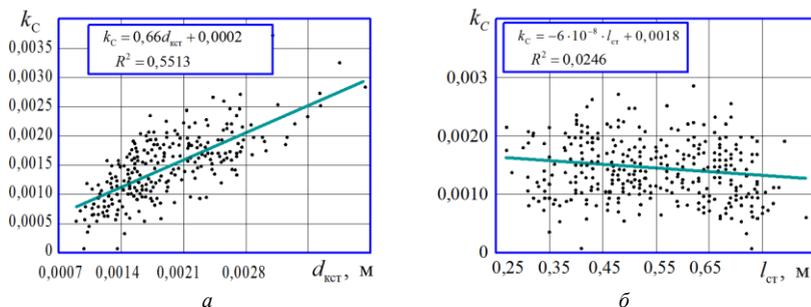


Рис. 1.9. Корреляционное поле общей конусности  $k_c$  стеблей льна и линия тренда ее значений:

а – в зависимости от диаметра комлевой части стеблей  $d_{\text{кст}}$ ;

б – в зависимости от технической длины стебля  $l_{\text{ст}}$ .

В процессе отделения семенной части от стеблей льна обмолачивающим устройством согласно принятой схеме (пункт 1.4) лента стеблей льна подвержена сжатию под действием рабочего органа. Исследования повторных сжатий стеблей льна с чередующимися ослаблениями проводились Г. А. Хайлисом [147]. Им было установлено, что изменения свойств ленты стеблей после прекращения воздействия на нее необратимы. Это обусловлено тем, что стебли не обладают достаточной упругостью [8, 148].

Графическая зависимость изменения давления от степени сжатия при многократном воздействии на ленту льнотресты представлена на рис. 1.10.

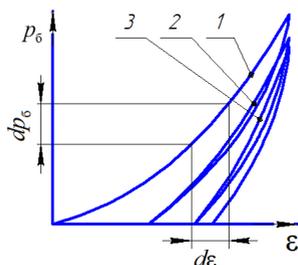


Рис. 1.10. Зависимость  $p_0$  от степени сжатия  $\varepsilon$ :  
1, 2 и 3 – кривые соответственно первого, второго и третьего сжатий

Уравнение для первой кривой сжатия определено как

$$q_c = q_{вг} (e^{a_r \cdot \varepsilon} - 1), \quad (1.5)$$

где  $q_c$  – удельное сопротивление стеблей сжатию, Н/м;

$q_{вг}$  – внутреннее давление, соответствующее начальному прижатию стеблей друг к другу вследствие действия сил тяжести стеблей, сцепления между ними и предварительного их сжатия, Н/м;

$a_r$  – коэффициент, характеризующий свойства стеблей и их начальное состояние;

$\varepsilon$  – относительное сжатие стеблей.

А. Н. Зинцов предложил зависимость для определения влияния угла перекоса  $\xi$  стеблей льна в ленте на плотность  $\rho_{ст}$  ленты льна [35]:

$$\rho_{ст} = \frac{n_{ст}}{L_{л} \cdot L \cdot \cos(\xi)}, \quad (1.6)$$

где  $n_{ст}$  – количество стеблей на участке ленты длиной  $L_{л}$ , ст./м (ленты);

$L_{л}$  – длина участка стеблей льна, м;

$L$  – общая длина стебля льна, м;

$\xi$  – угол перекоса стеблей, град.

Результаты исследований обрывных усилий стеблей льна в стадии полной спелости для различных диаметров стеблей льна, проведенных М. М. Ковалевым, представлены в табл. 1.2 [44].

Таблица 1.2. Значения обрывных усилий стеблей, Н

Диаметр стебля, мм	Участки стебля		
	нижний	средний	верхний
0,7–1,0	20,5–72,6	27,5–75,5	12,8–47,1
1,1–2,0	22,4–79,5	36,7–116,0	22,8–70,6
2,0–2,5	39,2–115,0	65,2–126,0	32,6–92,2

Им установлено, что усилие обрыва стеблей льна-долгунца с увеличением их диаметра возрастает. Это объясняется тем, что с увеличением диаметра стебля возрастают не только поперечное сечение волокон, которое с небольшой погрешностью можно считать пропорциональным диаметру стебля, но и площадь его сердцевины, которая также оказывает сопротивление обрыву [22]. При этом наибольшее обрывное усилие имеет место в средней части стебля, наименьшее – в верхней его части.

Исследованиям разрушения семенных коробочек льна и отрыва их от стебля посвящена работа В. В. Комарова [45]. В табл. 1.3 приведены результаты его исследований по определению усилий разрушения и отрыва семенных коробочек льна в фазе полной спелости.

Таблица 1.3. Усилия разрушения и отрыва семенных коробочек льна при различной их влажности

Показатели	1997 г.					1998 г.							
	28	25	20	16	12	36	31	29	25	22	19	17	16
Влажность, %													
	Усилие разрушения, Н												
Пластины стальные	2,5	2,3	2,2	2,1	2,0	2,6	2,4	2,2	2,1	2,0	1,8	1,6	1,5
Пластины резиновые	2,8	2,5	2,4	2,3	2,1	2,9	2,7	2,4	2,3	2,1	2,1	2,0	2,0
	Усилие отрыва, Н												
Коробочки разрушенные	6,2	5,8	5,7	6,1	5,1	6,6	6,1	5,4	5,0	4,7	4,5	4,1	3,9
Коробочки неразрушенные	8,4	7,6	7,1	6,4	5,5	7,8	7,2	6,8	6,0	5,8	5,5	5,2	4,7

Было установлено, что по мере снижения влажности снижается и усилие разрушения коробочек льна. Усилие отрыва семенной коро-

бочки от стебля по мере снижения влажности изменяется несущественно. Также отмечается, что разрушенная семенная коробочка отрывается легче.

На основании проведенного анализа исследований морфологических и агробиологических свойств льна можно сделать вывод о том, что остается неизученной величина сжатия семенной коробочки льна, которая приводит к ее разрушению и выделению из нее семян. Этот показатель является определяющим в процессе обмолота коробочек льна.

Также неизвестны упругие свойства (относительное удлинение) стеблей льнотресты при растяжении. Согласно принятой схеме обмолачивающего устройства (пункт 1.4) лента стеблей льна подвержена растяжению и изгибу, предельные значения которых возможно установить только экспериментальным путем.

### **1.7. Обзор и анализ исследований процесса отделения семенных коробочек от стеблей льна**

Вопросам научного обоснования технологических процессов и рабочих органов льноуборочных машин, а также исследованиям конструктивных параметров и режимов работы очесывающих и обмолачивающих аппаратов посвящены работы В. П. Горячкина [28], М. И. Шлыкова [160], М. Н. Летошнева [79], П. Ф. Прибыткова [126], Л. Г. Ляднова [85], П. К. Шрамко [162], Г. А. Хайлиса [148], Л. Ю. Гурвича [29], Н. Н. Быкова [15], Н. И. Кленина [43], С. Г. Порфирьева [124], В. Г. Черникова [154], Б. П. Можарова [93], В. В. Комарова [45], А. Н. Зинцова [35], М. М. Ковалева [44], А. Д. Галкина [23], Н. Г. Азовцева [3], А. Н. Кудрявцева [53], Г. А. Райляна [130], W. Bader [168], I. L. Butler [169], K. Kugler [170], W. Thumer [180], G. Wressing [181], A. S. Limont [177].

М. И. Шлыковым [160] установлены основные соотношения между конструктивными и кинематическими параметрами однобарабанного гребневого очесывающего аппарата и свойствами обрабатываемого материала [22].

Им предложена зависимость для определения ширины «активной» зоны очесывающего аппарата колебательного типа, которая должна быть больше или равна ширине зоны расположения коробочек в слое [22]:

$$a = D \frac{L}{l} + q(K - 1), \quad (1.7)$$

где  $a$  – ширина «активной» зоны аппарата, м;

$D$  – диаметр барабана, м;

$L$  – общая длина шатуна с гребнем колебательного аппарата, м;

$l$  – длина части шатуна от поводка до шейки коленчатого вала, м;

$q$  – смещение смежных траекторий гребней в направлении, перпендикулярном плоскости зажимного транспортера, м;

$K$  – число гребней, шт.

По мнению М. И. Шлыкова, ширина гребня (рабочего органа) должна быть больше или равна зоне расположения коробочек в слое стеблей [45, 46]. Им же предложена зависимость для определения числа прочесов  $m$  – основного параметра, характеризующего процесс очеса льна [22]:

$$m = \frac{n \cdot z_{\Gamma} \cdot L_{\Gamma} \cdot \cos(\alpha)}{v_{\text{ТР}}}, \quad (1.8)$$

где  $n$  – частота вращения очесывающего барабана, об/с;

$z_{\Gamma}$  – число гребней, шт.;

$L_{\Gamma}$  – длина гребня, м;

$\alpha$  – угол наклона барабана к зажимному транспортеру, град;

$v_{\text{ТР}}$  – скорость зажимного транспортера, м/с.

Анализируя зависимости (1.7) и (1.8), следует отметить, что они учитывают только конструктивные параметры устройства и не учитывают свойства обрабатываемого материала, такие как ширина ленты льнотресты, зона расположения семенных коробочек в ленте, количество стеблей в одном погонном метре ленты, фаза спелости и влажность стеблей и семенных коробочек.

Уплотняющую способность гребня  $\eta$  и угол  $\beta$  отклонения стеблей зубьями очесывающего аппарата вниз от плоскости ленты М. И. Шлыков рекомендует определять по зависимостям:

$$\eta = \frac{\Psi}{1 - \frac{2 \cdot b}{t_3}}, \quad (1.9)$$

где  $\psi$  – коэффициент, учитывающий увеличение толщины пронизываемого зубьями слоя;

$b$  – половина толщины зуба, м;

$t_3$  – шаг зубьев, м;

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{b \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi)}{L}, \quad (1.10)$$

где  $\beta$  – проекция угла отклонения стебля вниз от первоначального положения на плоскость, проходящую через ось зуба и конечное положение стебля, рад;

$b$  – половина толщины зуба, м;

$\alpha$  – половина угла заострения зуба, рад;

$\varphi$  – угол трения зуба о стебель льна, рад;

$L$  – расстояние от места зажима стебля до оси зуба, м.

Зависимость (1.9) учитывает конструктивные параметры рабочего органа, а также толщину пронизываемого зубьями слоя. Однако она справедлива только для рабочего органа в виде системы параллельно установленных зубьев с одинаковым межзубовым расстоянием и не может быть применена для рабочего органа с зубьями другой конфигурации.

Зависимость (1.10) учитывает конструктивные параметры очесывающих устройств гребневого типа, зубья которых проникают в слой стеблей льна на всю толщину слоя, а отклонение ленты от плоскости зажатия ее транспортером происходит главным образом за счет сил трения обрабатываемого материала с зубьями очесывающего аппарата. При этом зависимость (1.10) не учитывает упругих свойств ленты стеблей льна.

Вышеописанные исследования М. И. Шлыкова расширили и углубили ученые М. Н. Летошнев [79] и Н. И. Кленин [43].

Исследования П. Ф. Прибыткова [126] и П. К. Шрамко [162] посвящены выбору оптимального соотношения скорости зажимного транспортера и очесывающего барабана, а также высоты установки барабана по отношению к плоскости зажимного транспортера [22].

Скорость  $v_{\text{тр}}$  зажимного транспортера и среднюю скорость  $v_{\text{оч}}$  очеса П. Ф. Прибытков рекомендует определять по следующим выражениям [126]:

$$v_{\text{TP}} = \sin(\alpha) \cdot (\sin(\beta) + \cos(\beta)) \cdot R \cdot \frac{n}{15}, \quad (1.11)$$

$$v_{\text{оч}} = \frac{2\pi \cdot R \cdot n \cdot \cos(\beta) \cdot \sin(\beta)}{\beta}, \quad (1.12)$$

где  $\alpha$  – угол наклона оси вала барабана к плоскости зажимного транспортера, рад;

$\beta$  – угол наклона зуба относительно плоскости стеблей, рад;

$R$  – радиус барабана, м;

$n$  – частота вращения очесывающего барабана, с<sup>-1</sup>.

Полученные П. Ф. Прибытковым зависимости (1.11) и (1.12) справедливы для аппаратов с поступательно-круговым движением рабочих органов, однако неприменимы для аппаратов колебательного типа.

П. К. Шрамко были рассмотрены вопросы влияния длины зуба на угол отклонения стеблей зубьями и работу, затрачиваемую на очес [10, 45, 46].

Оптимальное соотношение длины зуба и радиуса барабана, при котором обеспечивается совпадение направления зуба со скоростью, а основание не заходит за плоскость расположения стеблей, П. К. Шрамко рекомендует определять по зависимости [162]

$$\frac{l_3}{R} = \sqrt{\frac{1 - \cos(\beta)}{1 + \cos(\beta)}} = \operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right), \quad (1.13)$$

где  $l_3$  – длина зуба, м;

$R$  – радиус барабана, м;

$\beta$  – угол между осью зуба и перпендикуляром к плоскости стеблей, рад.

Б. П. Можаров [93] продолжил развитие теории барабанного очесывающего аппарата для отделения семенной части урожая льна от стеблей [45, 46]. Им впервые был выведен новый параметр процесса –  $Q$ , характеризующий чистоту очеса гребневым аппаратом независимо от его конструкции [22]:

$$Q = \frac{v_6 \cdot z_6 \cdot z_r \cdot z_3}{200 \cdot \pi \cdot v_{\text{TP}} \cdot R}, \quad (1.14)$$

где  $v_6$  – скорость барабана, м/с;

$z_6$  – число барабанов, шт.;

$z_7$  – число гребней на барабанах, шт.;

$z_3$  – число зубьев на барабанах, шт.;

$v_{TP}$  – скорость зажимного транспортера, м/с;

$R$  – радиус барабана по оси гребней, м.

С. Г. Порфирьев предлагает определять зазор между обмолачивающими элементами вальцового аппарата из условия [125]

$$\delta = d_k - 2,02\sigma_k, \quad (1.15)$$

где  $d_k$  – средний диаметр семенной коробочки, м;

$\sigma_k$  – среднее квадратичное отклонение диаметров коробочек, м.

Из зависимости (1.15) видно, что деформации  $2,02\sigma_k$  достаточно для сжатия и разрушения коробочки льна. Однако зависимость (1.15) не учитывает присутствие в молотильном зазоре стеблей льна, которые, безусловно, оказывают влияние на процесс обмолота.

Г. А. Райлян предлагает определять зазор между обмолачивающими элементами вальцового аппарата по следующей зависимости [130]:

$$\delta = d_k - 2\sqrt[3]{\frac{9N_6^2 \cdot \left(1 + \frac{c_k}{c_6}\right)^2}{16c_k^2 \cdot l^2 \cdot d_k}}, \quad (1.16)$$

где  $d_k$  – диаметр семенной коробочки льна, м;

$N_6$  – сила сжатия семенной коробочки льна, Н;

$c_k$  – модуль объемной упругости коробочки, Н/м<sup>3</sup>;

$c_6$  – модуль объемной упругости обмолачивающего элемента, Н/м<sup>3</sup>;

$l$  – длина участка поверхности коробочки, контактирующей с обмолачивающим элементом, м.

Как видно из зависимости (1.16), величина зазора между обмолачивающими элементами зависит от диаметра коробочки льна, силы сжатия коробочки ими и модулей объемной упругости коробочки и обмолачивающих элементов.

Г. А. Хайлис [146] предложил методику определения ширины «активной» зоны очесывающего аппарата в зависимости от ширины зоны расположения семенных коробочек в стеблестое, растянутости ленты и

неточности подачи ее в очесывающий аппарат и определил, что ширина «активной» зоны должна составлять 0,65 м [45, 46].

Л. Г. Лядновым [85] подробно изучены вопросы силового взаимодействия рабочих органов гребневого очесывающего аппарата со стеблями льна и определено усилие, действующее на зуб при очесе [22].

Экспериментальные исследования технологических и энергетических показателей однобарабанных гребневых очесывающих аппаратов изложены также в работах И. В. Баранова [13], Н. А. Смирнова [138], А. Н. Зинцова [35] и др.

С. Г. Порфирьевым [124] выполнены теоретические и экспериментальные исследования влияния профиля зубьев, способа их расстановки и частоты вращения барабана на технологические показатели процесса очеса.

Л. Н. Панфиловой [111] и Б. П. Можаровым [93] проведены теоретические исследования причин образования путаницы и намоток стеблей на барабаны [22].

## **Выводы**

1. В результате проведенного анализа существующих технологий уборки льна установлено, что наиболее эффективной является заводская технология уборки льна, включающая в себя проведение отделения семенной части от стеблей льнотресты на льнозаводах в линиях первичной переработки льна. Заводская технология позволяет начать уборку льна на 10–12 дней раньше, снизить потери семян на 7–9 %, повысить номерность льнотресты и соответственно льноволокна, снизить прямые эксплуатационные затраты на 10–15 % [9, 67].

2. Анализ известных конструкций аппаратов и существующих способов отделения коробочек от стеблей льна позволяет сделать вывод о том, что наиболее эффективным, с учетом физико-механических свойств стеблей льнотресты, подаваемых на обмолот в линии первичной переработки, является комбинированное воздействие рабочих органов на обрабатываемый материал. Наиболее полное и качественное отделение семенной части от стеблей льнотресты может быть достигнуто путем сочетания очесывающего и плющильного воздействия. Наиболее полно этому требованию отвечает аппарат с кривошипно-шатунным приводом и коромыслом, обеспечивающим движение эластичного рабочего органа по эллипсоидной кривой, и сепарирующей

решеткой (декой), обеспечивающей противоудар и сепарацию обмолаченной массы [11, 52].

3. Для повышения эффективности отделения семенной части от стеблей в линии первичной переработки льна предложена конструктивно-технологическая схема обмолачивающего аппарата с эластичным рабочим органом очесывающе-плющильного воздействия на обрабатываемый материал. Такая конструкция аппарата позволит увеличить степень обмолота лент льнотресты, уменьшить травмирование семян, сократить общие потери семян, снизить повреждение стеблей льнотресты, влияющее на отход их в путанину и выход длинного волокна [113, 115, 143].

4. Анализ теоретических исследований показывает, что полученные разными учеными аналитические зависимости, описывающие процесс отделения коробочек от стеблей льна, применимы в основном для рабочих органов, имеющих твердую рабочую поверхность. Теоретических исследований взаимодействия эластичной поверхности с лентой льнотресты при отделении коробочек недостаточно. Поэтому вопрос исследования взаимодействия эластичных рабочих органов с обрабатываемой лентой льнотресты в процессе отделения коробочек в условиях переработки льнотресты на льнозаводах является актуальным.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОЧЕСЫВАЮЩЕ-ПЛОЩИЛЬНОГО АППАРАТА ЛИНИИ ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЛЬНА

Взяв за основу предложенную схему очесывающе-плющильного аппарата (см. рис. 1.7), произведем теоретические исследования рабочего процесса.

Лента 2 стеблей льна, удерживаемых зажимным транспортером 1 (рис. 2.1), перемещается в зоне обмолота, в нижней части которой жестко закреплена сепарирующая решетка (дека) 5, а в верхней части расположен кривошипный механизм с коромыслом, обеспечивающий движение эластичного рабочего органа (бича) 3 по криволинейной траектории 4. Движение бича 3 происходит вдоль стеблей 2 по направлению от зажимного транспортера к их верушкам.

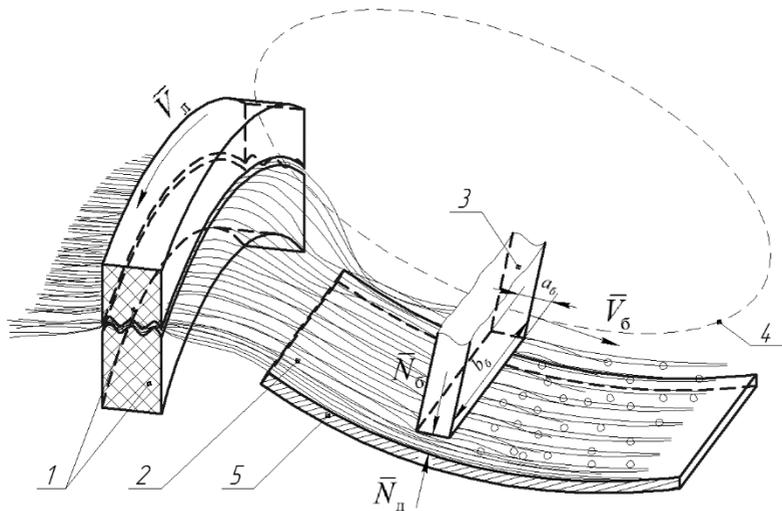


Рис. 2.1. Схема рабочего процесса обмолачивающего устройства:  
1 – зажимной транспортер; 2 – стебли льна; 3 – эластичный рабочий орган (бич);  
4 – траектория движения рабочего органа; 5 – сепарирующая решетка (дека)

Обмолот происходит при рабочем ходе бича, который начинается с момента воздействия бича на ленту льнотресты и заканчивается при проходе вершин стеблей. Зона взаимодействия рабочего органа со

стеблями характеризуется площадью, размер которой зависит от ширины бича  $b_6$ , конструктивных параметров рычажного механизма привода рабочего органа, геометрии и жесткости деки. При этом бич может производить несколько воздействий на стебли, количество которых определяется соотношением скоростей движения ленты стеблей  $v_{\text{л}}$  и эластичного рабочего органа  $v_6$ . Производительность процесса обмолота и его качество зависят от размеров зоны взаимодействия и интенсивности воздействия эластичного бича на материал.

Интенсивность воздействия рабочего органа на стебли льнотресты зависит от времени нахождения единицы объема материала в зоне воздействия. Эффективность обмолота существенно зависит от степени сжатия обмолачиваемых стеблей в пространстве между бичом и сепарирующей решеткой (декой).

На основании вышеизложенного выдвинем гипотезу о том, что качество обмолота коробочек льна зависит от конструктивных, кинематических параметров обмолачивающего устройства и технологических свойств объекта обмолота, поэтому их теоретическое изучение является важной задачей при обосновании конструкции и создании опытного образца.

В данной главе необходимо решить следующие задачи:

- определить площадь и объем зоны взаимодействия бича с обмолачиваемым материалом;
- установить закономерности деформации коробочки льна при ее сжатии между бичом и декой, определить проекции точек поверхности семенной коробочки льна при ее сжатии;
- обосновать размер молотильного зазора между бичом и декой;
- обосновать параметры эластичного рабочего органа (бича);
- определить траекторию движения бича;
- обосновать скорость зажимного транспортера обмолачивающего устройства;
- обосновать геометрию поверхности деки и параметры ее расположения относительно зажимного транспортера и рабочего органа.

## **2.1. Определение площади и объема зоны воздействия бича на обмолачиваемый материал**

Лента льнотресты при обмолоте удерживается зажимным транспортером на участке  $L_{\text{зт}}$  (рис. 2.2, а) на расстоянии  $L_{\text{кс}}$  от корней. При обмолоте на участке  $L_{\text{ст}}$  происходит воздействие рабочего органа

(бича) на стебли льна, а между участками  $L_{\text{зт}}$  и  $L_{\text{ст}}$  образуется не подвергаемый воздействию рабочего органа участок  $L_{\text{мз}}$  – «мертвая» зона. На участке ленты льнотресты  $L_{\text{ст}}$  располагаются семенные коробочки, которые необходимо отделить от стеблей или разрушить обмолачивающим устройством. Для эффективной работы обмолачивающего устройства участок  $L_{\text{ст}}$  должен быть больше зоны расположения семенных коробочек в ленте стеблей льна.

Согласно агробиологическим и морфологическим характеристикам льна-долгунца стебли у его комлевой части в 2–4,5 раза толще, чем у верхушечной его части [44]. В связи с этим лента льнотресты имеет неодинаковую толщину по ширине, уменьшающуюся к верхушечной части стеблей. При этом толщина ленты стеблей  $h_{\text{к}}$  в начале взаимодействия бича с лентой льнотресты  $M_1$  больше, чем толщина в ее верхушечной части  $h_{\text{в}}$  (рис. 2.2, б).

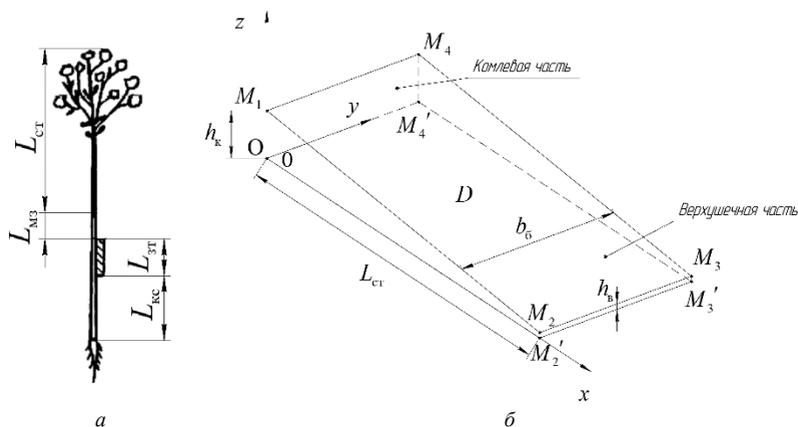


Рис. 2.2. Схема к определению площади и объема зоны воздействия бича на ленту льнотресты:

- $a$  – характерные участки стебля льна при обмолаоте;
- $b$  – фрагмент ленты льнотресты, соответствующий зоне воздействия;
- $L_{\text{кс}}$  – комлевая часть стебля;  $L_{\text{зт}}$  – участок стебля в зажимном транспортере;
- $L_{\text{мз}}$  – «мертвая» зона;  $L_{\text{ст}}$  – участок стебля, подвергаемый воздействию бича

Выделим на ленте стеблей участок, который будет находиться под воздействием эластичного бича шириной  $b_{\text{б}}$ . При этом будем предполагать, что зажимной транспортер движется с постоянной скоростью  $v_{\text{тр}}$ ,

а бич совершает свое воздействие на стебли с частотой  $n_6$  и периодом  $T_6$  (время воздействия на ленту льнотресты).

Определим площадь и объем зоны воздействия эластичного рабочего органа на материал. Для этого в системе координат  $Oxuz$  (рис. 2.2, б) рассмотрим участок ленты стеблей шириной  $b_6$ , длиной  $L_{ст}$  (расстояние от точки зажима стеблей до их верхушечной части), толщиной у комлевой части  $h_к$ , а у верхушечной части  $h_в$ .

Тогда площадь зоны воздействия будет представлять собой площадь прямоугольника  $M_1M_2M_3M_4$ , а объем ее будет соответствовать объему фигуры  $OM_2'M_3'M_4'M_1M_2M_3M_4$ , где  $O(0; 0; 0)$ ;  $M_1(0; 0; h_к)$ ;  $M_2(L_{ст}; 0; h_в)$ ;  $M_3(L_{ст}; b_6; h_в)$ ;  $M_4(0; b_6; h_к)$ ;  $M_2'(L_{ст}; 0; 0)$ ;  $M_3'(L_{ст}; b_6; 0)$ ;  $M_4'(0; b_6; 0)$ .

Площадь прямоугольника  $M_1M_2M_3M_4$  определим по уравнению

$$S_{p.з} = \left| \overrightarrow{M_1M_2} \right| \cdot \left| \overrightarrow{M_1M_4} \right| =$$

$$= \left| \begin{array}{c} \overrightarrow{M_1M_4}(0; b_6; 0) \\ \left| \overrightarrow{M_1M_4} \right| = b_6 \\ \overrightarrow{M_1M_2}(L_{ст} - 0; 0 - 0; h_в - h_к) \\ \left| \overrightarrow{M_1M_2} \right| = \sqrt{L_{ст}^2 + (h_в - h_к)^2} \end{array} \right| = b_6 \cdot \sqrt{L_{ст}^2 + (h_в - h_к)^2}. \quad (2.1)$$

Таким образом, площадь зоны материала, находящегося под периодическим воздействием эластичного рабочего органа, характеризуется шириной рабочего органа, длиной стеблей и толщиной ленты льнотресты.

Получим модель этой зоны, т. е. опишем плоскость  $M_1M_2M_3M_4$  уравнением. Для этого воспользуемся уравнением плоскости, проходящей через три заданные точки  $M_1(x_{M_1}; y_{M_1}; z_{M_1})$ ;  $M_2(x_{M_2}; y_{M_2}; z_{M_2})$ ;  $M_4(x_{M_4}; y_{M_4}; z_{M_4})$ :

$$\left| \begin{array}{ccc} x - x_{M_1} & y - y_{M_1} & z - z_{M_1} \\ x_{M_2} - x_{M_1} & y_{M_2} - y_{M_1} & z_{M_2} - z_{M_1} \\ x_{M_4} - x_{M_1} & y_{M_4} - y_{M_1} & z_{M_4} - z_{M_1} \end{array} \right| = 0. \quad (2.2)$$

В нашем случае, когда  $M_1(0; 0; h_k)$ ;  $M_2(L_{ct}; 0; h_b)$ ;  $M_4(0; b_6; h_k)$ , уравнение (2.2) переписывается в виде

$$\begin{vmatrix} x & y & z - h_k \\ L_{ct} & 0 & h_b - h_k \\ 0 & b_6 & 0 \end{vmatrix} = 0. \quad (2.3)$$

Отдельно вычислим определитель левой части уравнения (2.3), разложив его по первой строке:

$$\begin{aligned} & \begin{vmatrix} x & y & z - h_k \\ L_{ct} & 0 & h_b - h_k \\ 0 & b_6 & 0 \end{vmatrix} = \\ & = x \cdot \begin{vmatrix} 0 & h_b - h_k \\ b_6 & 0 \end{vmatrix} - y \cdot \begin{vmatrix} L_{ct} & h_b - h_k \\ 0 & 0 \end{vmatrix} + (z - h_k) \cdot \begin{vmatrix} L_{ct} & 0 \\ 0 & b_6 \end{vmatrix} = \\ & = x \cdot (0 - b_6 \cdot (h_b - h_k)) + (z - h_k) \cdot (L_{ct} \cdot b_6 - 0) = \\ & -b_6 \cdot (h_b - h_k) \cdot x + L_{ct} \cdot b_6 \cdot (z - h_k) = b_6 \cdot (h_b - h_k) \cdot x + L_{ct} \cdot b_6 \cdot (z - h_k). \end{aligned} \quad (2.4)$$

Тогда уравнение плоскости верхнего слоя ленты стеблей, взаимодействующего с бичом, опишется равенством

$$b_6 \cdot (h_b - h_k) \cdot x + L_{ct} \cdot b_6 \cdot (z - h_k) = 0. \quad (2.5)$$

Разделим обе части уравнения (2.5) на величину  $b_6$ , тогда уравнение плоскости верхнего слоя ленты стеблей, взаимодействующего с бичом, примет вид

$$(h_b - h_k) \cdot x + L_{ct} \cdot (z - h_k) = 0. \quad (2.6)$$

Согласно принятым параметрам ( $L_{ct} = 0,45$  м,  $d_{kct} = 0,002$  м,  $n_{ct} = 25$  шт. и  $b_6 = 0,4$  м) толщина слоя стеблей в комлевой части составит:  $h_k = n_{ct} \cdot d_{kct} = 0,05$  м.

Конусность стебля льна определим по зависимости, полученной М. М. Ковалевым [44]:  $k_c = 0,66 \cdot d_{kct} + 0,0002 = 0,00152$ . С учетом конусности и длины стеблей льна, подверженных воздействию рабочего органа, величина диаметра верхушечной части стебля составит:

$d_{вст} = d_{вст} - k_c \cdot L_{ст} = 0,00132$  м. Толщина слоя стеблей в верхушечной части  $h_b = n_{ст} \cdot d_{вст} = 0,0329$  м.

Площадь зоны материала, находящегося под периодическим воздействием эластичного рабочего органа, согласно уравнению (2.1) составит:

$$S_{p.з} = b_6 \cdot \sqrt{L_{ст}^2 + (h_b - h_k)^2} = 0,18013 \quad \text{м}^2 \quad \text{или}$$

$$S_{p.з} = \sqrt{1 + k_c^2} \cdot L_{ст} \cdot b_6 = 0,18 \quad \text{м}^2.$$

Определим объем зоны воздействия рабочего органа на материал. Из математики [18] известно, что

$$V = \iint_D z(x; y) dx dy, \quad (2.7)$$

где  $z(x; y)$  – функция, определяющая поверхность, ограничивающую тело искомого объема сверху;

$D$  – замкнутая область, в которую проецируется объемное тело на плоскость  $xOy$ .

В нашем случае тело  $OM_2'M_3'M_4'M_1M_2M_3M_4$  ограничивается сверху плоскостью  $M_1M_2M_3M_4$ , которая описывается уравнением (2.6) и проецируется на плоскость  $xOy$  в прямоугольник  $OM_2'M_3'M_4'$ . Поэтому чтобы реализовать формулу (2.7), из формулы (2.6) выразим переменную  $z$ :

$$L_{ст} (z - h_k) = (h_b - h_k) \cdot x; \quad z = \frac{(h_b - h_k) \cdot x}{L_{ст}} + h_k \Rightarrow$$

$$z(x; y) = \frac{h_b - h_k}{L_{ст}} \cdot x + h_k. \quad (2.8)$$

Тогда под воздействием рабочего органа будет находиться объем стеблей

$$V_{p.з} = \int_0^{b_6} dy \cdot \int_0^{L_{ст}} \left( \frac{h_b - h_k}{L_{ст}} \cdot x + h_k \right) dx = [y]_0^{b_6} \cdot \left[ \frac{h_b - h_k}{L_{ст}} \cdot \frac{x^2}{2} + h_k \cdot x \right]_0^{L_{ст}} =$$

$$= b_6 \cdot \left( \frac{L_{ст} \cdot (h_b - h_k)}{2} + h_k \cdot L_{ст} \right) = \frac{b_6 \cdot L_{ст} \cdot (h_b - h_k)}{2}. \quad (2.9)$$

Пример расчета параметров слоя стеблей льнотресты, находящегося в зоне обмолота, согласно принятым параметрам в математическом пакете MathCad приведен на рис. 2.3 и 2.4.

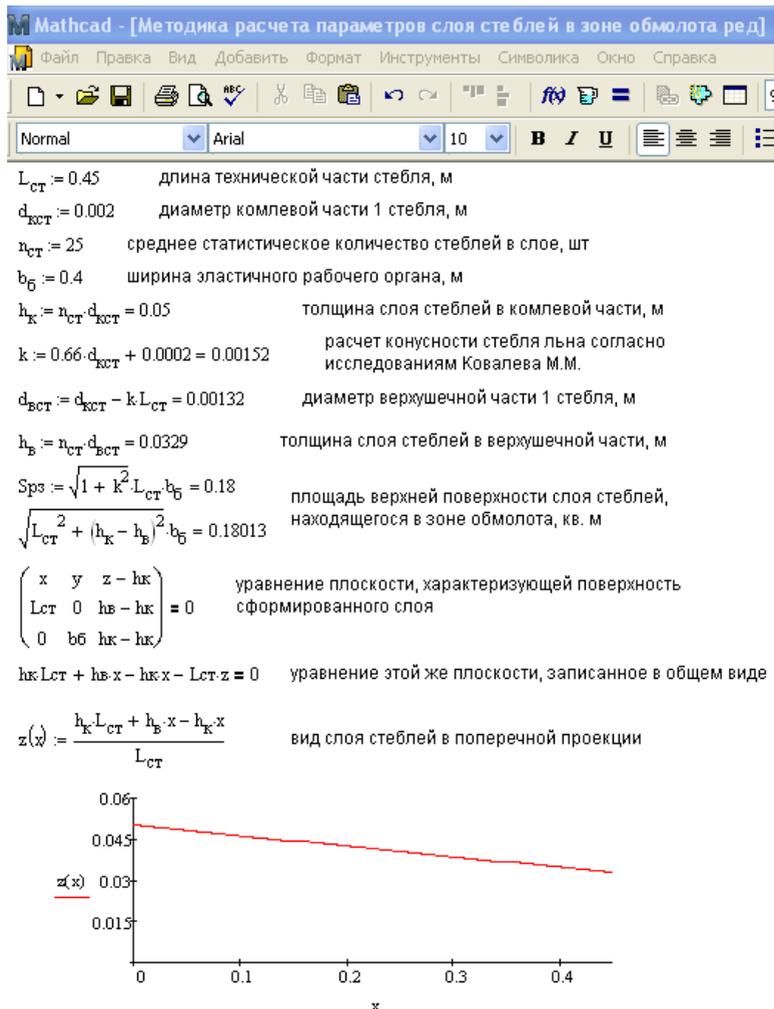
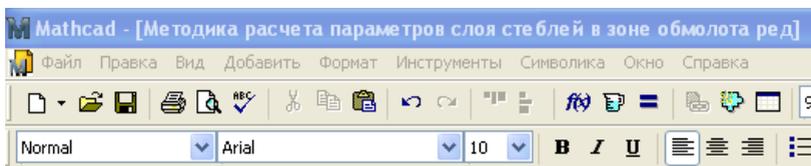


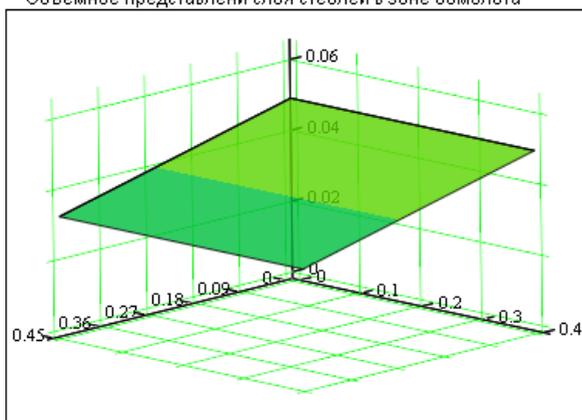
Рис. 2.3. Блок исходных данных, расчетная часть и графическое представление поперечного сечения слоя стеблей льна в зоне обмолота, реализованные в математическом пакете MathCad



$$z(x, y) := \frac{h_k \cdot L_{ст} + (h_b - h_k) \cdot x}{L_{ст}}$$

функция двух переменных, которая определяет верхнюю поверхность слоя стеблей в зоне обмолота

Объемное представлени слоя стеблей в зоне обмолота



$$V := \int_0^{h_b} 1 \, dy \cdot \int_0^{L_{ст}} \frac{h_k \cdot L_{ст} + h_b \cdot x - h_k \cdot x}{L_{ст}} \, dx$$

вычисление объема слоя стеблей в камере обмолота через двойной интеграл, куб. м.

значение этого объема, куб. м.

$$V = 0.00746$$

или  $V1 := \frac{h_b \cdot L_{ст} (h_b + h_k)}{2} = 0.00746$  вычисление объема слоя через параметры слоя, куб. м.

Рис. 2.4. Блок расчетной части и графическое представление объема слоя стеблей в зоне обмолота, реализованные в математическом пакете MathCad

Модель (2.9) позволяет определить объем слоя стеблей льнотресты в зоне обмолота с учетом ширины эластичного рабочего органа при изменяющихся параметрах ленты, таких как участок стебля  $L_{ст}$  и толщина слоя стеблей в верхушечной  $h_b$  и комлевой  $h_k$  ее частях.

## 2.2. Моделирование деформации коробочки льна при ее сжатии между бичом и декой

Чтобы смоделировать сжатие коробочки льна, сделаем ее привязку к пространственной системе координат  $Oxyz$  (рис. 2.5). При этом коробочку льна будем рассматривать в виде шара диаметром  $d_k$ , касающегося своей нижней точкой центра  $O$  выбранной системы координат. Выбор точки касания обуславливается тем, что именно она не меняет свои координаты в результате деформации. Тогда коробочка льна в выбранной системе координат будет описываться уравнением

$$x^2 + y^2 + \left(z - \frac{d_k}{2}\right)^2 = \left(\frac{d_k}{2}\right)^2. \quad (2.10)$$

Введем обозначения:

$\Delta$  – зазор между бичом и декой, м;

$\Delta_{kx}$ ,  $\Delta_{ky}$ ,  $\Delta_{kz}$  – деформации коробочки льна в направлении осей координат соответственно  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$ , м;

$\Delta_5$  – деформация эластичного рабочего органа при взаимодействии с коробочкой льна, м.

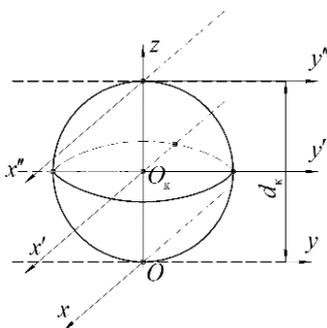


Рис. 2.5. Схема привязки коробочки льна к пространственной системе координат

Деформацию коробочки льна между бичом и декой рассмотрим как сжатие пластичного круглого тела при смещении вниз его верхней части плоскостью. Выдвинем при этом следующие допущения:

1) в связи с небольшими размерами коробочки принимаем поверхности воздействующих на нее элементов в виде плоскостей;

2) площади воздействующих плоскостей намного больше поверхности коробочки льна;

3) деформации шара в направлении осей  $Ox$  и  $Oy$  одинаковые ( $\Delta_{кx} = \Delta_{кy}$ );

4) деформация коробочки льна при условии ее неразрушения происходит без растяжения ее оболочки и изменения объема.

Тогда целесообразно рассмотреть три случая состояния коробочки льна (рис. 2.6) между подвижной эластичной плоскостью – плоскостью бича (на рисунке – сверху) и неподвижной жесткой плоскостью – плоскостью деки (на рисунке – снизу):

1)  $d_k < \Delta$  – сжатия и деформации коробочки не происходит;

2)  $d_k = \Delta$  – момент фиксации коробочки льна между рассматриваемыми плоскостями;

3)  $d_k < \Delta$  – состояние коробочки льна, при котором происходит активное ее сжатие и деформация.

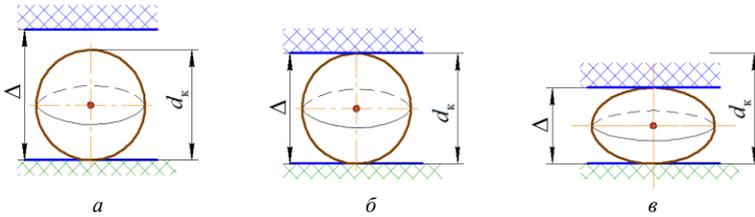


Рис. 2.6. Состояния коробочки льна между плоскостью бича и деки:

$a - d_k < \Delta$ ;  $b - d_k = \Delta$ ;  $v - d_k < \Delta$

Так как с точки зрения деформации коробочки льна нам интересен третий случай, то рассмотрим его подробнее. В этом случае форма коробочки из шаровидной приобретает форму эллипсоида с полуосями

$\frac{d_k}{2} + \Delta_{кx} (Ox)$ ,  $\frac{d_k}{2} + \Delta_{кy} (Oy)$  и  $\frac{d_k}{2} + \Delta_{кz} (Oz)$  и центром, смещенным в

точку  $O'_k \left( 0; 0; \frac{d_k - \Delta_{xz}}{2} \right)$ . Уравнение такого эллипсоида будет иметь

вид

$$\frac{x^2}{\left(\frac{d_k + \Delta_{kx}}{2}\right)^2} + \frac{y^2}{\left(\frac{d_k + \Delta_{ky}}{2}\right)^2} + \frac{\left(z - \left(\frac{d_k - \Delta_{kz}}{2}\right)\right)^2}{\left(\frac{d_k - \Delta_{kz}}{2}\right)^2} = 1. \quad (2.11)$$

Согласно рис. 2.7 связь между диаметром  $d_k$  коробочки льна, зазором  $\Delta$  между сжимающимися плоскостями, деформацией  $\Delta_{kz}$  по оси  $Oz$  и деформацией  $\Delta_b$  эластичного рабочего органа будет иметь следующий вид:

$$d_k = \Delta + \Delta_{kz} + \Delta_b; \quad (2.12)$$

$$\Delta = d_k - \Delta_{kz} - \Delta_b; \quad (2.13)$$

$$\Delta_{kz} = d_k - \Delta - \Delta_b. \quad (2.14)$$

Для того чтобы получить уравнение деформируемой поверхности коробочки льна при фиксированных значениях  $\Delta$  и  $\Delta_b$ , определим ее деформации в направлении осей координат:  $\Delta_{kx}$ ,  $\Delta_{ky}$ ,  $\Delta_{kz}$ . Для этого рассмотрим следующую схему (рис. 2.7).

Из схемы (рис. 2.7) видно, что при сжатии коробочки льна в зазоре  $\Delta$  и деформации бича  $\Delta_b$  точка  $B'(0; 0; d_k)$  переходит в точку  $B(0; 0; d_k - \Delta_{kz})$ , а точка  $D\left(\frac{d_k}{2}; 0; \frac{d_k}{2}\right)$  – в точку  $D\left(\frac{d_k + \Delta_{kx}}{2}; 0; \frac{d_k - \Delta_{kz}}{2}\right)$ . Векторы  $\overline{B'B}$  и  $\overline{D'D}$  определяют деформации соответствующих точек поверхности коробочки льна. Поэтому  $\overline{B'B} = \overline{D'D}$  из условия ее пластичности.

Значения  $\Delta_{kx}$  и  $\Delta_{ky}$  можно найти из условия неизменности объемов шара и эллипсоида.

Согласно [48]

$$V_{ш} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3, \quad (2.15)$$

$$V_{эл} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot a \cdot b \cdot c, \quad (2.16)$$

где  $R$  – радиус шара, в нашем случае  $R = d_k/2$ ;  
 $a, b, c$  – полуоси эллипсоида,  $a = b = d_k/2 + \Delta_{кз}$ ;  $c = d_k/2 - \Delta_{кз}/2$ .

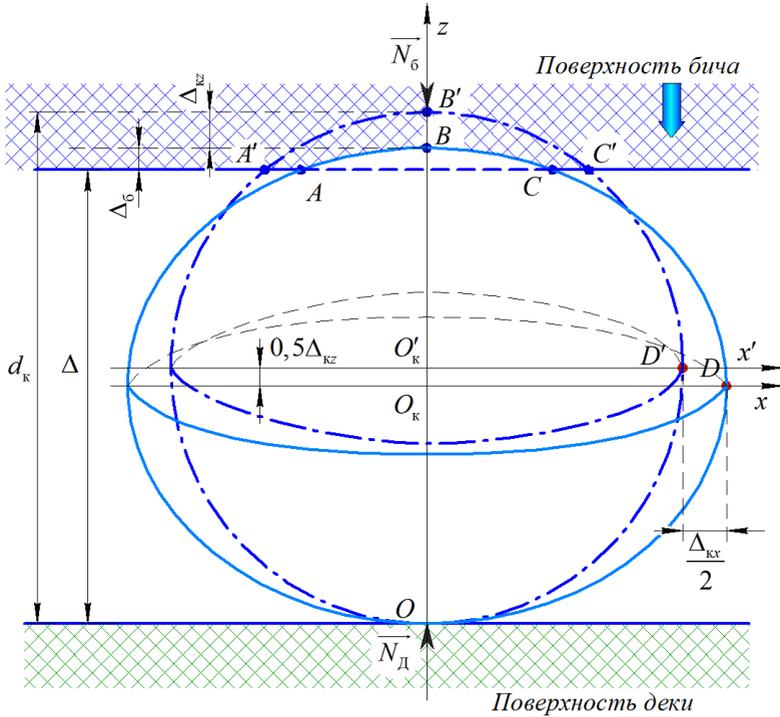


Рис. 2.7. Схема к определению деформации коробочки льна при ее сжатии между бичом и декой

Получим равенство

$$\left(\frac{d_k}{2}\right)^3 = \left(\frac{d_k + \Delta_{кз}}{2}\right)^2 \cdot \left(\frac{d_k - \Delta_{кз}}{2}\right). \quad (2.17)$$

Из равенства (2.17) выразим  $\Delta_{\text{кx}}$ :

$$\left(\frac{d_{\text{к}} + \Delta_{\text{кx}}}{2}\right)^2 = \frac{d_{\text{к}}^3}{8} \cdot \frac{2}{d_{\text{к}} - \Delta_{\text{кz}}},$$

$$\frac{(d_{\text{к}} + \Delta_{\text{кx}})^2}{4} = \frac{d_{\text{к}}^3}{4 \cdot (d_{\text{к}} - \Delta_{\text{кz}})},$$

$$d_{\text{к}} + \Delta_{\text{кx}} = \pm \sqrt{\frac{d_{\text{к}}^3}{d_{\text{к}} - \Delta_{\text{кz}}}}. \quad (2.18)$$

Так как  $d_{\text{к}} + \Delta_{\text{кx}} > 0 \Rightarrow d_{\text{к}} + \Delta_{\text{кx}} = \sqrt{\frac{d_{\text{к}}^3}{d_{\text{к}} - \Delta_{\text{кz}}}}$ . (2.19)

Равенство (2.19) можно переписать в виде

$$d_{\text{к}} + \Delta_{\text{кx}} = d_{\text{к}} \sqrt{\frac{d_{\text{к}}}{d_{\text{к}} - \Delta_{\text{кz}}}}. \quad (2.20)$$

Выразим из формулы (2.20)  $\Delta_{\text{кx}}$ :

$$\Delta_{\text{кx}} = d_{\text{к}} \sqrt{\frac{d_{\text{к}}}{d_{\text{к}} - \Delta_{\text{кz}}} - d_{\text{к}}},$$

или

$$\Delta_{\text{кx}} = d_{\text{к}} \left( \sqrt{\frac{d_{\text{к}}}{d_{\text{к}} - \Delta_{\text{кz}}} - 1} \right). \quad (2.21)$$

Тогда математическая модель поверхности коробочки льна при деформации для заданных значений  $\Delta$  и  $\Delta_{\delta}$  будет иметь вид

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{(z-c)^2}{c^2} = 1, \quad (2.22)$$

где  $a, b, c$  – полуоси эллипсоида;

$$a = b = \frac{d_k}{2} + d_k \left( \sqrt{\frac{d_k}{d_k - \Delta_{kz}}} - 1 \right);$$

$$c = \frac{d_k - \Delta_{kz}}{2}.$$

Приведем пример расчета деформации коробочки льна при ее сжатии между бичом и декой в математическом пакете MathCad (рис. 2.8).

Предположим, что диаметр семенной коробочки льна, находящейся в молотильном зазоре между бичом и декой,  $d_k = 0,005$  м, а деформация по оси  $Oz$   $\Delta_{kz} = 0,001$  м согласно [151].

Деформация семенной коробочки льна по осям  $Ox$  и  $Oy$  согласно уравнению (2.21) составит:

$$\Delta_{kx} = d_k \left( \sqrt{\frac{d_k}{d_k - \Delta_{kz}}} - 1 \right) = 0,00059 \text{ м.}$$

При этом объемы шара и эллипсоида будут равны  $6,545 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3$ .

Уравнение (2.21) позволяет определить деформации семенной коробочки льна  $\Delta_{kx}$  и  $\Delta_{ky}$  при ее сжатии между бичом и декой в зависимости от  $\Delta_{kz}$  и диаметра коробочки  $d_k$ . При этом величина  $\Delta_{kz}$  значительно больше величин  $\Delta_{kx}$  и  $\Delta_{ky}$ .

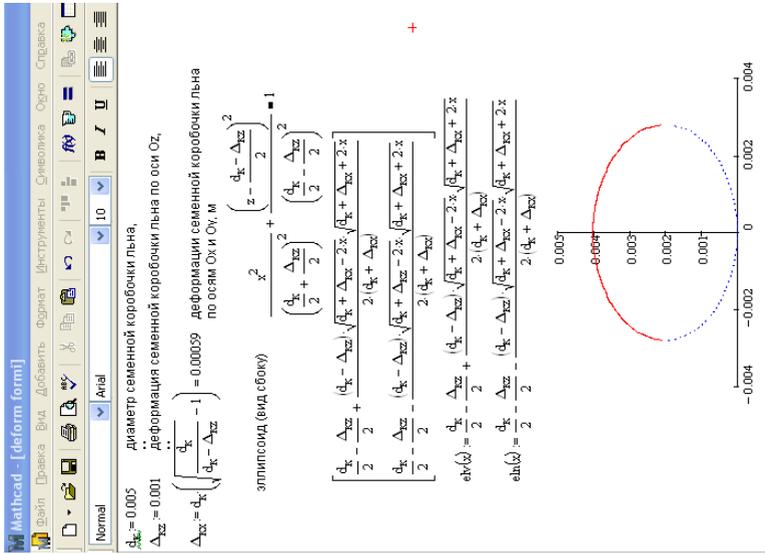
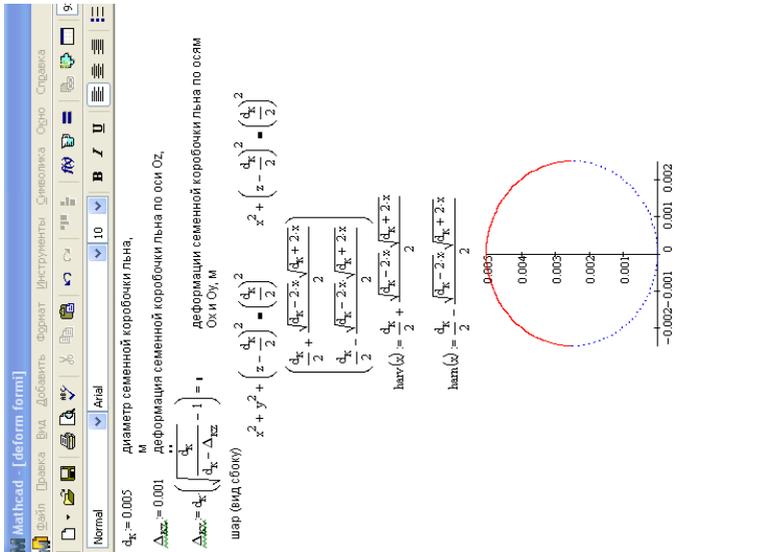


Рис. 2.8. Блок исходных данных и расчетной части в математическом пакете MathCad деформации коробочки льна при ее сжатии между бичом и декой

Совмещение формы коробочки льна до и после сжатия (вид сбоку) показано на рис. 2.9.

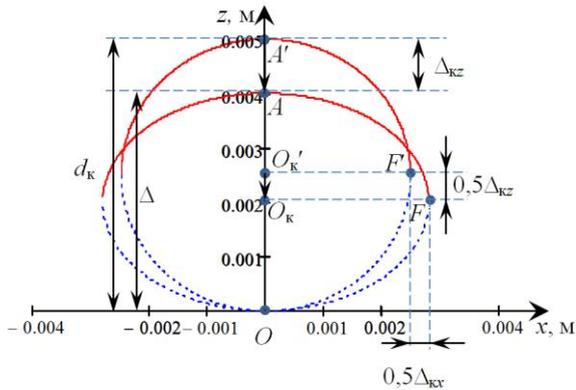


Рис. 2.9. Совмещение формы коробочки льна до и после сжатия (вид сбоку)

Из рис. 2.9 видно, что в процессе деформации коробочка льна изменяет свою форму из шаровидной в эллипсоидную, при этом происходит смещение центра коробочки из точки  $O_k'$  в точку  $O_k$  на величину  $0,5\Delta_{kz}$ .

### 2.3. Определение изменений координат точек поверхности семенной коробочки льна при ее сжатии

Проанализируем деформацию семенной коробочки льна при ее сжатии на основании изменения проекций векторов деформации. Для этого рассмотрим идеализированную модель, при которой, сжимаемая коробочка льна плоскостью на величину  $\Delta_{kz}$  вдоль вертикальной оси симметрии, точки ее поверхности осуществляют переход на поверхности некоторого эллипсоида. Будем считать, что до разрушения коробочки смещение точек горизонтального сечения, располагающихся на ее поверхности, происходит симметрично вертикальной оси при одинаковых значениях векторов деформации, т. е.

$$|\vec{\Delta}_i| = \sqrt{\Delta_{xi}^2 + \Delta_{yi}^2 + \Delta_{zi}^2} = \text{const} . \quad (2.23)$$

Для того чтобы проанализировать пространственные деформации семенной коробочки льна при сжатии, представим ее в виде шара с центром в точке  $O_k(0; 0; 0)$  и диаметром  $d_k$ . Тогда уравнение такого шара примет вид

$$x^2 + y^2 + z^2 = \frac{d_k}{4}. \quad (2.24)$$

В точку  $O_k$  поместим и центр эллипсоида с полуосями:  $\frac{d_k}{2} + \frac{\Delta_{kx}}{2}$  по оси  $O_kx$ ;  $\frac{d_k}{2} + \frac{\Delta_{ky}}{2}$  по оси  $O_ky$ ;  $\frac{d_k}{2} - \frac{\Delta_{kz}}{2}$  по оси  $O_kz$ , который представляет собой геометрическую модель деформируемой коробочки. Математическое уравнение такой поверхности будет иметь вид

$$\frac{x^2}{\left(\frac{d_k + \Delta_{kx}}{2}\right)^2} + \frac{y^2}{\left(\frac{d_k + \Delta_{ky}}{2}\right)^2} + \frac{z^2}{\left(\frac{d_k - \Delta_{kz}}{2}\right)^2} = 1, \quad (2.25)$$

где  $\Delta_{kx}$ ,  $\Delta_{ky}$ ,  $\Delta_{kz}$  – деформации шара в направлениях осей пространственной декартовой системы координат, м.

Ввиду того что при сжатии семенная коробочка не ограничена с боков, смещения поверхностных ее точек в направлениях осей  $O_kx$  и  $O_ky$  плоскости  $xO_ky$  на поверхность эллипсоида примем одинаковыми:  $\Delta_{kx} = \Delta_{ky}$ . При этом уравнение эллипсоида запишется в виде

$$\frac{x^2}{\left(\frac{d_k + \Delta_{kx}}{2}\right)^2} + \frac{y^2}{\left(\frac{d_k + \Delta_{ky}}{2}\right)^2} + \frac{z^2}{\left(\frac{d_k - \Delta_{kz}}{2}\right)^2} = 1. \quad (2.26)$$

В этом случае сечения рассматриваемых поверхностей в плоскостях  $xO_kz$ ,  $yO_kz$ ,  $xO_ky$  можно представить в следующем виде (рис. 2.10).

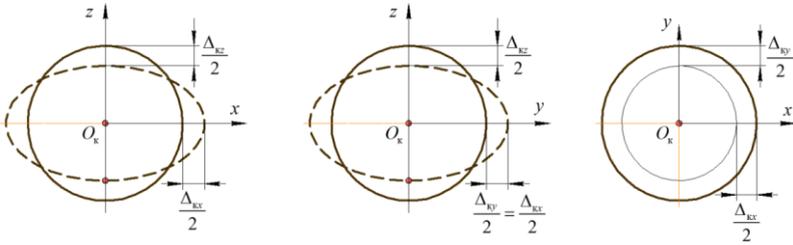


Рис. 2.10. Сечения коробочки льна в плоскостях  $xO_kz$ ,  $yO_kz$ ,  $xO_ky$

Определим величину деформации семенной коробочки в некоторой точке  $O(0; 0; d_k/2)$ , в которой сжимающая плоскость воздействует на нее вдоль вертикальной оси, смещаясь на  $\Delta_{kz}/2$  (рис. 2.11).

При этом точка  $O$  переходит вертикально вниз на эту же величину  $\Delta_{kz}/2$  на поверхность эллипсоида. Значит, точка  $O$  семенной коробочки перемещается в точку  $O'(0; 0; \Delta_{kz}/2)$ . При этом вектором деформации является вектор  $\overline{\Delta}_o = \overline{OO'}$   $\left(0; 0; \frac{\Delta_{kz}}{2}\right)$ , длина которого равна:

$$|\overline{\Delta}_o| = |\overline{OO'}| = \sqrt{O^2 + O^2 + \left(\frac{\Delta_{kz}}{2}\right)^2} = \frac{\Delta_{kz}}{2}. \quad (2.27)$$

Определим проекции и вектора деформаций точек семенной коробочки, лежащих на ее поверхности в плоскости  $xO_ky$  (рис. 2.11). Можно заметить, что в данном случае это точки окружности  $x^2 + y^2 = \left(\frac{d_k}{2}\right)^2$  в той же плоскости, которые переходят в точки сечения оболочки эллипсоида, которая представляет собой окружность, заданную уравнением  $x^2 + y^2 = \left(\frac{d_k + \Delta_{kx}}{2}\right)^2$ . При этом в направлении оси  $O_kz$  эти точки перемещений не имеют, т. е.  $\Delta_z = 0$ .

Для определенности в качестве одной из таких точек можно взять точку  $B$  с координатами  $(d_k/2; 0; 0)$  на шаре, которая переходит на эллипсоид в точку  $B'(\frac{d_k}{2} + \Delta_{Bx}; \Delta_{By}; 0)$ , где  $\frac{\Delta_{Bx}}{2} = \frac{\Delta_{By}}{2}$ . Тогда  $\Delta_B = \overline{BB'}(\Delta_{Bx}; \Delta_{Bx} - 0; 0) = (\Delta_{Bx}; \Delta_{Bx}; 0)$ .

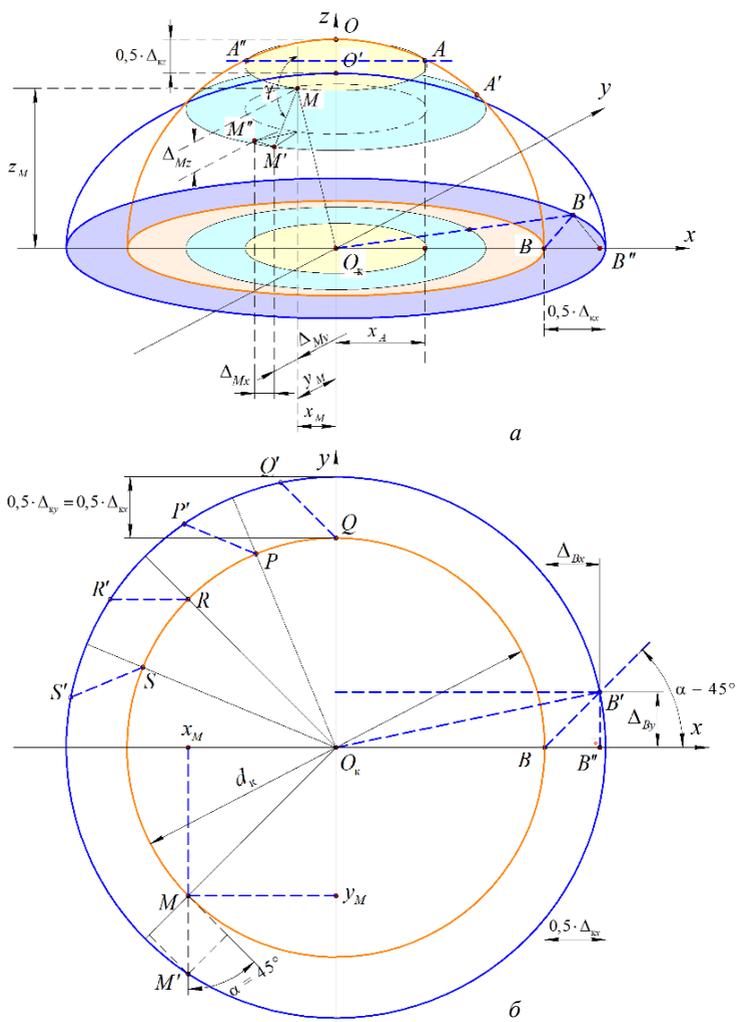


Рис. 2.11. Схема к определению изменений координат точек поверхности семенной коробочки льна при ее сжатии:  
 а – общий вид поверхности семенной коробочки льна при ее сжатии;  
 б – диаметральные сечения шаровой и эллипсоидной поверхности коробочки

Тогда с учетом условий (2.23) и (2.24) величина вектора деформации в точке  $B$  будет равна:

$$|\overline{\Delta_B}| = \sqrt{(\Delta_{Bx})^2 + (\Delta_{By})^2 + 0^2} = \Delta_{Bx} \sqrt{2} \quad (2.28)$$

и

$$|\overline{\Delta_B}| = |\overline{\Delta_O}| \Rightarrow \Delta_{Bx} \sqrt{2} = \frac{\Delta_{kz}}{2} \Rightarrow \Delta_{Bx} = \Delta_{By} = \frac{\Delta_{kz}}{2\sqrt{2}}. \quad (2.29)$$

Рассмотрим направляющие косинусы этого вектора:

$$\cos(\alpha) = \frac{\Delta_{Bx}}{|\overline{\Delta_B}|} = \frac{\Delta_{Bx}}{\Delta_{Bx} \sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow \angle\alpha = 45^\circ; \quad (2.30)$$

$$\cos(\beta) = \frac{\Delta_{By}}{|\overline{\Delta_B}|} = \frac{\Delta_{Bx}}{\Delta_{Bx} \sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow \angle\beta = 45^\circ; \quad (2.31)$$

$$\cos(\gamma) = \frac{0}{\Delta_{Bx} \sqrt{2}} = 0 \Rightarrow \angle\gamma = 90^\circ. \quad (2.32)$$

Обобщив результаты анализа перемещения точек поверхности семенной коробочки, лежащих в плоскости  $xO_ky$ , можно сделать вывод о том, что эти точки переходят в точки эллипсоида под углом  $45^\circ$  к радиусу точки недеформируемой поверхности (см. рис. 2.11, *a*).

На основании этой же схемы (см. рис. 2.11, *б*) можно определить величину  $\Delta_{kx}$  с учетом значений  $d_k$  и  $\Delta_{kz}$ . Для этого рассмотрим треугольник  $O_k B'' B'$ . Он является прямоугольным с гипотенузой  $O_k B'$  и катетами  $B' B''$ ,  $O_k B''$ :

$$O_k B' = \frac{d_k + \Delta_{kx}}{2}; \quad B' B'' = \Delta_{Bx}; \quad O_k B'' = \frac{d_k}{2} + \Delta_{Bx}.$$

По теореме Пифагора

$$\left(\frac{d_k}{2} + \frac{\Delta_{kx}}{2}\right)^2 = \left(\frac{d_k}{2} + \Delta_{Bx}\right)^2 + \Delta_{Bx}^2. \quad (2.33)$$

Упростим равенство (2.33):

$$\begin{aligned} \frac{d_k^2}{4} + \frac{d_k \cdot \Delta_{kx}}{2} + \frac{\Delta_{kx}^2}{4} &= \frac{\Delta_{kx}^2}{4} + d_k \cdot \Delta_{Bx} + \Delta_{Bx}^2, \\ \frac{d_k \cdot \Delta_{kx}}{2} + \frac{\Delta_{kx}^2}{4} &= d_k \cdot \Delta_{Bx} + \Delta_{Bx}^2, \\ \frac{\Delta_{kx}^2}{4} + \frac{d_k \cdot \Delta_{kx}}{2} - \Delta_{Bx} \cdot (d_k + \Delta_{Bx}) &= 0, \\ \Delta_{kx}^2 + 2 \cdot d_k \cdot \Delta_{kx} - 4 \cdot \Delta_{Bx} \cdot (d_k + \Delta_{Bx}) &= 0, \\ D = 4 \cdot d_k^2 + 16 \cdot \Delta_{Bx} \cdot (d_k + \Delta_{Bx}) &> 0, \\ \Delta_{kx} &= \frac{-2 \cdot d_k + 2 \cdot \sqrt{d_k^2 + 4 \cdot \Delta_{Bx} \cdot (d_k + \Delta_{Bx})}}{2} = \\ &= -d_k + \sqrt{d_k^2 + 4 \cdot \Delta_{Bx} \cdot (d_k + \Delta_{Bx})}, \end{aligned} \quad (2.34)$$

или

$$\begin{aligned} \Delta_{kx} &= -d_k + \sqrt{d_k^2 + \frac{4 \cdot \Delta_{kz}}{2\sqrt{2}} \cdot \left(d_k + \frac{\Delta_{kz}}{2\sqrt{2}}\right)} = \\ &= -d_k + \sqrt{d_k^2 + \sqrt{2} \cdot \Delta_{kz} \cdot \left(d_k + \frac{\Delta_{kz}}{2\sqrt{2}}\right)}. \end{aligned} \quad (2.35)$$

Используем полученные результаты для определения перемещений  $\overline{\Delta_M}$  произвольной точки  $M$ , взятой на поверхности недеформированной семенной коробочки льна. Нам известно, что все точки на шаре с аппликатой  $z_M$  образуют окружность, которая в проекции на плоскость  $xOy$  будет задаваться уравнением

$$x^2 + y^2 = \frac{d_k^2}{4} - z_M^2. \quad (2.36)$$

Это означает, что ордината точки  $M$  с ее абсциссой будет связана соотношением

$$y_M = \pm \sqrt{\frac{d_k^2}{4} - z_M^2 - x_M^2}. \quad (2.37)$$

В нашем случае формула (2.37) примет вид

$$y_M = \sqrt{\frac{d_k^2}{4} - z_M^2 - x_M^2}. \quad (2.38)$$

Предположим, что при деформации  $\Delta_{kz}/2$ , которую коробочка испытывает в ее верхней точке  $O$ , лежащей на вертикальной оси ее симметрии, выбранная нами точка  $M$  переходит в точку  $M'$  на эллипсоидную поверхность, задаваемую уравнением (2.24).

Пусть точка  $M'$  имеет координаты  $x_{M'}$ ;  $y_{M'}$ ;  $z_{M'}$ .

Тогда проекции векторов деформации на оси пространственной системы координат будут соответственно равны:  $\Delta_{Mx} = x_{M'} - x_M$ ,  $\Delta_{My} = y_{M'} - y_M$ ,  $\Delta_{Mz} = z_{M'} - z_M$ .

Направление вектора деформации  $\overrightarrow{\Delta_M}$  будет задаваться его направляющими косинусами:

$$\cos(\alpha) = \frac{\Delta_{Mx}}{|\overrightarrow{\Delta_M}|} = \frac{x_{M'} - x_M}{\sqrt{(x_{M'} - x_M)^2 + (y_{M'} - y_M)^2 + (z_{M'} - z_M)^2}}; \quad (2.39)$$

$$\cos(\beta) = \frac{\Delta_{My}}{|\overrightarrow{\Delta_M}|} = \frac{y_{M'} - y_M}{\sqrt{(x_{M'} - x_M)^2 + (y_{M'} - y_M)^2 + (z_{M'} - z_M)^2}}; \quad (2.40)$$

$$\cos(\gamma) = \frac{\Delta_{Mz}}{|\overrightarrow{\Delta_M}|} = \frac{z_{M'} - z_M}{\sqrt{(x_{M'} - x_M)^2 + (y_{M'} - y_M)^2 + (z_{M'} - z_M)^2}}, \quad (2.41)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – углы, образованные вектором  $\overrightarrow{\Delta_M}$  соответственно с положительным направлением оси  $O_kx$ ,  $O_ky$ ,  $O_kz$ .

Из курса математики [18] известно, что

$$\cos^2(\alpha) + \cos^2(\beta) + \cos^2(\gamma) = 1 \quad (2.42)$$

для любого вектора в пространстве.

Используя равенство (2.42) и равенство  $\Delta_{Mx} = \Delta_{My}$  ( $\angle\alpha = \angle\beta$ ), получим:

$$\begin{aligned} 2 \cdot \cos^2(\alpha) + \cos^2(\gamma) &= 1, \\ 2 \cdot \cos^2(\alpha) &= 1 - \cos^2(\gamma), \\ 2 \cdot \cos^2(\alpha) &= \sin^2(\gamma), \\ \cos^2(\alpha) &= \frac{1}{2} \sin^2(\gamma), \\ \cos(\alpha) &= \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sin(\gamma). \end{aligned} \quad (2.43)$$

Для выбранной нами точки  $M$  можем записать

$$\angle\alpha = \angle\beta = \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \sin(\gamma)\right). \quad (2.44)$$

С учетом зависимостей (2.39), (2.40), (2.41) и (2.44) можем определить значения деформаций семенной коробочки льна для выбранной точки  $M$ :

$$\cos(\alpha) = \frac{\Delta_{Mx}}{|\Delta_M|} \Rightarrow \Delta_{Mx} = \cos(\alpha) \cdot |\Delta_M| = \frac{\Delta_{kz} \cdot \sin(\gamma)}{2\sqrt{2}}; \quad (2.45)$$

$$\cos(\beta) = \frac{\Delta_{My}}{|\Delta_M|} \Rightarrow \Delta_{My} = \cos(\beta) \cdot |\Delta_M| = \frac{\Delta_{kz} \cdot \sin(\gamma)}{2\sqrt{2}}; \quad (2.46)$$



$$\text{при } \gamma = 135^\circ \quad \Delta_{Lz} = \frac{-\Delta_{kz}}{2\sqrt{2}}; \Delta_{Lx} = \frac{\Delta_{kz}}{4}; \Delta_{Ly} = \frac{\Delta_{kz}}{4};$$

$$\text{при } \gamma = 120^\circ \quad \Delta_{Tz} = \frac{-\Delta_{kz}\sqrt{3}}{4}; \Delta_{Tx} = \frac{\Delta_{kz}}{4\sqrt{2}}; \Delta_{Ty} = \frac{\Delta_{kz}}{4\sqrt{2}}.$$

С учетом равенств (2.45), (2.46), (2.47) точка  $M$  перейдет на деформируемую поверхность в точку  $M'$  с координатами:

$$x_{M'} = x_M + \Delta_{Mx} = x_M + \frac{\Delta_{kz} \cdot \sin(\gamma)}{2\sqrt{2}}; \quad (2.48)$$

$$y_{M'} = y_M + \Delta_{My} = y_M + \frac{\Delta_{kz} \cdot \sin(\gamma)}{2\sqrt{2}}; \quad (2.49)$$

$$z_{M'} = z_M + \Delta_{Mz} = z_M + \frac{\Delta_{kz} \cdot \cos(\gamma)}{2}. \quad (2.50)$$

Так как точка  $M'(x_{M'}; y_{M'}; z_{M'})$  лежит на эллипсоиде, то из равенства (2.26) с учетом равенств (2.48)–(2.50) можно определить величину угла  $\gamma$ , а значит, деформации и механическое напряжение в любой точке семенной коробочки льна при ее поперечном сжатии.

Это, в свою очередь, позволит установить предельные механические напряжения для разрушения семенной коробочки и выделения из нее семян.

Для этого достаточно рассмотреть семенную коробочку льна как упругое тело. При поперечном сжатии условием ее разрушения является

$$|\overline{N}_6| > |\overline{F}_{\text{упр}}|. \quad (2.51)$$

При этом согласно закону Гука для упругого тела сила упругости определяется формулой [87, 165]

$$|\overline{F}_{\text{упр}}| = E \cdot S \cdot \frac{\Delta l}{l}, \quad (2.52)$$

где  $E$  – модуль упругости материала (модуль Юнга), Па;

$S$  – площадь поперечного сечения,  $\text{м}^2$ ;

$\Delta l$  – величина поперечного сжатия тела, м;

$l$  – линейная величина, определяющая исходное состояние тела, м.

В дифференциальной форме этот закон в любой точке рассматриваемого материала имеет вид [87, 165]

$$\sigma_i = E \cdot \varepsilon_i, \quad (2.53)$$

где  $\sigma_i = \frac{|F_{\text{упр}}|}{S_i}$  – механическое напряжение в точке,  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;

$\varepsilon_i = \frac{\Delta l_i}{l}$  – относительное сжатие тела в точке.

Физический смысл формулы (2.53) заключается в том, что механическое напряжение в точках деформируемого тела прямо пропорционально относительному его сжатию с коэффициентом пропорциональности, равным модулю упругости материала данного тела.

Рассматривая формулу (2.53) применительно к случаю сжатия семенной коробочки льна с целью ее разрушения, можно сделать вывод о том, что механические напряжения в определенных точках коробочки зависят от ее исходных размеров ( $l = d_k$ ) и формы (уравнение (2.24)), деформаций в этих точках, определяемых зависимостями (2.45) и (2.46), и вида деформированной поверхности (уравнение (2.24)). Неизвестной величиной в формулах (2.52) и (2.53) является модуль Юнга семенной коробочки льна, который характеризует ее упругие свойства и может быть определен только опытным путем. Экспериментальное определение данного параметра позволит смоделировать процесс сжатия и разрушения семенной коробочки льна, а также обосновать рациональное значение зазора между эластичным рабочим органом и сепарирующей решеткой обмолачивающего устройства.

В пунктах 2.2 и 2.3 изложены два различных подхода к определению деформации коробочки льна при ее сжатии между бичом и декой. Имеют место незначительные расхождения в полученных результатах расчета величин деформации коробочки в направлении осей  $Ox$  и  $Oy$  ( $\Delta_{кx}$  и  $\Delta_{кy}$ ) при одинаковой деформации по  $Oz$  ( $\Delta_{кz}$ ). Это обусловлено

тем, что в пункте 2.2 приведена методика расчета деформации коробочки льна, предполагающая сохранение ее объема при сжатии. Такой подход не позволяет оценить растяжений и сжатий оболочки семенной коробочки льна, а значит, не предполагает ее разрушения. Кроме того, в методике, изложенной в пункте 2.3, учитываются проекции деформаций в различных точках оболочки семенной коробочки льна. Именно они определяют значения упругих напряжений в оболочке, превышение предельного значения которых приводит к ее разрушению. На основании изложенного можно сделать вывод о том, что при определении характера деформации семенной коробочки льна и ее предельной величины сжатия следует отдать предпочтение методике, изложенной в пункте 2.3.

#### **2.4. Обоснование молотильного зазора между бичом и декой**

Для обоснования зазора между бичом и декой воспользуемся сведениями из ботаники о форме, составе и структуре семенной коробочки льна и ее семенах.

Известно [47, 103, 139], что семенная коробочка льна представляет собой шаровидную мелкую пятигнездную коробочку (рис. 2.13, *а*) длиной 6,1–8,3 мм и шириной 5,7–6,8 мм. Каждое гнездо разделено неполной перегородкой на два полугнезда, содержащих по одному семени. Поэтому в семенной коробочке льна обычно находится до десяти семян. Установлено [47, 139], что в производственных посевах число нормально развитых семян колеблется от 6 до 10 шт. [108].

В свою очередь, льняное семя имеет овальную форму с несколько суженым и слегка изогнутым носиком (рис. 2.13, *б*).

Известно [47, 139], что размеры льняного семени изменяются в следующих пределах: длина – 3,2–4,8 мм, ширина – 1,5–2,2 мм, толщина – 0,5–1,2 мм.

С учетом вышеприведенных сведений о коробочке льна и ее семенах задачу определения границ варьирования зазора между бичом и декой сведем к оценке предельной возможной величины сжатия коробочки льна при условии шадящего воздействия на семена, приведенные к суммарному объему шаровидной формы.

Для этого представим семенную коробочку льна в виде тела шаровидной формы с диаметром  $d_k$ , а льняное семя – как цилиндрическое тело толщиной  $c$  с эллипсом в основании и большей осью  $A$  и мень-

шей  $B$  (рис. 2.13, в), принимаемыми равными соответствующим размерам семени.

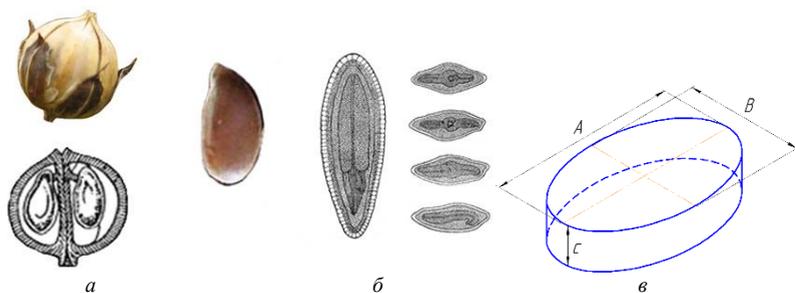


Рис. 2.13. К обоснованию модели льняного семени:

$a$  – общий вид и продольный разрез семенной коробочки льна;

$b$  – общий вид, продольный разрез и поперечные срезы семян через зародыш;

$v$  – модель льняного семени

Тогда уравнение семени может быть записано в виде

$$\begin{cases} \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1; \\ 0 \leq z \leq c, \end{cases} \quad (2.54)$$

где  $a = A/2$  – большая полуось основания семени, м;

$b = B/2$  – меньшая полуось основания семени, м;

$c$  – толщина семени, м.

А объем семени можно определить по формуле

$$V_c = \frac{4 \cdot b \cdot c}{a} \int_0^a \sqrt{a^2 - x^2} dx. \quad (2.55)$$

Предположим, что таких семян в коробочке льна  $n_c$  штук. Тогда суммарный объем, занимаемый в коробочке семенами, можно определить из выражения

$$V_{c.общ} = V_c \cdot n_c, \quad (2.56)$$

где  $n_c$  – количество семян в коробочке льна, шт.

Поскольку семена льна внутри коробочки ориентированы вертикально по длине, располагаются у продольной оси коробочки и в целом вписываются в некоторую сферу, то с некоторым допущением общий объем семян можно представить как объем шара в виде

$$V_{c.общ} = \frac{4}{3} \pi \cdot R_{c.общ}^3. \quad (2.57)$$

Определим из выражения (2.57) радиус шара:

$$R_{c.общ} = \sqrt[3]{\frac{3}{4} \cdot \frac{V_{c.общ}}{\pi}}. \quad (2.58)$$

Тогда в качестве предельно возможной деформации по оси  $z$  коробочки льна с точки зрения нетравмируемости ее семян можно принять

$$\Delta_{kz} = d_k - 2R_{c.общ}. \quad (2.59)$$

С учетом уравнения (2.59) минимальный зазор между бичом и декой определим по зависимости

$$\Delta_{min} = d_k - (d_k - 2R_{c.общ}),$$

$$\Delta_{min} = 2R_{c.общ}. \quad (2.60)$$

Приведем пример расчета минимального допустимого зазора между бичом и декой в математическом пакете MathCad (рис. 2.14).

Предположим, что диаметр семенной коробочки льна, находящейся в молотильном зазоре между бичом и декой,  $d_k = 0,007$  м, а размеры семян: длина  $A = 0,0046$  м, ширина  $B = 0,002$  м, высота  $c = 0,0011$  м.

При этом по формуле (2.55) объем одного семени составит:  $V_c = 7,948 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$ , а суммарный объем семян в коробочке льна при среднем количестве семян в ней  $n_c = 8$  шт. согласно выражению (2.56) составит:  $V_{c.общ} = 6,359 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3$ .

Mathcad - [обосн зазора]

Файл Правка Вид Добавить Формат Инструменты Символика Окно Справка

100%

Normal Arial 10 B I U

Семя льна рассмотрим как цилиндрическое тело с эллипсом в сечении

$A := 4.6 \cdot 10^{-3}$  большая ось сечения основания, м.

$B := 2.10 \cdot 10^{-3}$  меньшая ось сечения основания, м.

$C := 1.1 \cdot 10^{-3}$  толщина семени, м.

$nc := 8$  количество семян, шт.

$a := \frac{A}{2}$   $b := \frac{B}{2}$  полуоси сечения семени, м.

$Sc := \frac{4 \cdot b}{a} \int_0^a \sqrt{a^2 - x^2} dx = 7.226 \times 10^{-6}$  площадь сечения семени, кв. м.

$Vc := \frac{4 \cdot b \cdot C}{a} \int_0^a \sqrt{a^2 - x^2} dx = 7.948 \times 10^{-9}$  объем семени, куб. м.

$V_{сем} := Vc \cdot nc = 6.359 \times 10^{-8}$  суммарный объем семян коробочки, куб. м.

$\frac{4}{3} \pi \cdot R_{сем}^3 = V_{сем}$  уравнение, из которого определяется радиус шара, равного по объему суммарному объему семян в семенной коробочке льна

$R_{сем} := \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V_{сем}}{4 \cdot \pi}} = 2.476 \times 10^{-3}$  радиус шара, равного по объему суммарному объему семян в семенной коробочке льна, м.

$dk = 0.007$  диаметр семенной коробочки льна, м

$\frac{dk}{2} = 3.5 \times 10^{-3}$  радиус семенной коробочки льна, м.

$\frac{dk}{2} - R_{сем} = 1.024 \times 10^{-3}$  предельная возможная величина сжатия коробочки льна с точки зрения травмируемости ее семян, м

$\Delta kz := dk - 2 \cdot R_{сем} = 2.048 \times 10^{-3}$  предельная возможная величина сжатия коробочки льна, м

$\Delta_{min} := dk - \Delta kz = 4.952 \times 10^{-3}$  минимальный зазор между бичом и декой, м

Рис. 2.14. Блок исходных данных и расчетной части в математическом пакете MathCad определения минимального допустимого зазора между бичом и декой

Тогда радиус шара общего объема семян в коробочке

$$R_{с.общ} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 7,948 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot 3,14}} = 2,476 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Предельная возможная деформация коробочки льна составит:  $\Delta_{кз} = 0,007 - 2 \cdot 2,476 \cdot 10^{-3} = 2,048 \cdot 10^{-3}$  м, а минимальный зазор между бичом и декой  $\Delta_{мин} = 2 \cdot 2,476 \cdot 10^{-3} = 4,9 \cdot 10^{-3}$  м.

Модель (2.60) с учетом зависимостей (2.55)–(2.58) позволяет исходя из размеров коробочек и семян льна определить минимальный допустимый зазор между бичом и декой из условия нетравмирования семян льна.

## 2.5. Обоснование формы рабочей кромки эластичного бича

Очесывающе-плющильное воздействие эластичного рабочего органа на обрабатываемую ленту льнотресты может стать эффективнее при правильном выборе формы его рабочей кромки.

В предлагаемой конструкции обмолачивающего устройства в зоне его контакта с материалом требуется максимально совместить три процесса:

- 1) отделение семенных коробочек льна от стеблей;
- 2) разрушение их с последующим выделением из них семян;
- 3) сепарация семян сквозь ленту стеблей и деку.

Покажем, что при этом немаловажную роль играет выбор формы рабочей кромки эластичного бича. Для этого введем два понятия. Под уплотняющей способностью бича будем понимать степень сжатия слоя стеблей между бичом и декой, характеризуемую относительным уплотнением  $\varepsilon_6$ , а под проникающей его способностью – глубину  $h_п$  погружения бича в слой стеблей. Рассмотрим эти параметры в связи друг с другом. Для этого числовое значение уплотняющей способности бича рассмотрим в виде безразмерного параметра, равного отношению объема материала, находящегося в рабочей зоне до взаимодействия с бичом, к его же объему после взаимодействия с ним, при условии, что данные объемы заключены в пределах площади зоны контакта бича с лентой льнотресты

$$S_6 = a_6 \cdot b_6, \quad (2.61)$$

где  $a_6$  – толщина рабочей кромки бича, м;

$b_6$  – длина рабочей кромки бича (ширина бича), м.

Тогда относительное уплотнение бича выражает формула

$$\varepsilon_6 = \frac{V_n}{V_d} = \frac{a_6 \cdot b_6 \cdot h_{ст}}{a_6 \cdot b_6' \cdot (h_{ст} - h_n)} = \frac{b_6 \cdot h_{ст}}{b_6' \cdot (h_{ст} - h_n)}, \quad (2.62)$$

где  $V_n$  – объем материала, находящегося в зоне контакта бича с лентой до его деформации, м<sup>3</sup>;

$V_d$  – объем материала, находящегося в зоне контакта бича с лентой после его деформации, м<sup>3</sup>;

$h_{ст}$  – высота слоя стеблей в зоне контакта бича со стеблями льна, м;

$b_6'$  – длина непрямолинейной рабочей кромки бича, м;

$h_n$  – глубина погружения бича в слой стеблей, м.

Для того чтобы обеспечить эффективное протекание всех заявленных выше процессов, необходимо выполнение условия  $\varepsilon_6 > 1$ . С учетом формулы (2.62) получим:

$$\frac{b_6 \cdot h_{ст}}{b_6' \cdot (h_{ст} - h_n)} > 1. \quad (2.63)$$

Решим это дробно-рациональное неравенство, считая неизвестной величиной глубину погружения бича  $h_n$ :

$$\frac{\frac{b_6}{b_6'} \cdot h_{ст} - (h_{ст} - h_n)}{h_{ст} - h_n} > 0;$$

$$\frac{\frac{b_6}{b_6'} \cdot h_{ст} - h_{ст} + h_n}{h_{ст} - h_n} > 0;$$

$$\begin{cases} h_{\text{cr}} - h_{\text{п}} \neq 0; \\ (h_{\text{cr}} - h_{\text{п}}) \cdot \left( \frac{b_6}{b_6'} \cdot h_{\text{cr}} - h_{\text{cr}} + h_{\text{п}} \right) > 0; \end{cases}$$

$$h_{\text{п}} \in \left[ h_{\text{cr}} \cdot \left( 1 - \frac{b_6}{b_6'} \right); h_{\text{cr}} \right]. \quad (2.64)$$

Анализируя полученную зависимость (2.64), можно сделать следующие выводы:

1) при прямой рабочей кромке бича ( $b_6' = b_6$ ) глубина погружения его в слой стеблей практически равна нулю, а уплотняющая его способность близка к 1, что не дает желаемого результата;

2) для более эффективного воздействия рабочей кромки бича необходимо, чтобы ее длина была больше рабочей зоны контакта бича с лентой льнотресты, а это, в свою очередь, означает, что кромка эластичного рабочего органа должна иметь непрямолинейную форму. Наиболее простой для исполнения является зубчатая форма рабочей кромки бича, поэтому именно она была взята за основу в предлагаемой конструкции обмолачивающего устройства.

## 2.6. Обоснование параметров эластичного рабочего органа

На основании пункта 2.5 рассмотрим зубчатую форму рабочей кромки эластичного рабочего органа (бича) (рис. 2.15).

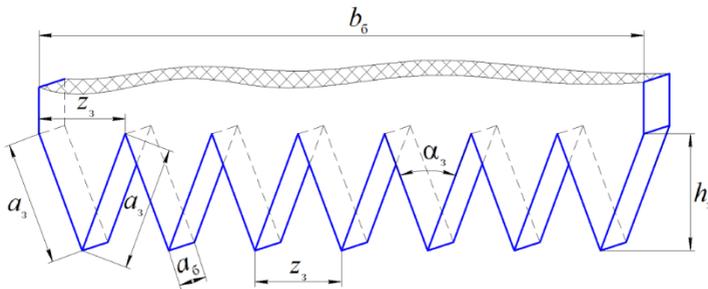


Рис. 2.15. Параметры рабочей кромки бича зубчатой формы

Для обоснования параметров зубчатой рабочей кромки бича рассмотрим следующие условия, которые должны обеспечить эффективность отделения семенных коробочек от стеблей льна, их разрушения и выделения из слоя стеблей:

1) уплотняющая способность бича должна превышать 1 [6]. Это позволит обеспечить необходимое отделение семенных коробочек льна от стеблей и их разрушение. Таким образом,

$$\varepsilon_6 > 1; \quad (2.65)$$

2) глубина погружения бича в слой стеблей должна стремиться к значению, равному высоте слоя стеблей. Данное условие обеспечит отделение и разрушение тех семенных коробочек льна, которые расположены внутри слоя стеблей, а также сепарацию отделенного семенного материала сквозь ленту. Таким образом,

$$h_{\Pi} \rightarrow h_{\text{ст}}; \quad (2.66)$$

3) в зоне воздействия на ленту отдельно взятого зуба (элементарного участка бича) процессы проникновения в ее структуру, уплотнения в комлевой и разуплотнения в верхушечной частях должны протекать одинаково по всей ширине бича. Это означает, что высота зуба бича ( $h_3, \text{м}$ ), его ширина у основания ( $z_3, \text{м}$ ), а также длина его образующих ( $a_3, \text{м}$ ) для всех зубьев бича должны быть одинаковыми. Таким образом, конфигурацию зуба будем рассматривать в виде равнобедренного треугольника с основанием  $z_3$ , высотой  $h_3$ , у которого суммарная длина образующих согласно выводам, сделанным в пункте 2.5, должна быть максимальной, т. е.

$$2a_3 \rightarrow \max \quad (2.67)$$

при  $0 < z_3 \leq a_3$ ;  $0 < \alpha_3 \leq \frac{\pi}{2}$ ;

4) количество зубьев  $n_3$  бича, которое в рассматриваемом случае определяется кратностью ширины бича  $b_6$  к величине основания зуба, должно быть наибольшим, т. е.

$$n_3 = \frac{b_6}{z_3},$$

$n_3 \rightarrow \max$ , при условии

$$b_6 = n_3 \cdot z_3. \quad (2.68)$$

Согласно пункту 2.5 уплотняющую способность бича можно представить в виде (рис. 2.16)

$$\begin{aligned} \varepsilon_6 &= \frac{V_{\text{н}}}{V_{\text{д}}} = \frac{b_6 \cdot a_6 \cdot h_{\text{СТ}}}{n_3 \cdot \left( 2 \cdot \frac{h_{\text{СТ}} - h_{\text{П}} + h_{\text{СТ}} - h_{\text{П}} + h_3}{2} \cdot \frac{z_3}{2} \right) \cdot a_6} = \\ &= \frac{2 \cdot h_{\text{СТ}}}{2 \cdot (h_{\text{СТ}} - h_{\text{П}}) + h_3}. \end{aligned} \quad (2.69)$$

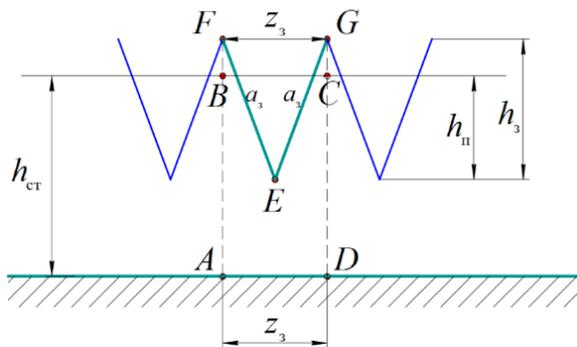


Рис. 2.16. Схема к определению уплотняющей способности бича

Для определения верхней границы варьирования величины  $h_3$  рассмотрим полученное нами выражение (2.69) как функцию уплотняющей способности бича от проникающей его способности  $\varepsilon_6(h_{\text{П}})$ . С учетом условия (2.66) определим соответствующий предел при  $h_{\text{П}} \rightarrow h_{\text{СТ}}$ :

$$\lim_{h_{\text{П}} \rightarrow h_{\text{СТ}}} \varepsilon_6(h_{\text{П}}) = \lim_{h_{\text{П}} \rightarrow h_{\text{СТ}}} \frac{2h_{\text{СТ}}}{2(h_{\text{СТ}} - h_{\text{П}}) + h_3} = \frac{2h_{\text{СТ}}}{h_3}. \quad (2.70)$$

Результат определения предела (2.70) можно интерпретировать

следующим образом: для эффективной работы бича максимальная возможная высота зуба его кромки не должна превышать  $2h_{\text{CT}}$  с точки зрения обеспечения достаточной его проникающей способности в слой стеблей и необходимого их уплотнения.

Таким образом, для того чтобы  $\epsilon_6$  была больше 1, необходимо выполнение условия

$$h_3 < 2h_{\text{CT}}. \quad (2.71)$$

Чтобы обосновать геометрические параметры зуба бича, рассмотрим графическое представление такого зуба в виде равнобедренного треугольника  $EFG$  с привязкой его вершин к прямоугольной декартовой системе координат (рис. 2.17).

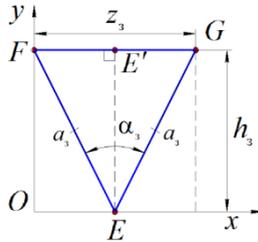


Рис. 2.17. Схема к определению параметров зуба

Пусть  $EF = EG = a_3$ ;  $FG = z_3$ ;  $OF = h_3$ , где  $z_3 \leq h_3$ . Введем обозначение  $\angle GEF = \angle \alpha_3$ .

Нетрудно заметить, что точка  $E$  имеет координаты  $(z_3/2; 0)$ , а точка  $F - (0; h_3)$ . Тогда координаты вектора  $\overline{EF} (-\frac{z_3}{2}; h_3)$ , а его длина -

$$|\overline{EF}| = \sqrt{\frac{z_3^2}{4} + h_3^2} = \frac{1}{2} \sqrt{z_3^2 + 4h_3^2}.$$

Таким образом, образующая зуба

$$a_3 = \frac{1}{2} \sqrt{z_3^2 + 4h_3^2}. \quad (2.72)$$

Из прямоугольного треугольника  $FE'E$  выразим  $\text{tg}(\alpha_3/2)$ :

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_3}{2}\right) = \frac{z_3}{2h_3}, \quad (2.73)$$

где  $\alpha_3$  – угол при вершине зуба бича, рад.

Тогда  $2h_3 = \frac{z_3}{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_3}{2}\right)}$ , а равенство (2.72) можно переписать в виде

$$a_3 = \frac{1}{2} \sqrt{z_3^2 + \left(\frac{z_3}{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_3}{2}\right)}\right)^2} = \frac{z_3}{2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha_3}{2}\right)}, \quad (2.74)$$

при условии, что  $\alpha_3 \in \left[0; \frac{\pi}{2}\right]$ .

Проанализируем зависимость (2.74) с учетом условия  $2a_3 \rightarrow \max$ . Для обеспечения необходимых проникающей и уплотняющей способностей зуба и исключения свободного прохождения коробочки между зубьями их параметры должны быть соизмеримы с диаметром коробочки  $d_k$ , поэтому предварительно примем  $z_3 = d_k$ .

Графическая зависимость изменения образующей зуба  $a_3$  от угла при его вершине  $\alpha_3$  ( $\angle FEG$ ) (рис. 2.18) показывает, что при изменении  $\alpha_3 \in [0^\circ; 5^\circ]$  образующая зуба  $a_3$  резко увеличивается, при этом высота зуба приближается к значению  $2h_{ct}$ , при котором зуб работает неэффективно с точки зрения его уплотняющей способности. Можно заметить также, что при изменении  $\alpha_3 \in [40^\circ; 90^\circ]$  значение  $2a_3$  уменьшается в 2–2,9 раза при невысокой его проникающей способности. Наиболее рациональным изменением угла  $\alpha_3$  является отрезок  $\alpha_3 \in [5^\circ; 40^\circ]$ . В этом диапазоне длина линии соприкосновения с материалом увеличивается в 3–21 раз (на рис. 2.18 указаны на вертикальной шкале), высота зуба приближается к  $h_{ct}$  и заведомо обеспечивается необходимая уплотняющая способность бича.

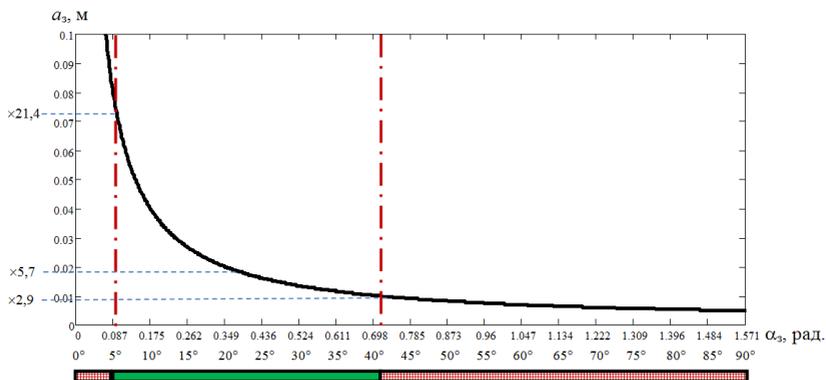


Рис. 2.18. Зависимость изменения образующей зуба  $a_3$  от угла при его вершине  $\alpha_3$

При этом высоту зуба можно определить по следующей зависимости:

$$h_3 = \frac{z_3}{2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_3}{2}\right)}. \quad (2.75)$$

Тогда минимальную высоту зуба бича можно определить из условия, что для обеспечения эффективного обмолота в конце рабочего хода бича семенная коробочка льна не должна свободно проходить в межзубовом пространстве. В нашем случае  $z_3 = d_k = 0,007$  м, угол  $\alpha_3 = 40^\circ$  (или  $\alpha_3 = 0,698$  рад). Подставив эти значения в формулу (2.75), получим:

$$h_3^{(\text{наим})} = \frac{z_3}{2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_3}{2}\right)} = \frac{0,007}{2 \cdot 0,364} = 0,0096 \text{ м.}$$

Таким образом, для обеспечения эффективной работы зубчатой кромки бича необходимо рассмотреть следующие диапазоны изменения ее параметров:

- угла  $\alpha_3$  – от 5 до 40°;
- высоты зуба  $h_3$  – от 0,0096 до 0,05 м.

Изменение параметров в указанных границах позволит обеспечить следующие условия:

- 1)  $\varepsilon_6 > 1$ ;
- 2)  $h_{\text{П}} \rightarrow h_{\text{СТ}}$ ;
- 3)  $2\alpha_3 \in [3; 21]$ ,

а значит, повысить эффективность работы эластичного рабочего органа при обмолоте лент льнотресты в линии первичной переработки.

## **2.7. Определение уравнений траектории движения эластичного рабочего органа обмолачивающего устройства**

Основопологающим действием в процессе выделения семян льна обмолачивающим устройством с эластичным рабочим органом в линии первичной переработки является движение рабочего органа, от кинематических параметров которого зависит эффективность его работы. Кинематика рабочего органа определяется параметрами механизма его привода. Поэтому рассмотрим движение составляющих звеньев предлагаемого кривошипно-шатунного механизма с коромыслом с привязкой его к декартовой системе координат (рис. 2.19) [145]. Рабочий орган расположен в точке  $C$ . Уравнение движения точки  $C$  зависит от геометрических параметров механизма привода [145].

Поскольку отрезки  $AC$  и  $AB$  принадлежат одной прямой, т. е.  $C$  – крайняя точка продолжения шатуна  $AB$ , то для определения уравнения ее движения необходимо рассмотреть уравнение движения шатуна  $AB$ .

Так как общая точка  $A$  кривошипа  $OA$  и шатуна  $AB$  совершает вращательное движение вокруг оси  $O$  по окружности радиуса  $R$  с постоянной угловой скоростью  $\omega$ , то угол поворота кривошипа  $\varphi$  в зависимости от времени определится выражением

$$\varphi = \omega t, \quad (2.76)$$

где  $\omega$  – угловая скорость кривошипа  $OA$ , рад/с;

$t$  – время, с.



$a$  – горизонтальное смещение точки  $O_1$  относительно центра вращения кривошипа  $O$ , м;

$b$  – вертикальное смещение точки  $O_1$  относительно центра вращения кривошипа  $O$ , м;

$\delta$  – угол поворота коромысла относительно горизонтали, рад;

$\delta(t)$  – функциональная зависимость угла поворота коромысла относительно горизонтали, рад.

Используя параметрические уравнения (2.77) и (2.78), определим координаты соответствующего ему вектора  $\overline{AB}$ :

$$\overline{AB} \begin{pmatrix} a - R_1 \cdot \cos(\delta(t)) - R \cdot \cos(\omega t); & b + R_1 \cdot \sin(\delta(t)) - R \cdot \sin(\omega t) \end{pmatrix}. \quad (2.79)$$

На основании выражений (2.79) длину шатуна  $AB$  ( $l$ , м) можем определить как длину вектора  $\overline{AB}$ . Найдем квадрат этой величины по формуле

$$l^2 = x_{AB}^2 + y_{AB}^2 = \\ = (a - R_1 \cdot \cos(\delta(t)) - R \cdot \cos(\omega t))^2 + (b + R_1 \cdot \sin(\delta(t)) - R \cdot \sin(\omega t))^2,$$

или

$$l^2 = a^2 + R_1^2 \cdot \cos^2(\delta(t)) + R^2 \cdot \cos^2(\omega t) - 2a \cdot R_1 \cdot \cos(\delta(t)) - \\ - 2a \cdot R \cdot \cos(\omega t) + 2R_1 \cdot R \cdot \cos(\delta(t)) \cdot \cos(\omega t) + b^2 + \\ + R_1^2 \cdot \sin^2(\delta(t)) + R^2 \cdot \sin^2(\omega t) + 2b \cdot R_1 \cdot \sin(\delta(t)) - \\ - 2b \cdot R \cdot \sin(\omega t) - 2R_1 \cdot R \cdot \sin(\delta(t)) \cdot \sin(\omega t). \quad (2.80)$$

Уравнение (2.80) можно записать в виде

$$l^2 - a^2 - R_1^2 - R^2 + 2a \cdot R \cdot \cos(\omega t) + 2b \cdot R \cdot \sin(\omega t) = \\ = \cos(\delta(t)) \cdot (2R_1 \cdot R \cdot \cos(\omega t) - 2a \cdot R_1) + \sin(\delta(t)) \times \\ \times (2b \cdot R_1 - 2R_1 \cdot R \cdot \sin(\omega t)). \quad (2.81)$$

Элементарными преобразованиями уравнение (2.81) сводится к следующему виду:

$$l^2 - a^2 - R_1^2 - R^2 + 2a \cdot R \cdot \cos(\omega t) + 2b \cdot R \cdot \sin(\omega t) = \\ = 2R_1 \cdot \left( (R \cdot \cos(\omega t) - a) \cdot \cos(\delta(t)) + (b - R \cdot \sin(\omega t)) \cdot \sin(\delta(t)) \right),$$

а затем с учетом формулы преобразования суммы тригонометрических функций [18, 48] оно трансформируется в следующее уравнение:

$$2R_1 \cdot P \cdot \sin(\delta(t) + \varphi_0) = \\ = l^2 - a^2 - R_1^2 - R^2 + 2a \cdot R \cdot \cos(\omega t) + 2b \cdot R \cdot \sin(\omega t), \quad (2.82)$$

где  $P = \sqrt{(b - R \cdot \sin(\omega t))^2 + (R \cdot \cos(\omega t) - a)^2}$ , м<sup>2</sup>;

$$\varphi_0 = \arcsin \left( \frac{R \cdot \cos(\omega t) - a}{\sqrt{(b - R \cdot \sin(\omega t))^2 + (R \cdot \cos(\omega t) - a)^2}} \right), \text{ рад.}$$

Решив уравнение (2.82) относительно  $\delta$ , получим:

$$\delta(t) = \arcsin \left( \frac{l^2 - a^2 - R_1^2 - R^2 + 2a \cdot R \cdot \cos(\omega t) + 2b \cdot R \cdot \sin(\omega t)}{2R_1 \cdot \sqrt{(b - R \cdot \sin(\omega t))^2 + (R \cdot \cos(\omega t) - a)^2}} \right) - \\ - \arcsin \left( \frac{R \cdot \cos(\omega t) - a}{\sqrt{(b - R \cdot \sin(\omega t))^2 + (R \cdot \cos(\omega t) - a)^2}} \right). \quad (2.83)$$

Так как шатун  $BC$  имеет жесткую цельную конструкцию, шарнирно соединенную с кривошипом  $OA$ , то положение его точки  $C$  однозначно определяется координатами точек  $A$  и  $B$ , длиной шатуна  $AB$ , равной  $l$ , и удалением рабочего органа от точки  $A$ , которое примем равным  $l_1$ . Тогда координаты точки  $C$  в системе координат  $xOy$  с учетом координат точек  $A$  (уравнение (2.77)) и  $B$  (уравнение (2.78) при условии (2.83)) в этой же системе координат можно записать в виде системы параметрических уравнений:

$$C: \begin{cases} x_C(t) = \frac{(l+l_1) \cdot x_A(t) - l_1 \cdot x_B(t)}{l}, \\ y_C(t) = \frac{(l+l_1) \cdot y_A(t) - l_1 \cdot y_B(t)}{l}. \end{cases} \quad (2.84)$$

Графическая интерпретация уравнений (2.77), (2.78) и (2.84) представлена на рис. 2.20.

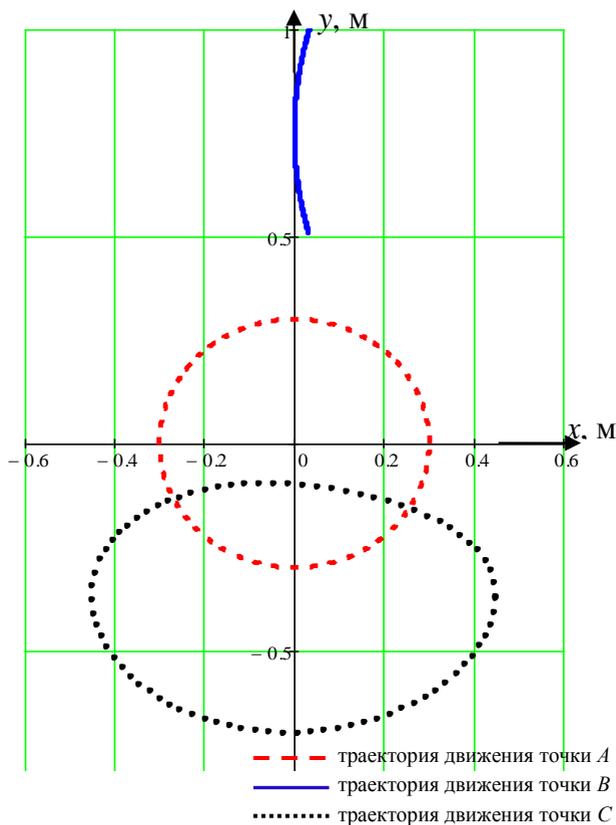


Рис. 2.20. Графики траекторий движения исследуемых точек звеньев механизма привода

Для этого были зафиксированы значения следующих параметров: длина кривошипа  $OA$  ( $R = 0,3$  м), длина шатуна  $BC$ , условно разбитого на  $AB$  и  $AC$  ( $l + l_1 = 0,808 + 0,4 = 1,208$  м), длина коромысла  $O_1B$  ( $R_1 = 0,95$  м), горизонтальное смещение точки  $O_1$  относительно центра вращения кривошипа  $O$  ( $a = 0,95$  м), вертикальное смещение точки  $O_1$  относительно центра вращения кривошипа  $O$  ( $b = 0,75$  м).

Анализ графического отображения траекторий движения точек  $B$ ,  $A$  и  $C$  свидетельствуют о правильности определения аналитических зависимостей, так как точка  $A$  движется по окружности с постоянным радиусом, равным длине кривошипа  $R$ , точка  $B$  движется по дуге с постоянным радиусом, равным длине коромысла  $R_1$ , а точка  $C$  описывает траекторию, близкую по форме к эллипсу, являющуюся алгебраической кривой шестого порядка.

В технологическом процессе обмолота важной составляющей является абсолютная скорость рабочего органа, расположенного в точке  $C$ , которую можно определить как

$$v_C(t) = \sqrt{\left(\frac{d}{dt}x_C(t)\right)^2 + \left(\frac{d}{dt}y_C(t)\right)^2}. \quad (2.85)$$

Графики изменения скорости движения и ускорения точки  $C$  при угловой скорости кривошипа  $OA$   $\omega = 29,3$  рад/с за один оборот кривошипа  $OA$  представлены на рис. 2.21.

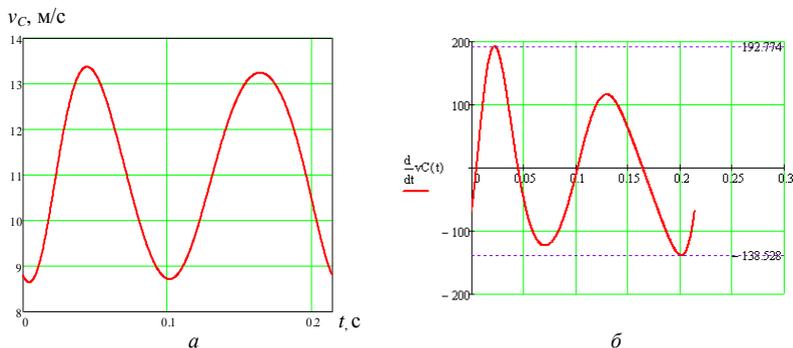


Рис. 2.21. Графики изменения скорости (а) и ускорения (б) движения точки  $C$

Анализируя графические зависимости (рис. 2.21), можно отметить, что в любом положении механизма абсолютная скорость рабочего органа  $v_C$  не превышает критической скорости удара по массе, при которой начинается разрушение семян (критическая скорость находится в пределах 17–28 м/с) [128, 137]. При этом диапазон изменения скоростей точки  $C$  находится в пределах от 8,7 до 13,4 м/с, а ее ускорение изменяется в пределах от 138,528 до 192,774 м/с<sup>2</sup>.

Таким образом, рассмотренная методика расчета и анализа позволяет связать конструктивные параметры исследуемого обмолачивающего устройства с кинематическими параметрами движения его основных звеньев. Полученные результаты будут использованы при проведении теоретических и планировании экспериментальных исследований обмолачивающего устройства.

## **2.8. Обоснование скорости зажимного транспортера обмолачивающего устройства**

Качество работы обмолачивающего устройства во многом зависит от согласованности скорости подаваемой на обмолот ленты льнотресты, ширины рабочего органа и частоты его воздействия на обрабатываемый материал.

Схема для обоснования скорости ленты льнотресты представлена на рис. 2.22.

Лента стеблей льна 2 при обмолоте удерживается зажимным транспортером 1 на участке  $L_{зт}$  на расстоянии  $L_{кс}$  от корней. На участке  $L_{ст}$  происходит воздействие рабочего органа (бича) при обмолоте, а между участками  $L_{зт}$  и  $L_{ст}$  образуется участок  $L_{мз}$  – «мертвая» зона. Участок ленты льнотресты  $L_{ст}$  содержит в себе семенные коробочки, которые необходимо отделить от стеблей или разрушить обмолачивающим устройством.

Очевидно, что скорость зажимного транспортера 1 и скорость ленты стеблей 2 – это тождественные понятия ( $v_{тр} = v_л$ ) при условии стабильного и непрерывного протекания процесса обмолота.

Стабильность и непрерывность протекания изучаемого процесса обмолота семенных коробочек льна подразумевает отсутствие обрыва стеблей при их движении и защемлении между декой и бичом в рабочей зоне его воздействия.

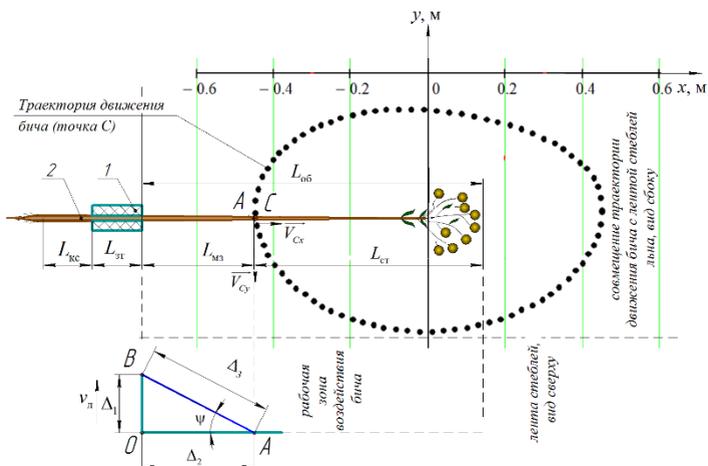


Рис. 2.22. Схема к определению скорости ленты льнотресты:  
 1 – зажимной транспортер; 2 – стебель льна;  $L_{жс}$  – участок комлевой части стебля;  
 $L_{ст}$  – участок стебля в зажимном транспортере;  $L_{мз}$  – «мертвая» зона;  
 $L_{ст}$  – участок стебля, подверженный воздействию бича;  
 $L_{об}$  – длина стебля, выступающего из зажимного транспортера

Интерпретировав систему уравнений (2.84) графически при фиксированных значениях длины кривошипа ( $R = 0,3$  м), длины шатуна ( $l + l_1 = 0,808 + 0,4 = 1,208$  м), длины коромысла ( $R_1 = 0,95$  м), горизонтального смещения точки крепления коромысла  $R_1$  относительно центра вращения кривошипа ( $a = 0,95$  м), вертикального смещения точки крепления коромысла  $R_1$  относительно центра вращения кривошипа ( $b = 0,75$  м), совместили полученный график с точкой начала взаимодействия бича с лентой льнотресты в точке  $A$  (см. рис. 2.18). При этом анализ изменения скорости рабочего органа (точки  $C$ ) показал, что в крайнем левом положении траектории движения (соответствующем точке  $A$ ) она имеет наименьшее значение, а проекция скорости бича на ось  $Ox$  близка к нулю. С некоторым допущением можем предположить, что на протяжении времени  $\Delta t$  от момента начала воздействия бича на стебли до возможного их обрыва бич не перемещается по оси  $Ox$ , а удерживает в сжатом состоянии ленту стеблей льна. В то же время зажимной транспортер продолжает перемещать ленту льнотресты, что может привести к обрыву стеблей, а соответственно, и к снижению качества льноволокна.

На схеме (см. рис. 2.22)  $\Delta_1$  – смещение ленты льнотресты, соответствующее времени  $\Delta t$  удержания стеблей бичом от момента начала зажатия его в точке  $A$  до возможного их обрыва, м;  $\Delta_2$  – расстояние от зажимного транспортера до точки  $A$  («мертвая» зона), м;  $\Delta_3$  – максимальный допустимый участок смещенного на  $\Delta_1$  стебля, при котором не происходит его обрыва при удерживании бичом и декой в точке  $A$ , м.

Нетрудно заметить, что

$$\Delta_1 = \frac{v_{\text{тр}}}{\Delta t} = \frac{v_{\text{л}}}{\Delta t}. \quad (2.86)$$

Параметр  $\Delta_2$  можно определить по формуле

$$\Delta_2 = L_{\text{мз}} = L_{\text{об}} - L_{\text{ст}}, \quad (2.87)$$

где  $L_{\text{об}}$  – длина стебля, выступающего из зажимного транспортера, м;  
 $L_{\text{ст}}$  – участок стебля, подверженный воздействию бича, м.

Величина  $L_{\text{ст}}$  должна быть больше величины зоны расположения семенных коробочек в ленте льна.

Из выражения (2.86) следует:

$$v_{\text{л}} = \frac{\Delta_1}{\Delta t}. \quad (2.88)$$

В свою очередь, из прямоугольного треугольника  $OAB$

$$\Delta_1 = \sqrt{\Delta_3^2 - \Delta_2^2}. \quad (2.89)$$

Учитывая, что  $\Delta_3$  – это расположенный в «мертвой» зоне участок стебля льна до возможного его обрыва, который по сравнению с  $\Delta_2$  изменился на некоторую величину ( $\Delta_3 - \Delta_2$ ), значение этого изменения для различных значений  $\Delta_2$  проще всего определять через относительное удлинение  $\epsilon_{\text{ст}}$  участка  $\Delta_2$  стебля льна:

$$\epsilon_{\text{ст}} = \frac{\Delta_3 - \Delta_2}{\Delta_2} = \frac{\Delta_3}{\Delta_2} - 1. \quad (2.90)$$

С учетом выражений (2.89) и (2.90) уравнение (2.88) примет вид

$$v_{л} = \frac{\sqrt{((\varepsilon_{ст} + 1) \cdot \Delta_2)^2 - \Delta_2^2}}{\Delta t}. \quad (2.91)$$

Для обеспечения качественной работы обмолачивающего устройства (отсутствия повреждения стеблей льна) необходимо, чтобы скорость ленты льнотресты не превышала ее критического значения, т. е.

$$v_{л} \leq \frac{\sqrt{((\varepsilon_{ст} + 1) \cdot \Delta_2)^2 - \Delta_2^2}}{\Delta t}. \quad (2.92)$$

Из неравенства (2.92) видно, что скорость ленты льнотресты зависит от величины относительного удлинения стеблей, величины «мертвой» зоны, а также времени сжатия и удержания стеблей бичом в начале воздействия его на ленту. Для предлагаемого обмолачивающего устройства с эластичным рабочим органом минимальная величина «мертвой» зоны обусловлена конструктивными особенностями и составляет 0,08 м, а ее максимальное значение обусловлено технологическим процессом, зависит от зоны расположения коробочек в ленте и из выражения (2.88) равно 0,15 м [59].

Неизвестной величиной в неравенстве (2.92) является относительное удлинение стеблей льна, которое характеризует упругие свойства стебля и может быть определено только опытным путем. Экспериментальное определение данного параметра позволит обосновать верхнюю границу скорости зажимного транспортера.

## **2.9. Обоснование параметров взаимного расположения рабочих органов обмолачивающего устройства**

Лента льнотресты, подаваемая на обмолот, представляет собой слой стеблей, длина которых находится в пределах 0,7–1,2 м [141].

Технологический процесс обмолота ленты в линии переработки льна предусматривает удерживание стеблей зажимным транспортером на участке  $L_{ст} = 0,15$  м на расстоянии  $L_{кк} = 0,2 \dots 0,25$  м от корней стеблей (рис. 2.23).



Для наиболее эффективной работы бич (точка  $C$  на рис. 2.19), движущийся по криволинейной траектории, с одной стороны, должен пересекать плоскость зажатой в транспортере ленты льнотресты, а с другой – не должен заходить в зону расположения зажимного транспортера (во избежание уменьшения рабочей зоны бича).

Этому условию удовлетворяет схема (см. рис. 2.23), на которой траектория движения бича максимально приближена к транспортеру по оси  $Ox$ , а по оси  $Oy$  своим центром лежит на линии расположения ленты льнотресты. При этом начало взаимодействия бича со стеблями будет происходить в точке  $D$ .

Поскольку бич будет изгибать стебли на некоторый угол  $\eta$  с малой кривизной, при превышении предельного значения этого угла возникает опасность излома стеблей, что отрицательно скажется на выходе длинного волокна.

При рассматриваемом взаимном расположении рабочих органов (см. рис. 2.23) бич в точке  $D$  движется вертикально вниз, и угол  $\eta$  изгиба стебля стремится к  $90^\circ$ , что значительно превышает его предельное значение  $\eta_{\text{пред}} = 30 \dots 43^\circ$ , которое зависит от диаметра стебля [33].

Увеличить кривизну изгиба и тем самым уменьшить угол изгиба в отдельных точках стебля можно, подняв траекторию движения бича относительно ленты стеблей льна или сместив ее в сторону от зажимного транспортера. В обоих случаях (рис. 2.24) образуется участок  $L_{\text{мз}}$  стеблей льна – «мертвая» зона, не подверженная воздействию рабочего органа.

С точки зрения минимизации «мертвой» зоны и уменьшения влияния вертикальной составляющей скорости бича на нежелательный изгиб стеблей перспективнее видится смещение траектории движения бича вверх.

При таком расположении траектории следует иметь в виду, что уменьшение «мертвой» зоны сопровождается увеличением угла изгиба стеблей.

При этом максимальное значение угла будет соответствовать точке  $P$ , в которой стебли льна будут располагаться по касательной к траектории движения бича.

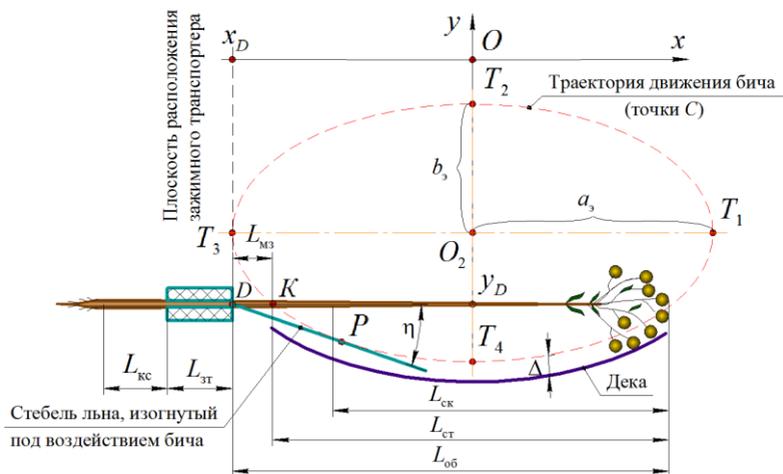


Рис. 2.24. Схема к определению параметров взаимного расположения рабочих органов обмолачивающего устройства

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что располагать траекторию движения бича необходимо выше ленты льно-тресты таким образом, чтобы угол изгиба  $\eta$  не превышал своего предельного значения  $\eta_{пред}$ . В то же время величина «мертвой» зоны не должна превышать 0,15 м ( $L_{МЗ} = 0,08 \dots 0,15$  м) [59].

Расположение зажимного транспортера относительно траектории движения бича (см. рис. 2.24) характеризуется координатами точки  $D(x_D; y_D)$ , где  $x_D$  и  $y_D$  – соответствующие проекции точки  $D$  на декартовую систему координат, центр которой находится в точке  $O$ , являющейся центром вращения кривошипа. Заметим, что положение точки  $D$  непосредственно связано с траекторией движения точки  $C$  (нижний конец шатуна), которая описывается системой уравнений (2.84). Выделим на этой траектории, представляющей собой эллипс, характерные ее точки  $T_1, T_2, T_3$  и  $T_4$ , являющиеся вершинами эллипса, а также определим координаты центра эллипса  $O_2$ .

Согласно формуле (2.76) можно определить время, за которое кривошип, движущийся с постоянной угловой скоростью  $\omega$ , делает один полный оборот, и при этом точка  $C$  совершает один цикл движения.

$$t_k = \frac{2\pi}{\omega}, \quad (2.93)$$

где  $\omega$  – угловая скорость кривошипа  $OA$ , рад/с.

Тогда характерные точки траектории движения точки  $C$  определяются из системы уравнений (2.84) как  $T_1(x_C(0); y_C(0))$ ,  $T_2(x_C(t_k/4); y_C(t_k/4))$ ,  $T_3(x_C(t_k/2); y_C(t_k/2))$ ,  $T_4(x_C(3t_k/4); y_C(3t_k/4))$ , а центр эллипса будет определяться следующими координатами:  $O_2(0; (y_C(t_k/4) + y_C(3t_k/4))/2)$  (см. рис. 2.24).

С учетом вышеизложенного траектория движения точки  $C$  с привязкой к системе координат  $xOy$  может быть описана следующим уравнением:

$$\frac{x^2}{a_3^2} + \frac{(y - y_{O_2})^2}{b_3^2} = 1, \quad (2.94)$$

где  $a_3 = x_C(0)$  – большая полуось эллипса, м;

$$b_3 = \frac{y_C\left(\frac{t_k}{4}\right) - y_C\left(\frac{3t_k}{4}\right)}{2} \text{ – меньшая полуось эллипса, м;}$$

$$y_{O_2} = \frac{y_C\left(\frac{t_k}{4}\right) + y_C\left(\frac{3t_k}{4}\right)}{2} \text{ – ордината центра эллипса, м.}$$

Для минимизации «мертвой» зоны абсциссу точки  $D$  целесообразно зафиксировать на значении  $x_D = x_C(t_k/2)$ . При этом ордината этой точки не должна быть больше ординаты точки  $O_2$ , т. е.

$$y_D \leq y_{O_2}. \quad (2.95)$$

Возможные значения ординаты точки  $D$  и «мертвой» зоны  $DK$  определим из схемы (см. рис. 2.24).

Примем во внимание условие, что угол изгиба  $\eta$  стеблей в ленте при воздействии на них рабочего органа не должен превышать  $30\text{--}43^\circ$ .

Из рис. 2.24 видно, что прямая  $DP$  является касательной к траектории движения точки  $C$  на участке  $T_3T_4$ .

Это означает, что угловой коэффициент прямой  $DP$  определяется как

$$k_{DP} = \operatorname{tg}(\eta), \quad (2.96)$$

а с другой стороны,

$$\operatorname{tg}(\eta) = \frac{y_C'(t)}{x_C'(t)}. \quad (2.97)$$

Решив уравнение (2.97) относительно времени  $t$ , получим момент времени  $t_P$ , при котором точка  $C$  траектории движения перейдет в точку контакта  $P$  со стеблями. Тогда координаты точки  $P$  можно определить выражениями:

$$x_P = x_C(t_P); \quad y_P = y_C(t_P). \quad (2.98)$$

Составим уравнение прямой  $DP$ :

$$\frac{x - x_D}{x_P - x_D} = \frac{y - y_D}{y_P - y_D}. \quad (2.99)$$

Чтобы определить угловой коэффициент этой прямой, выразим из уравнения (2.99) переменную  $y$ :

$$y = \frac{y_P - y_D}{x_P - x_D} \cdot (x - x_D) + y_D, \quad (2.100)$$

где  $k_{DP} = \frac{y_P - y_D}{x_P - x_D} = \operatorname{tg}(\eta)$ .

Тогда ордината точки  $D$  определится выражением

$$y_D = \operatorname{tg}(\eta) \cdot (x_P - x_D) + y_P. \quad (2.101)$$

Для определения «мертвой» зоны, т. е. длины отрезка  $DK$ , определим момент времени  $t_{DK}$ , при котором точка  $C$  переходит в точку  $K$ , из уравнения

$$y_C(t) - y_D = 0. \quad (2.102)$$

Тогда абсцисса точки  $K$  может быть определена как

$$x_K = x_C(t_{DK}), \quad (2.103)$$

а «мертвая» зона будет определяться формулой

$$L_{мз} = x_K - x_D. \quad (2.104)$$

Так как рабочий орган взаимодействует со стеблями на промежутке времени  $[t_{DK}; t_K]$ , то длину рабочего участка  $KT_1$ , на котором может происходить обмолот стеблей, определим по следующей зависимости:

$$l_{вз} = \int_{t_{DK}}^{t_K} \sqrt{(x'_C(t))^2 + (y'_C(t))^2} dt. \quad (2.105)$$

Таким образом, при определении размера сепарирующей решетки (деки) необходимо учесть полученную длину рабочего участка  $l_{вз}$ , а при выборе формы – конфигурацию траектории движения точки  $C$  на участке от  $K$  до  $T_1$ , смещая деку от этой траектории движения на величину молотильного зазора  $\Delta$ .

Приведем пример расчета параметров взаимного расположения рабочих органов обмолачивающего устройства в математическом пакете MathCad (рис. 2.25) при фиксированных значениях длины кривошипа ( $R = 0,3$  м), длины шатуна ( $l + l_1 = 0,808 + 0,4 = 1,208$  м), длины коромысла ( $R_1 = 0,95$  м), горизонтального смещения точки крепления коромысла  $R_1$  относительно центра вращения кривошипа ( $a = 0,95$  м), вертикального смещения точки крепления коромысла  $R_1$  относительно центра вращения кривошипа ( $b = 0,75$  м).

Предположим, что частота вращения кривошипа  $OA$   $n = 3$  об/с, а предельное значение угла изгиба стеблей льна  $\eta_{пред} = 30^\circ$ .

**Mathcad - [Обоснование параметров расстановки зажимного транспортера]**

Файл Правка Вид Добавить Формат Инструменты Символика Окно Справка

100%

Normal Arial 10 **B** *I* U

**Расчет величины мертвой зоны и длины участка стеблей взаимодействующего с бичом**

частота вращения кривошипа OA  $n := 3$

предельный угол изгиба стеблей льна  $\eta := 30$

$\omega := n \cdot 2 \cdot \pi = 18.85$   $tk := \frac{2\pi}{\omega} = 0.333$   $t := 0, 0.002.. tk$

$t := \frac{tk}{2} - \tan\left(\frac{\eta \cdot \pi}{180}\right) = -0.577$  угол изгиба стеблей

Найдем момент времени tP

$j(t) := \frac{\frac{d}{dt}yC(t)}{\frac{d}{dt}xC(t)} + \tan\left(\frac{\eta \cdot \pi}{180}\right)$   $tP := \text{root}(j(t), t) = 0.217$  момент времени tP

Найдем координаты точки P

$xP := xC(tP) = -0.274$   $yP := yC(tP) = -0.631$  координаты точки P

Найдем координаты точки D

$xD := xC\left(\frac{tk}{2}\right) = -0.449$   $yD := \tan\left(\frac{\eta \cdot \pi}{180}\right) \cdot \left(xP - xC\left(\frac{tk}{2}\right)\right) + yP = -0.53$  координаты точки D

Найдем координаты точки K

$tDK := \text{root}(yC(t) - yD, t) = 0.195$  момент времени tDK

$xK := xC(tDK) = -0.391$   $yK := yC(tDK) = -0.53$  координаты точки K

Определим величину "мертвой зоны" стеблей

$L_{мз} := xK - xD = 0.0575$  величина "мертвой зоны" стеблей

Определим длину участка стеблей, взаимодействующих с бичом

$$l_{вз} := \int_{tDK}^{tk} \sqrt{\left(\frac{d}{dt}xC(t)\right)^2 + \left(\frac{d}{dt}yC(t)\right)^2} dt = 1.049$$

Рис. 2.25. Исходные данные и расчетная часть в математическом пакете MathCad определения величины «мертвой» зоны и длины участка стеблей, взаимодействующего с бичом

Полученное в результате расчета минимальное значение «мертвой» зоны  $L_{мз} = 0,058$  м не учитывает особенностей конструктивного исполнения зажимного транспортера и в целях обеспечения движения бича без касания его элементов может быть несколько увеличено. Расчетное максимальное значение длины траектории возможного воздействия бича на стебли составит 1,049 м, что существенно превысит длину участка стеблей, находящегося в зоне обмолота  $L_{ст}$ , и обеспечит эффективную работу обмолачивающего устройства.

По результатам проведенных расчетов установлено, что условию минимального значения «мертвой» зоны  $L_{мз} = 0,058$  м и предельного значения угла изгиба стеблей льна  $\eta_{пред} = 30^\circ$  удовлетворяют:

– расположение зажимного транспортера (точка  $D$ ) ниже оси вращения кривошипа  $OA$  на величину  $y_D = 0,53$  м с горизонтальным смещением влево на величину  $x_D = 0,449$  м;

– расположение ближнего к зажимному транспортеру края сепарирующей решетки (деки) ниже оси вращения кривошипа  $OA$  на величину  $y_K + \Delta = 0,53 + \Delta$  м с горизонтальным смещением влево на величину  $x_K = 0,391$  м.

Геометрическая форма сепарирующей решетки (деки) должна повторять конфигурацию траектории движения бича на участке рабочего хода и иметь начало в точке  $K$ , а длина ее должна быть больше длины участка  $L_{ст}$  стеблей, подвергаемого воздействию рабочего органа. При этом саму деку необходимо сместить вниз от траектории движения бича на величину молотильного зазора  $\Delta$ .

## Выводы

Теоретические исследования процесса обмолота стеблей льно-тресты очесывающе-плющильным аппаратом позволили:

1. Получить аналитические зависимости, позволяющие определить площадь (уравнение (2.1)) и объем (уравнение (2.9)) слоя стеблей льна, находящегося под периодическим воздействием эластичного рабочего органа в зоне обмолота. Установлено, что параметры слоя определяются количеством стеблей на единицу длины ленты, их конусностью и диаметром комлевой части, а также длиной участка стеблей, подвергаемого воздействию эластичного рабочего органа при обмолоте [57].

2. Получить модель поверхности коробочки льна при деформации (2.22). Разработана методика определения деформаций коробочки льна  $\Delta_{кх}$  и  $\Delta_{ку}$  при ее сжатии между бичом и декой в

зависимости от деформации  $\Delta_{кз}$  и диаметра семенной коробочки  $d_k$  [58]. Получено уравнение (2.26), позволяющее с учетом уравнений (2.48)–(2.50) определить деформации и механическое напряжение в любой точке семенной коробочки льна при ее сжатии [39].

3. Определить минимальный допустимый зазор между бичом и декой (зависимость (2.60)), исходя из размеров коробочек и семян льна и условия нетравмирования последних [60].

4. Установить, что наиболее эффективной формой рабочей кромки эластичного бича с точки зрения повышения уплотняющей и проникающей способностей является зубчатая треугольная. Получена зависимость (2.75) для определения высоты зуба бича. Определены рациональные интервалы параметров зубчатой кромки бича: угла  $\alpha_3$  (5–40°), высоты зуба  $h_3$  (0,0096–0,05 м) [105].

5. Получить параметрические уравнения (2.77), (2.78), (2.84), позволяющие связать конструктивные параметры исследуемого обмолачивающего устройства с кинематическими параметрами движения его основных звеньев [145].

6. Получить зависимость (2.92), связывающую скорость ленты льнотресты с относительным удлинением участка стеблей, расположенного в «мертвой» зоне, за время от момента начала воздействия бича на стебли до возможного их обрыва [59].

7. Получить аналитические зависимости (2.98), (2.101), (2.104) и (2.105), позволяющие определить параметры взаимного расположения рабочих органов разработанного обмолачивающего устройства с учетом конструктивных параметров кривошипно-шатунного механизма с коромыслом. Обоснована геометрическая форма сепарирующей решетки (деки), которая должна повторять конфигурацию траектории движения бича на участке рабочего хода, смещенную вниз на величину молотильного зазора [104].

### **3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

#### **3.1. Программа исследований**

Проведенные теоретические исследования процесса обмолота корочек льна очесывающе-плющильным аппаратом позволили сделать вывод о том, что показатели процесса обмолота зависят от физико-механических свойств льнотресты, параметров ленты льнотресты, конструктивных и кинематических параметров обмолачивающего устройства.

При проведении теоретических исследований процесса обмолота были приняты некоторые допущения, упрощающие определение рассматриваемых параметров. Поэтому на втором этапе ставилась задача в результате проведения лабораторных исследований получить математическую модель процесса обмолота лент льнотресты устройством очесывающе-плющильного действия и определить рациональные значения его параметров. Основным критерием при проведении исследований являлось обеспечение минимальных потерь семян от недомолота с сохранением их качественных показателей, а также исключение обрыва стеблей [130].

В соответствии с вышеизложенным программа лабораторных исследований включала:

- изучение физико-механических и технологических свойств ленты льнотресты;
- определение параметра оптимизации процесса обмолота;
- выбор и обоснование основных факторов, влияющих на параметр оптимизации процесса обмолота лент льнотресты, интервалов и уровней их варьирования;
- определение рациональных значений параметров обмолачивающего устройства и получение математической модели процесса обмолота, адекватно описывающей процесс [130].

В дальнейшем предполагалось проведение производственных испытаний для подтверждения результатов теоретических и лабораторных исследований.

Производственные испытания включали:

- проверку результатов теоретических и лабораторных исследований в производственных условиях;

– проведение сравнительных исследований существующего гребневого очесывающего и предлагаемого очесывающе-плющильного аппаратов в линии первичной переработки льнотресты в условиях льнозавода.

### **3.2. Определение параметров ленты льнотресты в линии первичной переработки**

Лента льнотресты, поступающая на обмолот в линии первичной переработки, формируется при размотке рулонов, а в последующем выравнивается работниками вручную. При этом лента льнотресты неоднородна и имеет перекосы стеблей льна, растянутость и конусность.

С целью изучения свойств ленты льнотресты в линии первичной переработки были проведены измерения ее параметров на участке конвейера после выравнивания слоя до участка обмолота.

При этом определялись:

- количество стеблей в ленте льнотресты на один погонный метр, шт.;
- количество семенных коробочек на стебле, шт.;
- количество семян в коробочке, шт.;
- длина стеблей, м;
- средняя ширина ленты льнотресты, м;
- конусность стеблей льнотресты;
- растянутость ленты льнотресты;
- относительный перекося стеблей в ленте льнотресты, рад;
- влажность льнотресты, %.

Для сокращения объема экспериментальной работы и получения достоверных результатов исследований необходимый объем выборки из неограниченной совокупности определяли по зависимости [19]

$$n_B = \frac{t_c^2 \cdot \sigma_{cp}^2}{\Delta_o^2}, \quad (3.1)$$

где  $t_c$  – критерий Стьюдента;

$\sigma_{cp}$  – среднее квадратическое отклонение, %;

$\Delta_o$  – возможная ошибка среднего арифметического значения, %.

Значение критерия Стьюдента  $t_c$  зависит от выбранного уровня значимости. В расчетах принимаем  $t_c = 2,447$  [25, 49]. При этом вероятность охвата генеральной средней в исчисленных пределах равна 0,95.

Значение относительной величины предельной ошибки при исследовании сельскохозяйственных сред, материалов и растений рекомендуется выбирать в пределах 3–5 % [49, 95].

Количество стеблей в ленте льнотресты на один погонный метр, количество семян в коробочке и количество семенных коробочек на стебле определяли путем подсчета.

Конусность стеблей льнотресты определялась по зависимости

$$k_c = \frac{d_{\text{ст.к}} - d_{\text{ст.в}}}{L}, \quad (3.2)$$

где  $d_{\text{ст.к}}$  – диаметр стебля льнотресты у комлевой части, м;

$d_{\text{ст.в}}$  – диаметр стебля льнотресты у верхушечной части, м;

$L$  – длина стебля льна между местами измерения диаметров, м.

Растянutosть ширины ленты льнотресты определялась согласно ГОСТ 33734–2016 [141] по следующей зависимости:

$$\mu = \frac{B_{\text{л.ср}}}{L_{\text{ср}}}, \quad (3.3)$$

где  $B_{\text{л.ср}}$  – средняя ширина ленты льнотресты, м;

$L_{\text{ср}}$  – средняя общая длина стеблей, м.

Относительный перекося стеблей в ленте определяли следующим образом.

На ленту льнотресты перпендикулярно движению конвейера укладывалась первая планка, а вторая планка укладывалась параллельно перекошенным стеблям. Образованный планками угол соответствовал углу перекося  $\xi$  стеблей в ленте льнотресты (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Схема определения угла перекоса стеблей в ленте льнотресты в линии первичной переработки

В процессе исследований визуально фиксировались видимые перекосы стеблей льнотресты в ленте и производились измерения угла перекоса  $\xi$  стеблей в соответствующих местах.

Исследования проводились на трех рулонах льнотресты с разных полей.

Измерение угла перекоса производили с помощью оптического угломера УО-2 ГОСТ 11197–73 1-го класса точности, длину участка определяли с помощью рулетки Р5УЗП ГОСТ 7502–98 класс точности 3, а диаметр стеблей льнотресты – с помощью штангенциркуля электронного ШЦЦ-1 ГОСТ 166–89 1-го класса точности.

Повторность опытов трехкратная, каждую повторность выполняли по вышеизложенным методикам.

### **3.3. Методика определения деформации семенной коробочки льна**

Для определения значений упругой (восстанавливаемой) деформации коробочки льна, деформации при ее разрушении и соответствующих сил сжатия, а также модуля Юнга была изготовлена лабораторная установка (рис. 3.2).

Лабораторная установка представляла собой плиту 1, на которой

жестко смонтирована стойка 2 с механизмом воздействия на коробочку, который включал рукоятку 3, винт 5 с пружиной 4 и ползун 8 с отполированной рабочей поверхностью. Для плавности хода винта установлена упругая резьбовая вставка 6. На плиту под ползун устанавливались лабораторные весы ВК-600 таким образом, чтобы сила воздействия на коробочку льна приходилась в центр тарелки весов. Для определения величины смятия коробочки льна на стойке жестко крепился индикатор часового типа ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм, измерительный стержень которого упирался в полку ползуна 8.

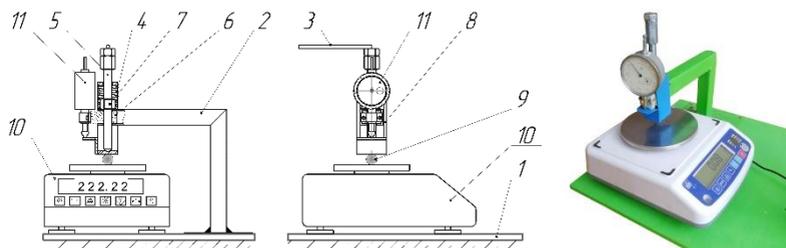


Рис. 3.2. Установка для определения значений деформации коробочек льна и сил сжатия:

1 – плита; 2 – стойка; 3 – рукоятка; 4 – пружина; 5 – винт; 6 – резьбовая упругая вставка; 7 – гайка; 8 – ползун; 9 – коробочка льна; 10 – весы; 11 – индикатор

Опыты проводили следующим образом. Коробочка льна, диаметр которой предварительно определялся с помощью цифрового штангенциркуля ШЦЦ-I, укладывалась посредине тарелки весов 10, а ползун располагался относительно коробочки так, чтобы ось вращения винта совпадала с центром коробочки. При вращении рукоятки винт перемещался вниз и воздействовал на ползун, который, преодолевая усилие пружины, двигался в направлении коробочки льна 9. В момент касания рабочей поверхностью ползуна коробочки индикаторная шкала весов отображала незначительное усилие, действующее на коробочку льна, в этот момент шкалу индикатора ИЧ-10 устанавливали на ноль. В дальнейшем производили сжатие коробочки с шагом 20 мкм и фиксировали значения силы в каждом из положений. Также фиксировались значения силы сжатия и деформации коробочки в момент ее разрушения. Исследованию подвергались 50 семенных коробочек льна различного диаметра.

Для определения вышеперечисленных параметров использовались

рулоны льнотресты ОАО «Горкилен» сорта Грант. Исследованиям подвергались только целые (нераскрывшиеся) семенные коробочки льна влажностью 12–14 %.

Исследования проводились в студенческой научно-исследовательской лаборатории «Ресурсосберегающие технологии переработки льна» кафедры безопасности жизнедеятельности Белорусской государственной сельскохозяйственной академии.

Модуль Юнга материала семенной коробочки льна на основании формулы (2.52) определяли по зависимости

$$E = \frac{F_{\text{упр}} \cdot d_{\text{к}}}{S \cdot \Delta_{\text{кз}}}, \quad (3.4)$$

где  $F_{\text{упр}}$  – сила упругого сжатия коробочки льна, Н;

$d_{\text{к}}$  – диаметр семенной коробочки льна, м;

$S$  – площадь поперечного сечения семенной коробочки льна, м<sup>2</sup>;

$\Delta_{\text{кз}}$  – деформация семенной коробочки льна, м.

#### **3.4. Методика определения угла отгиба и относительного удлинения стеблей льнотресты при обрыве**

Теоретический анализ изменения скорости бича показал, что в крайнем левом положении траектории его движения скорость имеет наименьшее значение, а горизонтальная составляющая скорости бича близка к нулю. Таким образом, с некоторым допущением можно пренебречь его перемещением в направлении горизонтальной оси на протяжении некоторого времени с момента воздействия на ленту стеблей, удерживаемых в молотильном зазоре в сжатом состоянии. В это время зажимной транспортер продолжает перемещать стебли, которые изгибаются и растягиваются, что может привести к их обрыву, а соответственно, и к снижению качества льноволокна.

С целью определения допустимых угла отгиба стебля, смещения ленты льнотресты, соответствующих времени удержания стеблей бичом от момента начала зажатия до возможного их обрыва и относительного удлинения стебля до обрыва, была изготовлена лабораторная установка (рис. 3.3).

Исследования проводились в студенческой научно-исследовательской лаборатории «Ресурсосберегающие технологии переработки льна» кафедры безопасности жизнедеятельности Белорусской государственной сельскохозяйственной академии.

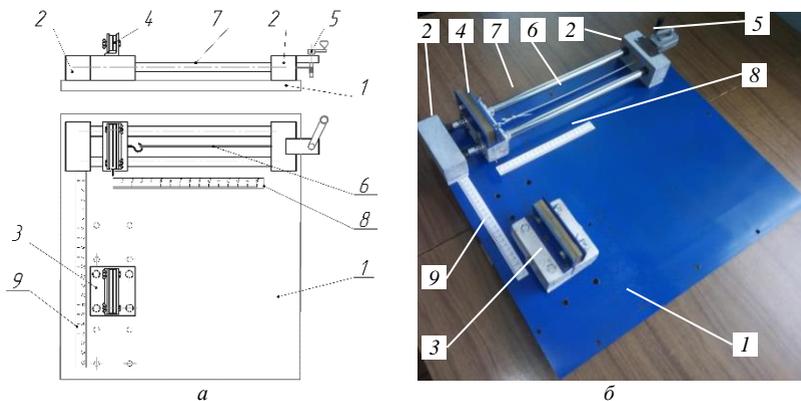


Рис. 3.3. Схема (а) и общий вид (б) установки для определения смещения ленты льнотресты за время от момента начала зажатия стеблей до возможного их обрыва:

- 1 – плита; 2 – опоры; 3 – переставная каретка; 4 – передвижная каретка;  
 5 – механизм натяжения; 6 – тросик; 7 – направляющие;  
 8 – шкала передвижной каретки; 9 – шкала переставной каретки

Установка представляла собой сплошную плиту 1, на которой жестко закреплены опоры 2 с двумя направляющими 7 для подвижной каретки 4. Для плавного перемещения каретки 4 на правой опоре установлен ручной механизм натяжения 5, соединенный с кареткой 4 посредством тросика 6. Параллельно перемещению каретки 4 нанесена шкала 8 с нулевой отметкой в крайнем левом положении каретки 4. На плите 1 также установлена переставная каретка 3 таким образом, что перемещения кареток взаимно перпендикулярны. Для перемещения каретки 3 в плите 1 предусмотрены отверстия. Параллельно перемещению каретки 3 нанесена шкала 9. На каретках 3 и 4 предусмотрены зажимные устройства стеблей льнотресты, каждое из которых состоит из двух металлических и двух полиуретановых пластин.

Опыты проводили следующим образом. В процессе проведения исследований переставная каретка устанавливалась на расстоянии 0,05, 0,10, 0,15 и 0,20 м от передвижной каретки. Зажимные устройства устанавливались в одной плоскости, и в них между полиуретановыми пластинами укладывался стебель льна и фиксировался зажимными винтами. Измерение диаметра стебля льна производили в зажатом состоянии в наиболее тонком месте с помощью электронного штангенциркуля с точностью до 0,01 мм.

Затем, вращая рукоятку механизма натяжения, плавно перемещали передвижную каретку по направляющим. При этом стебель льно-тресты отгибался и растягивался до момента обрыва, который фиксировался по шкале линейки ГОСТ 5094–74 с точностью до 1 мм, что соответствовало величине  $\Delta_1$  (рис. 3.4).

Угол отгиба стебля  $\psi$  определялся по зависимости

$$\operatorname{tg}(\psi) = \frac{\Delta_1}{\Delta_2}, \quad (3.5)$$

где  $\psi$  – угол отгиба стебля в момент обрыва, град;

$\Delta_1$  – смещение ленты льнотресты, соответствующее времени  $\Delta t$  удержания стеблей бичом от момента начала зажатия до возможного их обрыва, м;

$\Delta_2$  – расстояние от передвижной каретки до переставной каретки, м (принималось равным 0,05, 0,10, 0,15 и 0,20 м).

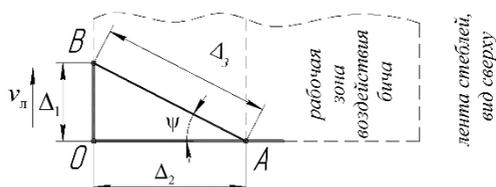


Рис. 3.4. Схема к определению угла отгиба и относительного удлинения стебля при обрыве

Относительное удлинение участка  $\Delta_2$  стеблей льна определялось по зависимости

$$\epsilon_{\text{ст}} = \frac{\Delta_3 - \Delta_2}{\Delta_2} = \frac{\sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2} - \Delta_2}{\Delta_2}, \quad (3.6)$$

где  $\Delta_3$  – длина участка стебля льна в момент обрыва, м.

### **3.5. Обоснование выбора параметра оптимизации, основных влияющих на него факторов и интервалов их варьирования**

Факторные исследования, дисперсионный анализ их результатов и экстремальное планирование эксперимента являются современными методами исследований. Их преимущества, по сравнению с традиционными методами, состоят в том, что они позволяют сократить количество и сроки проведения опытов, получить более достоверную информацию, установить степень влияния факторов на параметр оптимизации и их взаимодействия, а также найти рациональное сочетание этих факторов [34, 89, 95].

В процессе решения экстремальной задачи предусматривался ряд последовательных этапов. Вначале производили серию отсеивающих экспериментов и после обработки результатов получали представление о степени влияния отдельных факторов на параметр оптимизации. При этом для сокращения объема дальнейших исследований малозначащие факторы исключали. На следующем этапе вели поиск области оптимума. Вначале с помощью небольшого числа опытов устанавливали наикратчайшее направление к оптимуму, задаваемые коэффициенты линейной многофакторной регрессии в кодированном виде, являющиеся координатами вектора градиента поверхности отклика [49]. Двигаясь в установленном направлении, находили область оптимума.

На последнем этапе ставилась серия опытов для описания поверхности отклика полиномом второго порядка. После получения математической модели процесса проводили ее анализ на экстремум с целью отыскания оптимального сочетания факторов [87, 95, 98].

Для обеспечения достоверности результатов экспериментов все опыты проводились в трехкратной повторности.

Для математического описания изучаемого в лабораторных условиях процесса важно максимально соблюсти условия работы, соответствующие заводской линии первичной переработки льнотресты [90]. При этом нужно произвести правильный выбор основных факторов, влияющих на изучаемый процесс, а также определить их области варьирования. При определении границ изменения факторов учитывались теоретические исследования и априорная информация о влиянии факторов на значения параметров оптимизации.

В качестве параметра оптимизации нами была принята степень обмолота корбочек льна.

$$E_{об} = \frac{m_2}{m_1}, \quad (3.7)$$

где  $m_1$  – общая масса семян, содержащихся в одном погонном метре ленты льнотресты, кг;

$m_2$  – масса выделенных семян в результате обмолота с одного погонного метра, кг.

Для изучения процесса обмолота лент льнотресты обмолачивающим устройством с эластичным рабочим органом, имеющим зубчатую рабочую кромку, на основании теоретических исследований, проведенных нами во второй главе, и априорной информации [53, 130, 144] нами были выделены следующие факторы:

1. Смещение (приближение или удаление) подаваемой на обмолот ленты льнотресты относительно обмолачивающего устройства приводит к образованию участков стеблей с семенами, выходящих за границы рабочей зоны бича, что снижает степень отделения коробочек и семян. Это происходит одинаково независимо от направления смещения, поэтому нижний и верхний пределы варьирования устанавливались из условия обеспечения максимального воздействия бича на верхушечную (семенную) часть стеблей льна и принимались равным  $-0,1$  и  $+0,1$  м. Отрицательное значение соответствовало смещению ленты льнотресты в сторону удаления от оси вращения бича, положительное – в сторону приближения к ней. Шаг изменения смещения принимался равным  $0,05$  м [38, 75].

2. Скорость подаваемой на обмолот ленты определяет количество воздействий бича на ленту и изгиб стеблей, удерживаемых в молотильном зазоре, приводящий к обрыву. Увеличение скорости снижает число воздействий рабочего органа на стебли, что может снижать степень обмолота. Заводом-изготовителем линии первичной переработки льна минимальная скорость движения ленты льнотресты установлена на уровне  $1,2$  м/с [75, 59]. Нижняя и верхняя границы устанавливались из условия обеспечения производительности технологической линии. Поэтому значение границ принималось в пределах от  $1,2$  до  $2,0$  м/с. Шаг изменения скорости был принят равным  $0,2$  м/с [75].

3. Угол установки плоскости бича к плоскости ленты влияет на проникающую способность бича. Увеличение угла повышает проникающую способность, что улучшает выделение семян. Уменьшение угла обеспечивает более плавный вход бича на начальном этапе взаимодействия его с лентой, однако при дальнейшем движении пятно

контакта поверхности бича с лентой увеличивается, при этом растет сопротивление движению бича, а следовательно, и мощность на привод. Нижняя граница принималась равной 0,52 рад (30 град), верхняя – 1,22 рад (70 град). Шаг изменения принимали равным 0,175 рад (10 град) [38, 75].

4. Толщина подаваемой на обмолот ленты оказывает влияние на степень ее сжатия в молотильном зазоре, а следовательно, на степень обмолота, повреждения стеблей льна и семян льна. Увеличение толщины снижает проникающую способность бича в обрабатываемый слой, тем самым уменьшая степень обмолота. Увеличение толщины ленты при постоянном зазоре между бичом и декой приводит к повышению степени сжатия слоя стеблей, что, в свою очередь, обуславливает рост обрыва стеблей и повреждения семян при рабочем движении бича. Недостаточная толщина приводит к снижению эффективности воздействия бича на стебли и недомолоту. Пределы варьирования значений толщины слоя ленты льнотресты устанавливались исходя из возможной минимальной и максимальной урожайности и принимались равными: нижний – 0,01 м, верхний – 0,05 м. Шаг принимался равным 0,01 м [38, 75].

5. Зазор между бичом и декой оказывает существенное влияние на степень отделения семян от стеблей, при этом уменьшение зазора положительно сказывается на степени обмолота, а увеличение – наоборот, причем при зазоре, большем толщины подаваемой на обмолот ленты, процесс обмолота практически прекращается [75]. Кроме этого, зазор имеет важное значение для получения семян высоких посевных кондиций. Малый зазор приводит к чрезмерному повреждению семян и стеблей. Пределы варьирования устанавливались исходя из возможной минимальной и максимальной толщины обмолачиваемого слоя, которая определялась соответствующей урожайностью льна. Нижняя граница принималась равной 0,005 м, верхняя – 0,03 м. Шаг изменения принимали равным 0,005 м [38, 60, 75].

6. Частота вращения рабочего органа оказывает существенное влияние на степень обмолота, поскольку определяет количество воздействий бича на семенную часть ленты льнотресты. Низкая частота приводит к недостаточному числу воздействий, вследствие чего образуются пропуски и недомолот [38]. Высокая частота приводит к многократному воздействию на один и тот же участок ленты, что сопровождается повреждением стеблей и снижением качества волокна. Кроме того, увеличение частоты влечет за собой увеличение линейной скоро-

сти бича в рабочей зоне, превышение критического значения которой приводит к дополнительному повреждению стеблей и семян [38]. Значение нижней границы устанавливалось исходя из условия однократного воздействия рабочего органа на один и тот же участок ленты льнотресты, рассчитывалось теоретически и принималось равным  $1,7 \text{ с}^{-1}$ . Шаг изменения принимался равным  $0,4 \text{ с}^{-1}$ . Значение верхней границы устанавливалось в ходе проведения эксперимента по максимальному значению параметра оптимизации в соответствии с допустимыми агротребованиями повреждением стеблей и отходом их в путанину и принималось равным  $3,3 \text{ с}^{-1}$  [38, 75].

### 3.6. Методика проведения лабораторных исследований

Программа экспериментальных исследований по определению рациональных значений интервалов варьирования основных параметров процесса обмолота лент льнотресты устройством с эластичным рабочим органом выполнялась на лабораторной установке. Схема и общий вид лабораторной установки представлены на рис. 3.5 и 3.6.

Лабораторная установка включала раму 1 с зажимным транспортером 2 и обмолачивающим барабаном 4. Привод транспортера осуществлялся от мотор-редуктора 3, имеющего мощность 2,2 кВт и частоту вращения выходного вала  $125 \text{ мин}^{-1}$ . Привод барабана состоял из мотор-редуктора, имеющего мощность 4 кВт и частоту вращения выходного вала  $315 \text{ мин}^{-1}$ , и цепной передачи 6 с передаточным числом 1,5. Оба привода были снабжены индивидуальными преобразователями частоты вращения, позволяющими бесступенчато изменять контролируемые параметры: частоту вращения рабочего органа и скорость подачи ленты льнотресты. Для подачи ленты льнотресты лабораторная установка была оборудована подающим транспортером 13, привод которого осуществлялся от зажимного транспортера посредством цепной передачи, что обеспечивало одинаковую скорость лент подающего 13 и зажимного 2 транспортеров [75]. Для перемещения экспериментальной установки были предусмотрены колеса 10.

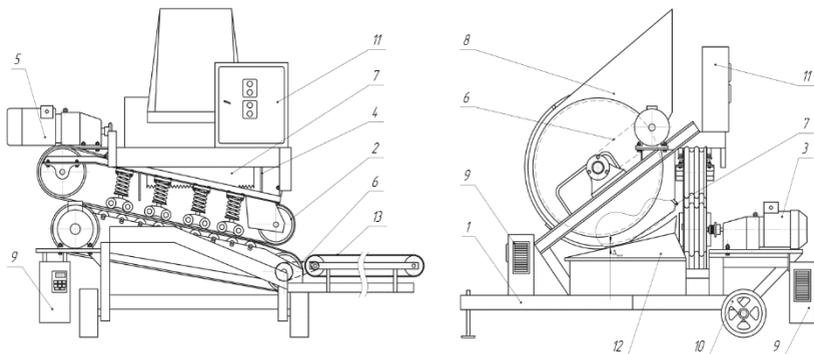


Рис. 3.5. Схема лабораторной установки:

- 1 – рама; 2 – зажимной транспортер; 3, 5 – мотор-редуктор; 4 – барабан;  
 6 – цепная передача; 7 – эластичный рабочий орган (бич); 8 – камера обмотки;  
 9 – преобразователь частоты; 10 – колеса; 11 – пульт управления;  
 12 – сепарирующая решетка (дека); 13 – подающий транспортер



Рис. 3.6. Общий вид лабораторной установки

Расположенный в камере обмолота 8 барабан 4 был оборудован эластичным рабочим органом (бичом) 7, закрепленным с возможностью изменения угла его установки к плоскости ленты. Профиль рабочей поверхности бича 7 имел зубчатую форму (рис. 3.7). Под барабаном, в зоне обмолота, была установлена сепарирующая решетка (дека) 12, форма которой повторяла траекторию движения рабочего органа и имела возможность регулирования по высоте [75].

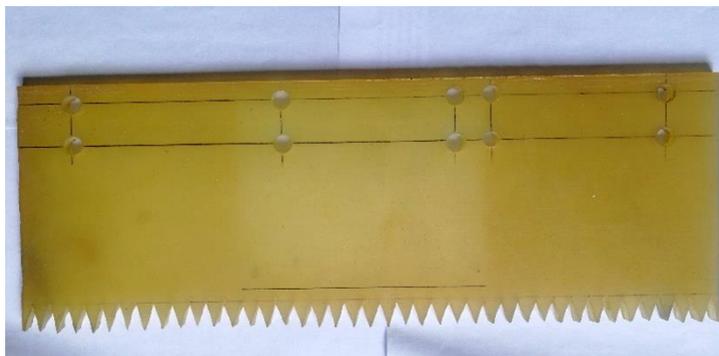


Рис. 3.7. Экспериментальный эластичный рабочий орган

Таким образом, конструкция лабораторной установки позволяла в необходимых пределах изменять следующие параметры: скорость подачи ленты льнотресты ( $v_n$ ); смещение ленты льнотресты относительно обмолачивающего устройства ( $L_n$ ); угол установки плоскости бича к плоскости ленты ( $\alpha_6$ ); зазор между бичом и декой ( $\Delta$ ); частоту вращения рабочего органа ( $n_6$ ) и толщину ленты льнотресты ( $h_n$ ) [54].

Лабораторная установка работала следующим образом. Обмолачиваемая лента льнотресты предварительно вручную равномерным слоем определенной толщины укладывалась на подающий транспортер. После запуска установки лента подающим транспортером подводилась к зажимному транспортеру, который, в свою очередь, перемещал ленту через камеру обмолота при воздействии на нее эластичного рабочего органа.

На первом этапе исследований были проведены однофакторные эксперименты по уточнению рациональных значений высоты зуба рабочей кромки бича (рис. 3.8). Для этого было изготовлено пять образцов эластичного бича с различными значениями высоты зуба –

от 0,01 до 0,05 м при фиксированном значении основания зуба  $z_3 = 0,007$  м.

В качестве параметров оптимизации были приняты степень обмолота  $E_{об}$  (уравнение (3.7)) и степень повреждения стеблей  $C_{п}$ .

Степень повреждения стеблей определялась по формуле

$$C_{п} = \frac{n_{п.ст}}{n_{о}}, \quad (3.8)$$

где  $n_{п.ст}$  – количество поврежденных стеблей льна, шт.;

$n_{о}$  – общее число обмолоченных стеблей, шт.

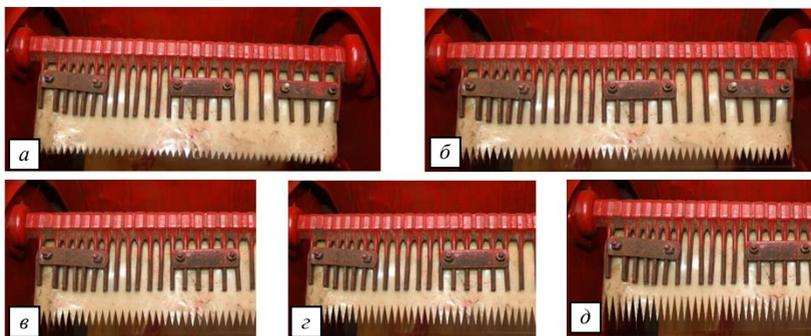


Рис. 3.8. Исследуемые рабочие органы с различной высотой зубьев:

$a - h_3 = 0,01$  м;  $б - h_3 = 0,02$  м;  $в - h_3 = 0,03$  м;  $г - h_3 = 0,04$  м;  $д - h_3 = 0,05$  м

Опыты проводились при следующих фиксированных параметрах: частота вращения рабочего органа –  $2,5 \text{ с}^{-1}$ ; угол установки плоскости бича к плоскости ленты –  $0,87$  рад ( $50^\circ$ ); средняя толщина слоя ленты в зоне обмолота –  $0,03$  м; скорость подачи ленты –  $1,5$  м/с; зазор между бичом и декой –  $0,01$  м.

На втором этапе исследований обмолачивающего устройства были проведены однофакторные эксперименты с целью подтверждения теоретических исследований о рациональной форме кромки эластичного бича. Исследовались три формы кромок (рис. 3.9): гладкая, рифленая параболическая и рифленая треугольная (зубчатая).

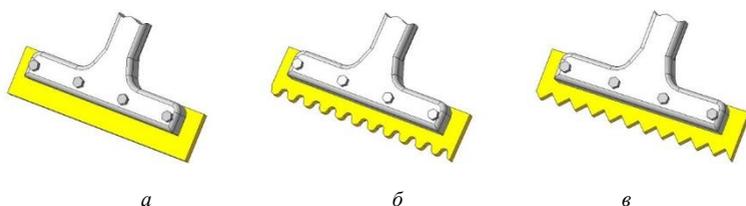


Рис. 3.9. Виды рабочих кромок исследуемого эластичного рабочего органа:  
 а – бич с прямой рабочей кромкой; б – бич с параболической рабочей кромкой;  
 в – бич с зубчатой рабочей кромкой

В процессе исследований испытуемый рабочий орган устанавливался на лабораторную установку и проводилось его испытание при изменении параметров ранее выбранных факторов. При этом определялась степень обмолота  $E_{об}$ .

Экспериментальные исследования проводились по шести факторам, области изменения которых были заранее определены исходя из теоретических исследований и априорной информации [4]. На предварительных этапах исследований были выбраны опорные точки:  $n_6 = 2,5 \text{ с}^{-1}$ ;  $\alpha_6 = 0,87 \text{ рад}$  ( $50^\circ$ );  $L_d = 0 \text{ м}$ ;  $h_d = 0,3 \text{ м}$ ;  $v_d = 1,5 \text{ м/с}$ ;  $\Delta = 0,015 \text{ м}$ .

Схема проведения поисковых экспериментов подразумевала поэтапное варьирование одного из факторов при фиксированных значениях остальных на уровнях опорных точек.

Опыты по исследованию параметров обмолачивающего устройства выполнялись по нижеприведенной методике.

Число повторностей принималось трехкратным, исходя из 95%-ной надежности показаний, как наиболее распространенной при технических исследованиях в области сельскохозяйственного машиностроения [50].

Обмолачиваемая лента льнотресты (рис. 3.10) укладывалась на подающий транспортер 13 (см. рис. 3.5) длиной 2,2 м в виде слоя равной толщины (рис. 3.11), и определялось количество коробочек на одном погонном метре ленты до обмолота [75].

Исследования проводились с лентой льнотресты влажностью 13–15 %, средней длиной стеблей 0,72 м и растянутостью 1,1. После запуска установки производился обмолот ленты при соответствующих значениях исследуемых параметров (рис. 3.12) [75].



Рис. 3.10. Исследуемый погонный метр ленты льнотресты



Рис. 3.11. Общий вид уложенной на подающий транспортер ленты



Рис. 3.12. Общий вид камеры в процессе обмолота ленты льнотресты

Полученный ворох собирался в мешки, закрепленные на кожухе камеры обмолота, а стебли – в снопы, которые поочередно нумеровались. После проведения опытов подсчитывалось количество семенных коробочек на погонном метре обмолоченной ленты.

### **3.7. Методика проведения производственных испытаний очесывающе-плющильного аппарата**

Для подтверждения установленных при проведении лабораторных исследований интервалов варьирования параметров очесывающе-плющильного аппарата были проведены его производственные испытания [54].

Для проведения производственных испытаний разработанное обмолачивающее устройство было установлено в линии первичной переработки льна «Van Dommele» (рис. 3.13) ОАО «Дубровенский льнозавод» [54, 75].



Рис. 3.13. Общий вид линии первичной переработки льна «Van Dommele»

В обмолачивающем устройстве были предусмотрены возможности регулирования следующих параметров [54, 75]:

- частоты вращения рабочего органа;
- скорости подачи ленты льнотресты;
- величины смещения ленты льнотресты относительно обмолачивающего устройства (зоны обмолота);
- толщины ленты льнотресты;
- зазора между бичом и декой.

Определение рациональных значений основных параметров обмолачивающего устройства производилось по качественным показателям процесса: степени обмолота, степени повреждения стеблей, отходу стеблей в путанину и степени повреждения семян.

Обмолачивающее устройство (рис. 3.14) было установлено относительно ленточно-дискового зажимного транспортера 4 линии переработки льна с возможностью обеспечения процесса обмолота. Оно включало эластичный рабочий орган 1, имеющий кривошипно-

шатунный механизм привода с коромыслом 2, и сепарирующую решетку (деку) 3. Решетка имела эллипсоидную форму, соответствующую траектории движения рабочего органа. Вся конструкция находилась в единой камере обмолота, в нижней части которой под декой 3 был установлен ленточный транспортер для сбора льновороха.

Изменение частоты вращения приводного кривошипа обмолачивающего устройства и скорости ленты льнотресты осуществлялось с помощью оборудования, штатно установленного в линии первичной переработки льна «Van Dommele» заводом-изготовителем. Смещение ленты льнотресты относительно обмолачивающего устройства на необходимую величину изменяли вручную путем предварительной укладки ее на подающий конвейер. Требуемая толщина подаваемой на обмолот ленты также формировалась вручную. Зазор между бичом и декой регулировали изменением высоты установки деки с помощью винтов.



Рис. 3.14. Обмолачивающее устройство в линии первичной переработки льна:  
1 – эластичный рабочий орган (бич); 2 – кривошипно-шатунный механизм привода с коромыслом; 3 – сепарирующая решетка (дека);  
4 – ленточно-дисковый зажимной транспортер

При проведении исследований три погонных метра ленты льнотресты укладывали на расстилочный стол горизонтально слоем равной толщины. Подсчитывали число коробочек в средней части ленты длиной 1 м и количество семян в коробочках. После запуска установки лента льнотресты подавалась в зажимной транспортер, приводимый в действие мотор-редуктором, и обмолачивалась исследуемым рабочим органом. Затем обмолоченную ленту льнотресты с конвейера перекладывали на расстилочный стол и определяли степень обмолота на срединном метровом участке путем подсчета необмолоченных коробочек, переводя их количество в массу [38]. Первый и последний метры в расчет не принимались из-за неустановившегося режима. Опыты проводились в трехкратной повторности.

Степень обмолота определялась по зависимости (3.7), а степень повреждения стеблей – по зависимости (3.8).

Отход стеблей в пуганину  $\Pi_c$  определялся по формуле [37]

$$\Pi_c = \frac{\sum_{i=1}^5 m_{\Pi i}}{\sum_{i=1}^5 m_{O i}}, \quad (3.9)$$

где  $m_{\Pi i}$  – масса пуганины на  $i$ -м участке ленты (измерялась на срединных метровых участках для каждой толщины ленты);

$m_{O i}$  – масса льнотресты на  $i$ -м участке ленты до обмолота (измерялась на срединных метровых участках для каждой толщины ленты).

При проведении опытов определяли также степень повреждения семян  $T_c$ . Для этого из обмолоченных семян отбирали выборку и методом визуального контроля с помощью микроскопа производили отбор поврежденных семян, определяли их массу и вычисляли ее отношение к общей массе семян по зависимости

$$T_c = \frac{\sum_{i=1}^5 m_{C i}}{\sum_{i=1}^5 m_{O i}}, \quad (3.10)$$

где  $m_{Ci}$  – масса поврежденных семян при обмолоте  $i$ -го участка ленты льнотресты (измерялась на срединных метровых участках для каждой толщины ленты);

$m_{Oi}$  – общая масса семян при обмолоте  $i$ -го участка ленты льнотресты (измерялась на срединных метровых участках для каждой толщины ленты).

## Выводы

1. Разработана программа экспериментальных исследований и изготовлены экспериментальные установки и опытные образцы эластичного рабочего органа [39, 59, 76, 157].

2. Для получения математической модели процесса обмолота и определения рациональных параметров очесывающе-плющильного аппарата были разработаны:

– методика проведения экспериментов по определению параметров ленты льнотресты в линии первичной переработки [57];

– методика определения деформаций коробочки льна [39, 58];

– методика определения угла отгиба и относительного удлинения стеблей до обрыва [59];

– методика проведения лабораторных исследований процесса обмолота [38, 76, 157];

– методика проведения производственных испытаний очесывающе-плющильного аппарата [75].

3. Обоснованы интервалы и уровни варьирования основных факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на параметр оптимизации процесса обмолота. При этом интервалы их варьирования установлены в следующих пределах [157]:

– скорость подачи ленты льнотресты – 1,2–2,0 м/с;

– смещение ленты льнотресты относительно обмолачивающего устройства –  $-0,1 \dots +0,1$  м;

– зазор между бичом и декой – 0,005–0,03 м;

– угол установки плоскости бича к плоскости ленты – 0,52–1,22 рад (30–70°);

– толщина слоя ленты льнотресты – 0,01–0,05 м;

– частота вращения рабочего органа – 1,7–3,3 с<sup>-1</sup>.

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 4.1. Определение параметров ленты льнотресты, поступающей на обмолот в линии первичной переработки

Во второй главе была установлена необходимость изучения реальных физико-механических свойств и параметров ленты льнотресты, поступающей на обмолот в линии первичной переработки. Для изучения этих свойств и параметров применяли методики, приведенные в пункте 3.2. В качестве исследуемого материала использовали рулоны льнотресты сорта Грант, заготовленной на разных полях. В результате проведенных исследований были получены следующие данные (табл. 4.1).

Таблица 4.1. Физико-механические свойства и параметры ленты льнотресты

Показатель	Значение
Количество стеблей в ленте льнотресты на один погонный метр, шт.	2140–2480
Количество семенных коробочек на стебле, шт.	8–10
Количество семян в коробочке, шт.	6–8
Общая длина стеблей, м	0,65–0,8
Средняя ширина ленты льнотресты, м	0,78–0,96
Конусность стеблей льнотресты	0,0008–0,0017
Растянutosть ленты льнотресты	1,18–1,24
Относительный перекоc стеблей в ленте льнотресты, град	До 35
Влажность льнотресты, %	13–14

Экспериментально полученные значения физико-механических свойств и параметров ленты льнотресты использовались для уточнения математических зависимостей при обработке опытных данных лабораторного и производственного этапов исследований обмолочивающего устройства.

### 4.2. Определение деформаций семенных коробочек льна

В результате проведенных исследований по определению деформаций семенных коробочек льна были получены данные, устанавливающие взаимосвязь поперечной деформации  $\Delta_{кз}$  семенной коробочки и силы упругости  $F$  для различных диаметров семенных коробочек. На основании полученных данных для средних значений

деформаций и сил упругости получена графическая зависимость (рис. 4.1).



Рис. 4.1. Изменение силы упругости коробочки в зависимости от поперечной деформации

Анализируя графическую зависимость (рис. 4.1), можно заметить, что на участке изменения деформации семенной коробочки от 0 до 0,0008 м при снятии воздействия приложенной нагрузки происходит восстановление первоначальной формы коробочки. На участке изменения деформации коробочки 0,0008–0,001 м происходит ее разрушение, и дальнейшая деформация сопровождается незначительным снижением силы упругости. После разрушения коробочки изменение силы упругости сопровождается повторяющимися циклами: незначительным повышением силы сопротивления сжатию, разрушением оболочки и последующим снижением силы. Циклы повышения и снижения силы упругости обусловлены морфологией семенной коробочки льна, т. е. наличием в ней семенных гнезд и полугнезд. Диапазон колебаний силы упругости при этом изменяется в пределах от 2,25 до 2,5 Н.

Для изучения участка, на котором происходит упругая деформация семенной коробочки льна, была произведена группировка семенных коробочек по диаметру: 0,006, 0,007 и 0,008 м. Полученные данные были аппроксимированы линейно и представлены в виде графика (рис. 4.2).

Полученные зависимости с достаточно высокой достоверностью

описывают связь  $\sigma$  и  $\varepsilon$ : для семенных коробочек диаметром до 0,006 м коэффициент детерминации  $R^2 = 0,527$ , для коробочек диаметром 0,007 м коэффициент детерминации  $R^2 = 0,9774$ , а для коробочек диаметром до 0,008 м коэффициент детерминации  $R^2 = 0,9627$ .

Расчетное значение модуля Юнга по выражению (3.4) для семенной коробочки льна в зависимости от ее размеров изменяется от 0,28 до 0,55 МПа.

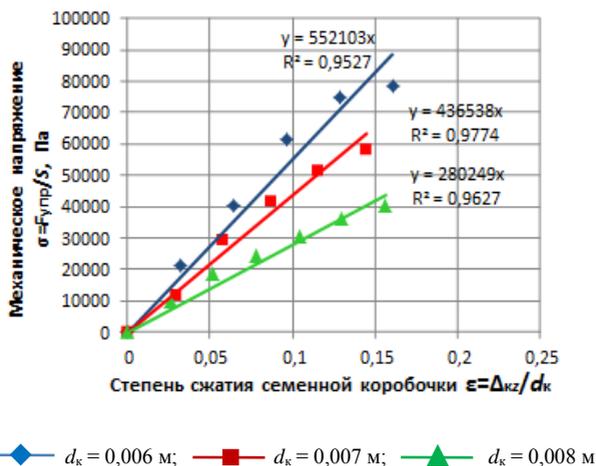


Рис. 4.2. Зависимости механического напряжения от степени сжатия семенных коробочек при различных их диаметрах

Также установлено, что для различных значений диаметров семенных коробочек льна ( $d_k = 0,0056 \dots 0,0078$  м) поперечная деформация  $\Delta_{кз}$  при разрушении коробочки составляет от 0,0006 до 0,0022 м.

### 4.3. Определение угла отгиба и относительного удлинения стеблей при обрыве

Для определения угла отгиба  $\psi$  стебля льна, смещения  $\Delta_1$  ленты льнотресты, соответствующего времени  $\Delta t$  удержания стебля бичом с начала зажатия до возможного обрыва и относительного удлинения стеблей  $\varepsilon_{ст}$  при обрыве были заготовлены опытные образцы из рулонов льнотресты в ОАО «Горкилен» сорта Грант. Исследуемые образцы

стеблей льнотресты имели влажность 13–15 %, значения диаметров стеблей находились в пределах 0,00039–0,00217 м, а их технической длины – 0,42–0,68 м.

В результате исследований получено 100 значений смещения  $\Delta_1$  ленты, 100 расчетных значений угла отгиба  $\psi$  стеблей и 100 расчетных значений относительного удлинения для различных значений диаметра  $d_{ст}$  стебля в наиболее тонком месте исследуемого участка стебля.

Статистическую обработку полученных данных производили в Microsoft Excel с помощью надстройки «Анализ данных», «Однофакторный дисперсионный анализ» [127]. Для этого исходные данные размещали на листе Excel в порядке, показанном на рис. 4.3.

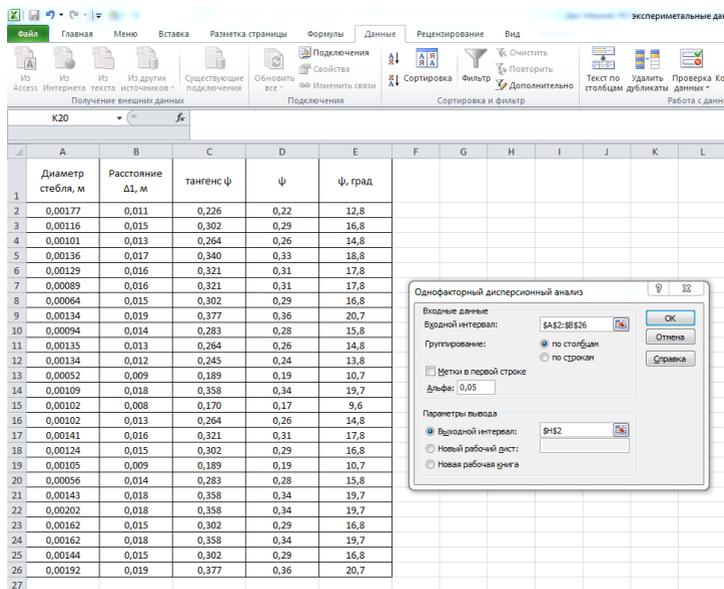


Рис. 4.3. Оформление дисперсионного анализа экспериментальных данных в Excel и параметров надстройки «Однофакторный дисперсионный анализ»

Исходные данные можно разделить на три блока:

- 1) диаметр  $d_{ст}$  стеблей льна (блок ячеек A2:A26);
- 2) смещение  $\Delta_1$  ленты льнотресты (блок ячеек B2:B26);
- 3) угол  $\psi$  отгиба стеблей льна (блок ячеек E2:E26).

При проведении однофакторного дисперсионного анализа зависимости смещения  $\Delta_1$  от диаметра стебля при значении  $\Delta_2$  «мертвой» зоны, равном 0,05 м, входной интервал задавался ячейками  $\$A\$2:\$B\$26$ , значение погрешности – 0,05, вывод результатов – в ячейку  $\$H\$2$ .

Доля влияния фактора определялась как отношение дисперсии, обусловленной влиянием фактора  $A$ , к общей дисперсии.

В результате проведенного однофакторного дисперсионного анализа были получены результаты, отображенные на рис. 4.4.

Для определения угла отгиба стебля льна и при других значениях параметра  $\Delta_2$  «мертвой» зоны расчеты проводились аналогично.

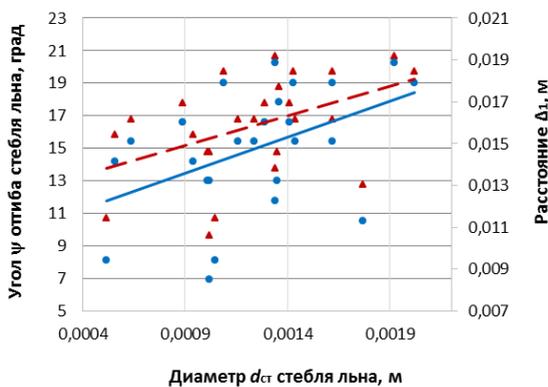
	H	I	J	K	L	M	N
Однофакторный дисперсионный анализ							
<b>ИТОГИ</b>							
	<i>Группы</i>	<i>Счет</i>	<i>Сумма</i>	<i>Среднее</i>	<i>Дисперсия</i>		
Столбец 1		25	0,03105	0,001242	1,48433E-07		
Столбец 2		25	0,36886792	0,014754717	8,5944E-06		
<b>Дисперсионный анализ</b>							
	<i>Источник вариации</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>λ-Значени</i>	<i>F критическое</i>
Между группами	0,00228242		1	0,002282419	522,1234783	1,92E-27	4,042652129
Внутри групп	0,00020983		48	4,37142E-06			
Итого	0,00249225		49				
Доля влияния фактора		91,6%					

Рис. 4.4. Результаты однофакторного дисперсионного анализа

Точечные графики зависимости смещения  $\Delta_1$  и угла отгиба  $\psi$  стеблей от диаметра стебля льна в наиболее тонком месте исследуемого участка и соответствующие им линии тренда представлены на рис. 4.5–4.8.

На рисунке 4.5 приведены точечные графики при  $\Delta_2 = 0,05$  м.

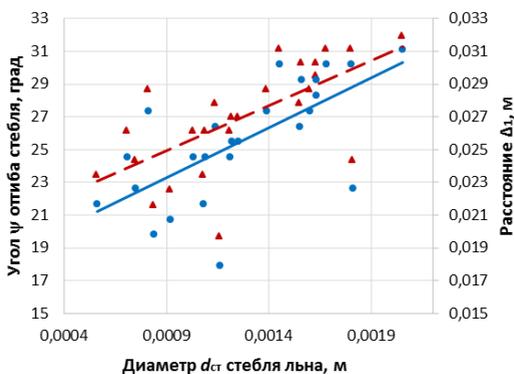
При значении «мертвой» зоны 0,05 м и диаметре стеблей льна 0,0004–0,002 м смещение  $\Delta_1$  составило 0,0114–0,0175 м (среднее значение  $\Delta_1 = 0,015$  м), а угол отгиба стеблей – 13,4–19,3° (среднее значение  $\psi = 16,4^\circ$ ). В результате оценки установлена доля влияния диаметра стебля на смещение  $\Delta_1$  и угол отгиба  $\psi$  при величине  $\Delta_2 = 0,05$  м, равная 91,6 %.



— линия тренда смещения  $\Delta_1$  в зависимости от диаметра стебля  $d_{ст}$   
 - - линия тренда угла отгиба  $\psi$  в зависимости от диаметра стебля  $d_{ст}$

Рис. 4.5. Точечные графики зависимости смещения  $\Delta_1$  и угла отгиба  $\psi$  стеблей от диаметра стебля  $d_{ст}$  и их линии трендов при  $\Delta_2 = 0,05$  м

На рис. 4.6 приведены точечные графики при  $\Delta_2 = 0,10$  м.



— линия тренда смещения  $\Delta_1$  в зависимости от диаметра стебля  $d_{ст}$   
 - - линия тренда угла отгиба  $\psi$  в зависимости от диаметра стебля  $d_{ст}$

Рис. 4.6. Точечные графики зависимости смещения  $\Delta_1$  и угла отгиба  $\psi$  стеблей от диаметра стебля  $d_{ст}$  и их линии трендов при  $\Delta_2 = 0,10$  м

При значении «мертвой» зоны 0,10 м и диаметре стеблей 0,0004–

0,002 м смещение  $\Delta_1$  составило 0,022–0,0303 м (среднее значение  $\Delta_1 = 0,026$  м), а угол отгиба стеблей – 23–31,2° (среднее значение  $\psi = 27^\circ$ ). В результате оценки установлена доля влияния диаметра стебля на смещение  $\Delta_1$  и угол  $\psi$  – 96,0 %.

На рис. 4.7 приведены точечные графики при  $\Delta_2 = 0,15$  м.

При значении «мертвой» зоны 0,15 м и диаметре стеблей 0,00035–0,0019 м смещение  $\Delta_1$  составило 0,028–0,0353 м (среднее значение  $\Delta_1 = 0,032$  м), а угол отгиба стеблей льна – 29–35,2° (среднее значение  $\psi = 32,5^\circ$ ). В результате оценки установлена доля влияния диаметра стебля на смещение  $\Delta_1$  и угол  $\psi$  – 96,8 %.

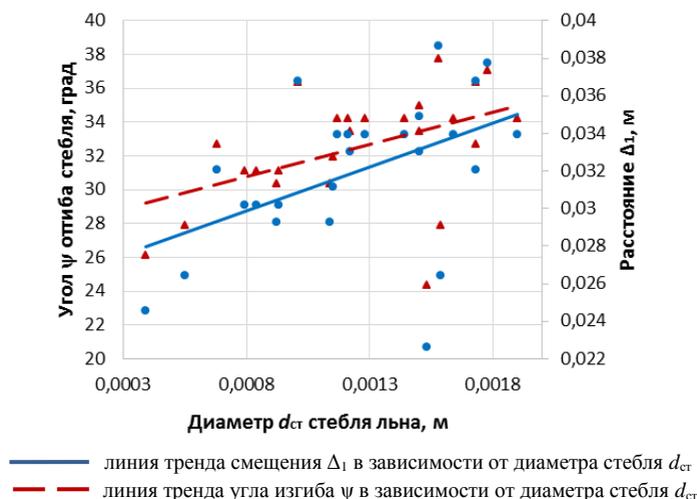


Рис. 4.7. Точечные графики зависимости смещения  $\Delta_1$  и угла отгиба  $\psi$  стеблей от диаметра стебля  $d_{ст}$  и их линии трендов при  $\Delta_2 = 0,15$  м

На рис. 4.8 приведены точечные графики при  $\Delta_2 = 0,20$  м.

При величине «мертвой» зоны 0,20 м и диаметре стеблей 0,0006–0,002 м смещение  $\Delta_1$  составило 0,03–0,044 м (среднее значение  $\Delta_1 = 0,036$  м), а угол отгиба стеблей – 31,2–41,2° (среднее значение  $\psi = 35,6^\circ$ ). В результате оценки установлена доля влияния диаметра стебля на смещение  $\Delta_1$  и угол  $\psi$  – 96,4 %.

По зависимости (3.6) при средних значениях смещения  $\Delta_1$  ленты льнотресты, соответствующего времени  $\Delta t$  удержания стебля бичом с

начала зажатия до возможного его обрыва для четырех значений «мертвой» зоны  $\Delta_2$  произведен расчет относительного удлинения стебля льна  $\epsilon_{ст}$ .

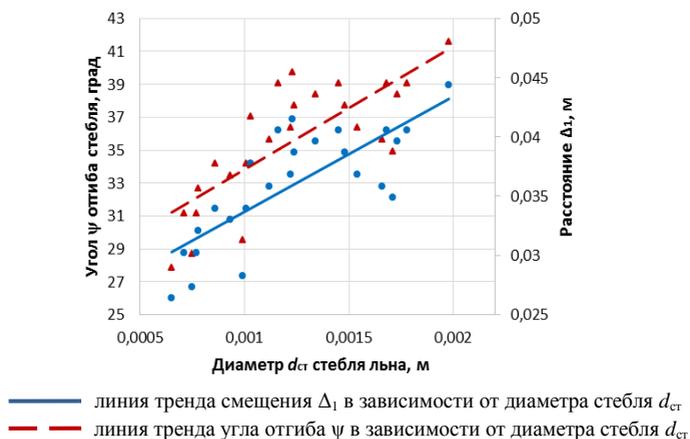


Рис. 4.8. Точечные графики зависимости смещения  $\Delta_1$  и угла отгиба  $\psi$  стеблей от диаметра стебля  $d_{ст}$  и их линии трендов при  $\Delta_2 = 0,20$  м

На рис. 4.9 приведен график зависимости относительного удлинения стебля  $\epsilon_{ст}$  от «мертвой» зоны  $\Delta_2$ .

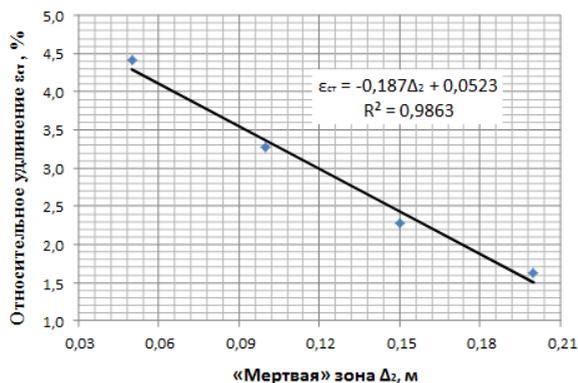


Рис. 4.9. График зависимости относительного удлинения  $\epsilon_{ст}$  стебля от «мертвой» зоны  $\Delta_2$

Из графика (рис. 4.9) видно, что для значений «мертвой» зоны  $\Delta_2$  в интервале от 0,05 до 0,20 м при используемом способе нагружения относительное удлинение  $\varepsilon_{ст}$  стебля имеет линейную зависимость от  $\Delta_2$  и описывается уравнением  $\varepsilon_{ст} = -0,187\Delta_2 + 0,0523$ , а коэффициент детерминации  $R^2 = 0,9863$ . С увеличением  $\Delta_2$  относительное удлинение стебля уменьшается, что связано с неоднородностью строения стебля льна, которая может увеличиваться в процессе уборки из-за многократного воздействия на него рабочих органов (отгиб, удар, сжатие).

#### 4.4. Определение высоты зуба рабочей кромки бича

В результате проведенных экспериментов по определению рационального значения высоты зуба рабочей кромки бича были получены зависимости степени обмолота  $E_{об}$  и степени повреждения стеблей льна  $C_{п}$  от высоты зуба  $h_3$  при фиксированном значении основания зуба  $z_3 = 0,007$  м. Полученные данные были аппроксимированы логарифмическими кривыми (рис. 4.10).

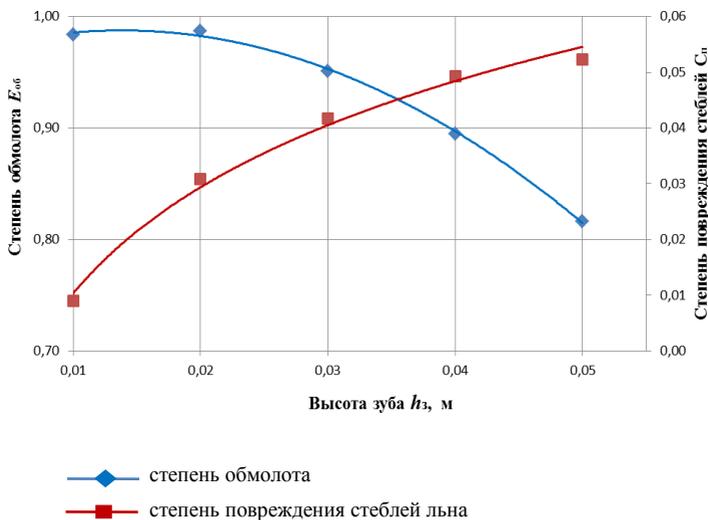


Рис. 4.10. Графики зависимости степени обмолота  $E_{об}$  и степени повреждения  $C_{п}$  стеблей льна от высоты  $h_3$  зуба бича

Из графической зависимости (рис. 4.10) следует, что наилучшие показатели степени обмолота  $E_{об}$  соответствуют значениям высоты зуба бича 0,01–0,025 м. С увеличением высоты зуба до  $h_3 = 0,04 \dots 0,05$  м степень обмолота снижается, что объясняется уменьшением уплотняющей способности бича. Это обусловлено изменением межзубового пространства из-за изгиба зуба и отклонения его вершины от плоскости бича. Таким образом, зубья бича достаточно эффективно работают в начале зоны обмолота, однако по мере движения к верхушечной части степень их воздействия на стебли снижается, что приводит к снижению качества обмолота.

Наименьшее значение степени повреждения стеблей льна было получено при высоте зуба 0,01 м. По мере увеличения высоты зуба бича степень повреждения стеблей увеличивается, что обусловлено защемлением стеблей в межзубовом пространстве у основания зубьев. Кроме того, наблюдается выдергивание стеблей из зажимного транспортера, их обрыв и наматывание на рабочий орган. При высоте зуба  $h_3 = 0,02$  м степень повреждения составила 3,1 %, что превышает установленное регламентом значение (3,0 %) [110].

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что показателям качества работы, предусмотренным регламентом (степень обмолота – не менее 98 % и степень повреждения стеблей льна – не более 3,0 %), удовлетворяет значение высоты зуба  $h_3 = 0,01 \dots 0,02$  м. В дальнейших исследованиях принимаем значение  $h_3 = 0,015$  м.

#### 4.5. Результаты поисковых исследований

Поисковые исследования проводились для определения рациональных интервалов и уровней варьирования основных факторов и степени их влияния на протекание технологического процесса выделения коробочек льна и льносемян из ленты льнотресты.

Конструкция обмолачивающего устройства позволяла реализовать намеченную программу исследования и обеспечивала варьирование факторов в установленных пределах.

При исследовании влияния скорости  $v_d$  подачи ленты на качество обмолота скорость изменялась в пределах от 1,2 до 2,0 м/с с интервалом варьирования 0,2 м/с (рис. 4.11).

В результате исследований установлено, что скорость  $v_d$  оказывает значительное влияние на процесс обмолота (расчетное значение критерия Фишера больше табличного). С увеличением скорости уменьша-

ется число воздействий бича на ленту, что вызывает снижение степени обмолота.

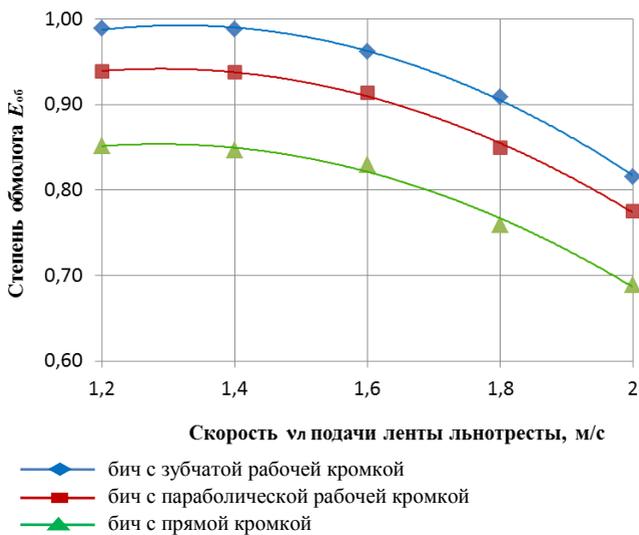


Рис. 4.11. Зависимость степени обмолота от скорости подачи ленты льнотресты

Анализируя полученные данные, следует отметить, что при увеличении скорости подачи до 1,6 м/с наблюдается незначительное снижение степени обмолота, что обусловлено уменьшением времени воздействия рабочего органа на один и тот же участок ленты льнотресты. При дальнейшем увеличении скорости подачи происходит существенное снижение степени обмолота, связанное с тем, что из-за быстрого прохождения зоны обмолота лентой льнотресты средняя часть ленты подвергается лишь незначительному воздействию со стороны рабочего органа.

Смещение  $L_{д}$  ленты льнотресты относительно обмолочивающего устройства варьировалось в пределах от  $-0,1$  до  $+0,1$  м с интервалом  $0,05$  м. Анализируя результаты, можно сделать вывод о том, что смещение ленты оказывает значительное влияние на степень обмолота (расчетное значение критерия Фишера больше табличного). Как видно из графика (рис. 4.12), наименьшее значение степени обмолота наблю-

дается при смещении ленты льнотресты на  $-0,1$  м в сторону зажимного транспортера, что объясняется расположением значительного количества коробочек в «мертвой» зоне.

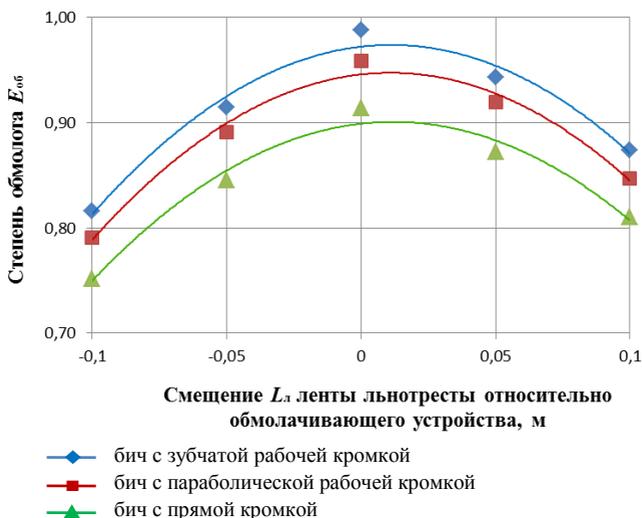


Рис. 4.12. Зависимость степени обмолота от смещения ленты льнотресты относительно обмолачивающего устройства

В интервале значений смещения от  $-0,02$  до  $+0,03$  м происходит незначительное изменение степени обмолота и достигается наибольшее ее значение. При значениях смещения от  $+0,03$  до  $+0,1$  м происходит интенсивное снижение качества обмолота из-за недомолота верхушечной части ленты льнотресты.

Значение зазора между бичом и декой варьировалось в пределах от  $0,005$  до  $0,03$  м с интервалом  $0,005$  м (рис. 4.13). Анализируя результаты, можно сделать вывод о том, что максимальное значение степени обмолота было получено при зазоре  $0,005$  м. Однако отход стеблей в путанину при таком зазоре был выше, чем при зазоре  $0,01$  м и более, а также наблюдалось выдергивание стеблей из зажимного транспортера. При увеличении зазора более  $0,015$  м степень обмолота интенсивно уменьшалась в результате снижения сил защемления стеблей в зазоре и, соответственно, сил деформации коробочек. Таким образом, радио-

нальное значение зазора, при котором обеспечивался наиболее полный обмолот лент льнотресты, а также наименьший отход стеблей в путанину, можно принять равным 0,01–0,015 м.

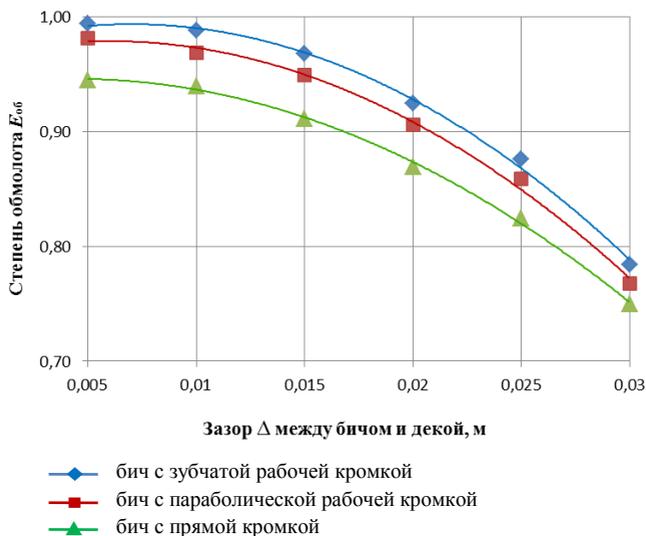


Рис. 4.13. Зависимость степени обмолота от зазора между бичом и декой

Угол установки плоскости бича к плоскости ленты, удерживаемой зажимным транспортером, варьировался в пределах 0,52–1,22 рад (30–70 град) с интервалом 0,175 рад (10 град) (рис. 4.14). Анализ результатов показывает, что при изменении угла от 0,52 до 1,0 рад наблюдается повышение степени обмолота, однако дальнейшее увеличение угла приводит к ее снижению. Наибольшее влияние угла установки на качество обмолота наблюдается у рабочего органа с зубчатой рабочей кромкой, что обусловлено зависимостью проникающей способности зубьев кромки в слой ленты льнотресты от угла установки. У рабочего органа с прямой кромкой влияние угла установки в заданном диапазоне незначительно. Для всех типов рабочих кромок рациональное значение угла установки, при котором наблюдается наибольшая степень обмолота, находится в диапазоне 0,85–1,1 рад.

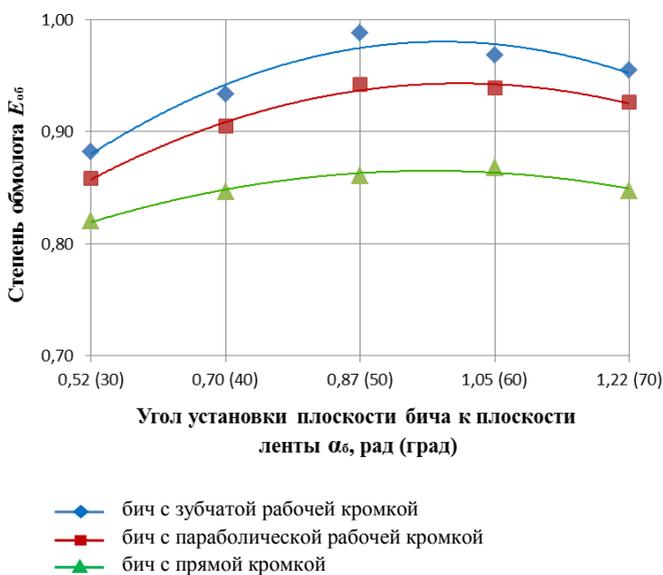


Рис. 4.14. Зависимость степени обмолота от угла установки плоскости бича к плоскости ленты

Толщина слоя ленты льнотресты изменялась от 0,01 до 0,05 м с интервалом 0,01 м. Анализ результатов показывает, что фактор является значимым (расчетное значение критерия Фишера больше табличного). При увеличении толщины ленты льнотресты более 0,03 м (рис. 4.15) степень обмолота значительно уменьшается, что обусловлено увеличением количества коробочек и семян, расположенных внутри ленты. Это затрудняет доступ к ним рабочего органа и способствует в последующем выносу их из зоны обмолота вместе с лентой. Также следует отметить, что с увеличением толщины слоя ленты льнотресты увеличиваются силы сжатия ленты в пространстве между рабочим органом и сепарирующей решеткой и силы трения, что приводит к росту повреждения стеблей и их выдергиванию из зажимного транспортера. При толщине слоя ленты менее 0,02 м у рабочих органов с параболической и зубчатой рабочими кромками наблюдается незначительное снижение степени обмолота. Это объясняется тем, что часть семенных коробочек проскальзывает в межзубовом пространстве. Рациональное значение толщины слоя ленты, подаваемой

на обмолот, можно принять в интервале 0,01–0,03 м.

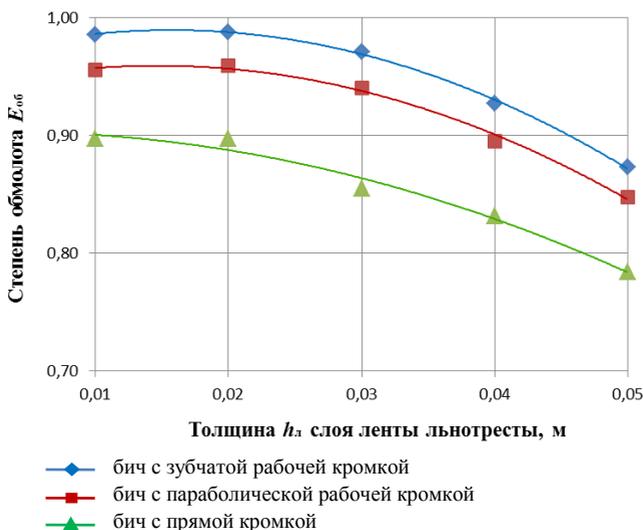


Рис. 4.15. Зависимость степени обмолота от толщины слоя ленты льнотресты

При проведении поисковых экспериментов изучалось влияние частоты вращения рабочего органа на параметр оптимизации процесса обмолота. Анализ результатов показывает, что фактор является значимым (расчетное значение критерия Фишера больше табличного). Частота вращения рабочего органа изменялась от 1,7 до 3,3  $\text{с}^{-1}$ , интервал варьирования – 0,4  $\text{с}^{-1}$  (рис. 4.16).

Нижняя граница изменения параметра принималась исходя из условия хотя бы однократного воздействия рабочего органа на ленту, верхняя граница определялась в процессе проведения эксперимента по допустимым повреждениям семян, стеблей и отходу их в путанину согласно агротехническим требованиям. При частоте вращения рабочего органа 1,7  $\text{с}^{-1}$  наблюдаются наименьшие значения степени обмолота для всех трех видов рабочих кромок, что объясняется недостаточной интенсивностью воздействия рабочего органа на ленту льнотресты вследствие невысокой линейной скорости бича и, соответственно, силы удара. При увеличении частоты вращения рабочего органа от 1,7 до 2,6  $\text{с}^{-1}$  происходит существенное повышение качества обмолота. Даль-

нейшее увеличение частоты вращения сопровождается незначительным повышением степени обмолота и одновременным ростом повреждения стеблей льна. Поэтому рациональное значение частоты вращения рабочего органа находится в интервале от 2,7 до 3,2  $\text{c}^{-1}$ .

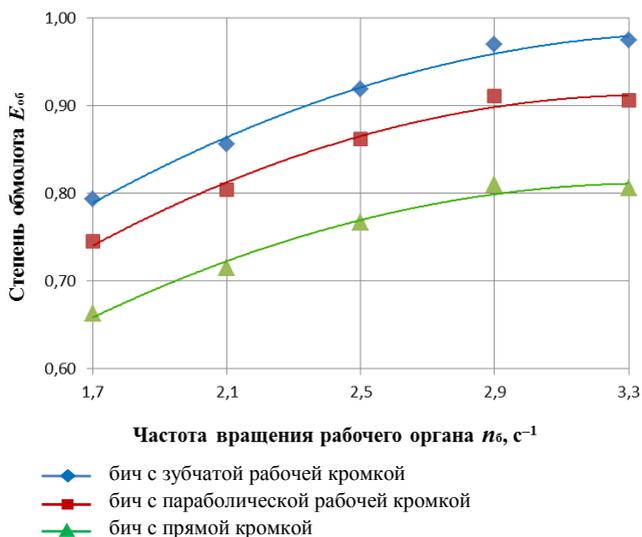


Рис. 4.16. Зависимость степени обмолота от частоты вращения рабочего органа

В результате проведенных поисковых экспериментов было установлено, что наиболее рационально применять рабочий орган с зубчатой рабочей кромкой. Он обеспечивает наиболее полный обмолот ленты льнотресты по сравнению с рабочими органами с параболической и прямой рабочими кромками во всех случаях проведения опытов (см. рис. 4.11–4.16). Это объясняется тем, что наличие клиновидных зубьев обеспечивает лучшее их проникновение в нижние слои ленты и более интенсивное воздействие на стебли, уплотненные в межзубовом пространстве.

Анализ проведенных поисковых экспериментов обмолачивающего устройства с эластичным рабочим органом (бичом) и сепарирующей решеткой (декой) и построенных на их основе графиков позволил определить рациональные интервалы варьирования исследуемых факторов, при условии обеспечения наиболее высокой степени обмолота

при наименьших показателях степени травмирования семян, повреждения стеблей и отхода их в путанину: скорости подачи ленты льнотресты – 1,2–1,6 м/с; смещения ленты льнотресты относительно обмолачивающего устройства –  $-0,02 \dots +0,03$  м; зазора между бичом и декой – 0,01–0,015 м; угла установки плоскости бича к плоскости ленты – 0,85–1,1 рад; толщины слоя ленты льнотресты – 0,01–0,03 м; частоты вращения рабочего органа – 2,7–3,2 с<sup>-1</sup>.

#### **4.6. Оптимизация процесса обмолота коробочек льна очесывающе-плющильным аппаратом**

Процесс обмолота коробочек льна является сложным технологическим процессом. В протекании этого процесса участвуют и взаимодействуют много факторов. При изменяющихся условиях протекания процесса задача оптимизации факторов является достаточно сложной. Однако ее решение можно значительно ускорить путем применения специальных методов планирования эксперимента и получения математической модели объекта исследований [2, 17, 19, 30, 31, 34, 78, 82, 89, 90, 96, 129].

Применение этих методов позволяет значительно сократить количество опытов, а также при этом возникает возможность дать статистическую оценку материалам исследований, представив их в виде математической модели [130].

Решение экстремальной задачи предусматривает проведение ряда последовательных этапов. На первом этапе проводят серию отсеивающих экспериментов и по результатам получают представление о степени влияния отдельных факторов на параметр оптимизации. При проведении этих исследований используют уравнение регрессии первого порядка. На втором этапе проводят небольшое число опытов и по их результатам определяют правильное направление движения при проведении дальнейших экспериментов и область оптимума. На следующем этапе проводят серию опытов и описывают поверхность отклика с помощью уравнения регрессии второго порядка. Затем получают математическую модель процесса и с целью отыскания оптимального сочетания факторов в исследуемом объекте проводят ее анализ на экстремум [4, 49].

#### **4.6.1. Выбор параметра оптимизации и уровней варьирования факторов при проведении отсеивающих экспериментов**

В результате проведения предварительных исследований выявлено, что при обмолоте коробочек льна разработанным очесывающе-плющильным аппаратом практически отсутствует повреждение семян (степень повреждения не превышает 1,9 %) [75]. Поэтому в качестве параметра оптимизации была принята степень обмолота  $E_{об}$ . Повышение значения этого параметра приводит к увеличению выхода продуктивных семян и поэтому в значительной мере влияет на величину показателей экономической эффективности предлагаемого обмолачивающего устройства [4].

Исследование технологического процесса обмолота коробочек льна предлагаемым очесывающе-плющильным аппаратом предусматривало учет всех факторов, оказывающих влияние на протекание и конечные результаты изучаемого процесса [4, 49]. К совокупности исследуемых факторов предъявляется основное требование: все факторы должны быть управляемыми и контролируруемыми. Этому требованию соответствуют следующие конструктивные, технологические и кинематические параметры, выбранные на основании априорной информации: скорость подачи ленты льнотресты, смещение ленты льнотресты относительно обмолачивающего устройства, зазор между бичом и декой, угол установки плоскости бича к плоскости ленты, толщина слоя ленты льнотресты, частота вращения рабочего органа [54]. Процесс обмолота ленты льнотресты осуществляется на стационаре, поэтому такие факторы, как урожайность и влажность стеблей льна, являются контролируруемыми. При проведении производственных испытаний учитывалось влияние этих факторов.

Для того чтобы определить экспериментальную область факторного пространства, использовали результаты, полученные при проведении однофакторных поисковых экспериментов. Также учитывали то обстоятельство, что при решении задачи оптимизации необходимо выбирать для первой серии опытов такую область, при которой будет возможность для пошагового движения к оптимуму [2, 4].

При проведении отсеивающих экспериментов выбор уровней и интервалов варьирования факторов осуществлялся с учетом априорной информации о точности фиксирования их значений, диапазоне изменения параметра оптимизации и характере поверхности отклика. В соответствии с рекомендациями [2] принимаем функцию, описыва-

ющую поверхность отклика, нелинейной, а диапазон изменения параметра оптимизации широким и выбираем уровни и интервалы варьирования факторов [4].

В таблице 4.2 представлены результаты выбора значений основных уровней варьирования факторов.

Таблица 4.2. **Факторы и уровни их варьирования**

Наименование фактора	Обозначение	Уровни варьирования	
		нижний (-1)	верхний (+1)
Скорость подачи ленты льнотресты, м/с	$x_1$	1,2	2
Смещение ленты льнотресты относительно обмолачивающего устройства, м	$x_2$	-0,1	+0,1
Зазор между бичом и декой, м	$x_3$	0,01	0,03
Угол установки плоскости бича к плоскости ленты, рад (град)	$x_4$	0,52 (30)	1,22 (70)
Толщина слоя ленты льнотресты, м	$x_5$	0,01	0,05
Частота вращения рабочего органа, с <sup>-1</sup>	$x_6$	1,7	3,3

#### 4.6.2. Оценка существенности факторов при проведении отсеивающих экспериментов

Отсеивающие эксперименты проводили на начальной стадии изучения объекта исследования с целью исключения малозначащих факторов для сокращения последующего числа опытов [123].

Суть метода заключается в том, что если факторы расположить в порядке убывания их доли, вносимой в дисперсию критерия оптимизации, то получится ранжированный ряд вида убывающей экспоненты. Небольшим числом опытов воспроизводят этот ряд и при помощи регрессионного анализа оценивают наиболее значимые эффекты факторов на шумовом поле, создаваемом несущественными факторами [89, 123].

Построение ранжированного ряда производили в два этапа. Вначале проводили серию опытов по специально составленной матрице (табл. 4.3) [89], а затем строили диаграмму рассеяния факторов. Учет степени влияния того или иного фактора производили визуально по величине разности между средними значениями критерия оптимизации, вычисленными раздельно для каждого уровня варьирования фактора. В качестве среднего значения параметра оптимизации принимали медиану [89, 120, 123].

Таблица 4.3. Матрица планирования отсеивающих экспериментов

№ опыта	Факторы						Значения параметра оптимизации (степень обмолота $E_{об}$ )			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$\bar{y}$
1	□	□	□	+	+	+	0,8060	0,7750	0,9455	0,8422
2	+	+	□	□	□	+	0,9610	0,9920	0,9765	0,9765
3	+	□	+	□	+	□	0,8215	0,8525	0,8525	0,8422
4	-	+	+	+	-	-	0,6665	0,6355	0,6045	0,6355
5	□	+	+	□	□	□	0,6510	0,6510	0,6975	0,6665
6	+	□	□	+	+	+	0,9145	0,9145	0,8370	0,8887
7	□	□	+	+	□	+	0,9455	0,8370	0,9300	0,9042
8	+	+	+	+	□	□	0,8370	0,8215	0,8060	0,8215
9	□	+	□	+	+	□	0,4495	0,6200	0,6510	0,5735
10	+	+	□	□	□	□	0,7285	0,7285	0,7285	0,7285

Анализ результатов отсеивающих экспериментов выполняли на основании диаграмм рассеяния значений критерия оптимизации. Для этого по оси абсцисс отмечали факторы с их уровнями, а по оси ординат – опытные значения критерия оптимизации (рис. 4.17).

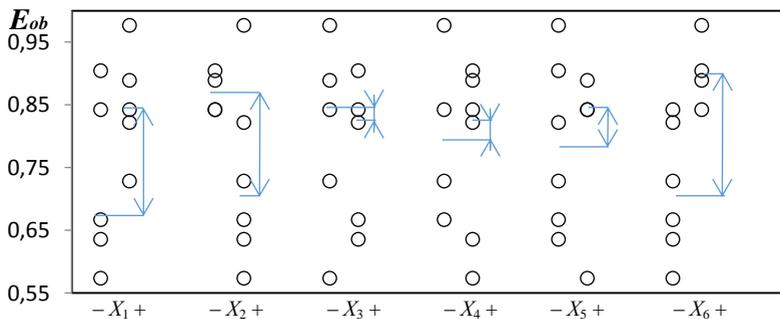


Рис. 4.17. Диаграмма рассеяния факторов, влияющих на степень обмолота

По диаграмме рассеяния выделяли два наиболее значимых фактора  $-x_1$  и  $x_6$ . Эффекты факторов количественно оценивали с помощью таблицы с двумя входами (табл. 4.4).

Таблица 4.4. Таблица с двумя входами для вычисления эффектов факторов

Оцениваемый фактор	+X <sub>1</sub>	-X <sub>1</sub>
+X <sub>6</sub>	0,9765	0,8422
	0,8887	0,9042
	Σy <sub>1</sub> = 1,8652	Σy <sub>2</sub> = 1,7464
	$\bar{y}_1 = 0,9326$	$\bar{y}_2 = 0,8732$
-X <sub>6</sub>	0,8422	0,6355
	0,8215	0,6665
	0,7285	0,5735
	Σy <sub>3</sub> = 2,3922	Σy <sub>4</sub> = 1,8755
	$\bar{y}_3 = 0,7974$	$\bar{y}_4 = 0,6252$

Величина эффектов факторов  $x_i$  подсчитывалась по формуле [89, 123]

$$x_i = \frac{\bar{y}_1 + \bar{y}_3 + \bar{y}_5 + \dots + \bar{y}_n}{k_i} - \frac{\bar{y}_2 + \bar{y}_4 + \bar{y}_6 + \dots + \bar{y}_{n+1}}{k_i}, \quad (4.1)$$

где  $\bar{y}_1, \bar{y}_3, \bar{y}_5, \dots, \bar{y}_n$  – средние значения критерия оптимизации в каждой клетке таблицы для уровня фактора (+);

$\bar{y}_2, \bar{y}_4, \bar{y}_6, \dots, \bar{y}_{n+1}$  – средние значения критерия оптимизации в соответствующей клетке таблицы для уровня фактора (-);

$k_i$  – число средних значений критерия оптимизации.

После расчета эффектов выделенных факторов проверяли их значимость по  $t$ -критерию. Для удобства вычисления  $t$ -критерия результаты всех расчетов свели в таблицу (табл. 4.5).

Таблица 4.5. Вспомогательная таблица для расчета  $t$ -критерия факторов  $x_6$  и  $x_1$

№ клет-ки	Σy <sub>i</sub>	(Σy <sub>i</sub> ) <sup>2</sup>	Σy <sub>i</sub> <sup>2</sup>	n <sub>i</sub>	SR <sup>2</sup>	SR <sup>2</sup> /n <sub>i</sub>
1	1,8652	3,4790	1,7433	2	0,0039	0,00193
2	1,7464	3,0499	1,5269	2	0,0019	0,00096
3	2,3922	5,7226	1,9149	3	0,0037	0,00122
4	1,8755	3,5175	1,1770	3	0,0022	0,00075
			Сумма	10		0,00486

Значение  $t$ -критерия для какого-либо фактора определяли по формуле [50]

$$t = \frac{(\bar{y}_1 + \bar{y}_3 + \dots + \bar{y}_n) - (\bar{y}_2 + \bar{y}_4 + \dots + \bar{y}_{n+1})}{S_R \sqrt{\sum \frac{1}{n_i}}}, \quad (4.2)$$

где  $S_R$  – среднеквадратическая ошибка, характеризующая рассеяние относительно средних в клетках таблицы с несколькими входами; определяется по формуле [89]

$$S_R = \sqrt{\frac{\sum y_i^2}{n_i - 1} - \frac{(\sum y_i)^2}{n_i \cdot (n_i - 1)}}, \quad (4.3)$$

где  $n_i$  – число наблюдений в  $i$ -й клетке таблицы с несколькими входами.

После соответствующих вычислений определили эффекты факторов:  $x_1 = 0,1158$ ;  $x_6 = 0,1916$ .

Также определили значения  $t$ -критерия для выделенных факторов:  $tx_1 = 3,32$ ;  $tx_6 = 5,50$ .

Оба фактора являются значимыми, так как величина  $t$ -критерия каждого фактора больше табличного значения. В нашем случае табличное значение  $t$ -критерия при числе степеней свободы  $f = 6$  равно 2,447 [89]. Таким образом, оба выделенных эффекта оказались значимыми с вероятностью 95 %.

После определения эффектов факторов  $x_1$  и  $x_6$  производили корректировку результатов отсеивающих экспериментов, для того чтобы четко выделить эффекты других менее сильных факторов и парных взаимодействий. Корректировали путем прибавления эффектов выделенных факторов с обратным знаком к результатам отсеивающих экспериментов на верхнем уровне (+).

После корректировки результатов строили скорректированную диаграмму рассеяния факторов (рис. 4.18), а также диаграммы рассеяния парных взаимодействий факторов (рис. 4.19).

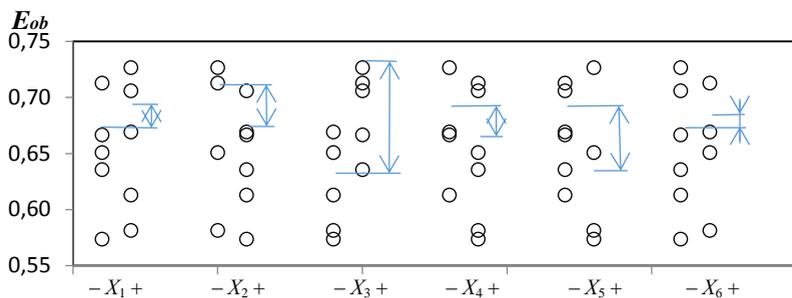


Рис. 4.18. Корректированная диаграмма рассеяния факторов, влияющих на степень обмота

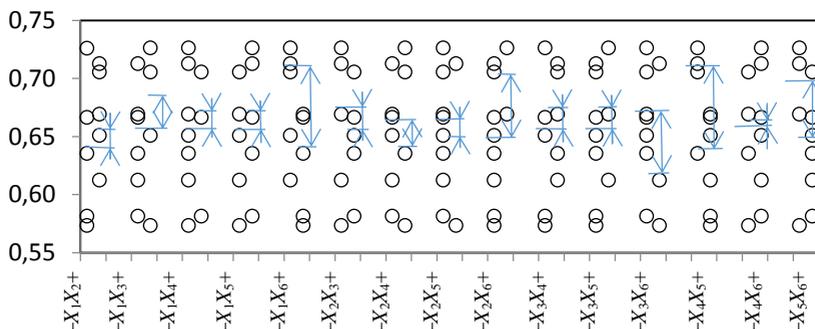


Рис. 4.19. Диаграммы рассеяния парных взаимодействий факторов, влияющих на степень обмота

В результате анализа корректированной диаграммы рассеяния факторов и парных взаимодействий выделили два наиболее значимых фактора: фактор  $x_3$  и парное взаимодействие  $x_1x_6$ . Расчет эффектов выделенных факторов, а также проверку их значимости по  $t$ -критерию производили по вышеизложенной методике (табл. 4.6).

В результате расчетов получили эффекты факторов:  $x_3 = 0,0632$ ;  $x_1x_6 = -0,0438$ . Значение  $t$ -критерия для выделенных факторов:  $tx_3 = 3,18$ ;  $tx_1x_6 = -2,21$ .

Таблица 4.6. Таблица с двумя входами для вычисления эффектов фактора  $X_3$  и парного взаимодействия факторов  $X_1X_6$ , влияющих на степень обмолота

Оцениваемый фактор	$+X_1X_6$	$-X_1X_6$
$+X_3$	0,6355	0,7264
	0,6665	0,7126
		0,7057
	$\Sigma y_1 = 1,3020$	$\Sigma y_2 = 2,1446$
	$\bar{y}_1 = 0,6510$	$\bar{y}_2 = 0,7149$
$-X_3$	0,6691	0,6506
	0,5812	0,6127
	0,5735	
	$\Sigma y_3 = 1,8238$	$\Sigma y_4 = 1,2632$
	$\bar{y}_3 = 0,6079$	$\bar{y}_4 = 0,6316$

Сравнивая полученные значения  $t$ -критерия с табличным, делаем вывод о том, что фактор  $x_3$  является значимым, а парное взаимодействие  $x_1x_6$  – незначимым [4].

Последовательное применение процедуры отсеивания позволило нам за два этапа выделить все существенные факторы:  $x_1$ ,  $x_3$  и  $x_6$  и оценить эффекты этих факторов [4].

### 4.6.3. Движение в область оптимума

После проведения отсеивающих экспериментов малозначащие факторы отсеялись, начался новый этап исследования – описание поверхности отклика, т. е. отыскание уравнения поверхности [4, 89].

Для того чтобы определить оптимальное сочетание выделенных факторов, были проведены эксперименты согласно матрице планирования полного факторного эксперимента  $2^3$ , которая включала восемь опытов [89]. После проведения экспериментов осуществлялось крутое восхождение по поверхности отклика (табл. 4.7). Опыты проводились в трехкратной повторности.

Таблица 4.7. Планирование эксперимента  
для оптимизации параметров рабочего процесса

Уровень	Факторы			Значение параметра оптимизации				
	Скорость подачи ленты льно-тресты, м/с	Зазор между бичом и декой, м	Частота вращения рабочего органа, с <sup>-1</sup>	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>	$\bar{y}$	$\hat{y}$
Верхний (+)	2	0,03	3,3					
Основной (0)	1,6	0,02	2,5					
Нижний (-)	1,2	0,01	1,7					
План эксперимента и результаты опытов								
1	-	-	-	0,9547	0,9847	0,9826	0,9740	0,9150
2	+	-	-	0,8625	0,7658	0,8797	0,8360	0,8648
3	+	+	-	0,8821	0,7781	0,9048	0,8550	0,8100
4	+	+	+	0,8778	0,7692	0,9301	0,8590	0,8658
5	-	+	+	0,9498	0,9524	0,9568	0,9530	0,9160
6	-	-	+	0,9483	0,9492	0,9525	0,9500	0,9708
7	-	+	-	0,7740	0,8255	0,7555	0,7850	0,8603
8	+	-	+	0,9393	0,8278	0,9659	0,9110	0,9205
Крутое восхождение								
Коэффициент регрессии b <sub>i</sub>	-0,0251	-0,0274	0,0279					
Интервал варьирования фактора t	0,4	0,01	1					
b <sub>i</sub> t	-0,0101	-0,0003	0,0223					
Шаг, соответствующий изменению x <sub>1</sub> на 0,2	-0,20	-0,0054	0,4438					
Округленный шаг	-0,2	-0,005	0,4					
Шаг 1	2,0	0,030	1,7	0,8846	0,9217	0,9778	0,9280	
2	1,8	0,025	2,1	0,9337	0,9988	0,8664	0,9430	
3	1,6	0,020	2,5	0,9857	0,9332	0,9671	0,9620	
4	1,4	0,015	2,9	0,9758	0,9686	0,9927	0,9790	
5	1,2	0,010	3,3	0,9978	0,9874	0,9907	0,9920	
6	1,0	0,005	3,7	0,9979	0,9574	0,9576	0,9710	

По результатам проведенных опытов были определены коэффициенты регрессии и выполнена их статистическая оценка. Расчеты производились с помощью ПЭВМ по следующим формулам [4, 89]:

$$b_0 = \sum_{u=1}^N \frac{\bar{y}_u}{N}, \quad (4.4)$$

$$b_i = \sum_{u=1}^N \frac{x_{iu} \cdot \bar{y}_u}{N}, \quad (4.5)$$

$$b_{ij} = \sum_{u=1}^N \frac{x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot \bar{y}_u}{N}, \quad (4.6)$$

$$S_y^2 = \sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^m \frac{(y_{iu} - \bar{y}_u)^2}{N \cdot (m-1)}, \quad (4.7)$$

$$S_{bi} = \sqrt{\frac{S_y^2}{N \cdot m}}, \quad (4.8)$$

$$\pm \Delta b_i = \pm t \cdot S_{bi}, \quad (4.9)$$

где  $\bar{y}_u$  – среднее значение критерия оптимизации в  $u$ -м опыте;

$N$  – количество опытов;

$x_{iu}, x_{ju}$  – значения двух факторов в  $u$ -м опыте;

$m$  – число повторностей одного опыта;

$y_{iu}$  – значение критерия оптимизации в параллельных опытах (в  $u$ -й строке);

$S_y^2$  – дисперсия, характеризующая ошибки опытов в матрице плана;

$S_{bi}$  – квадратичная ошибка коэффициента регрессии;

$t$  – табличное значение  $t$ -критерия при числе степеней свободы, с которым определялась дисперсия  $S_y^2$ .

В результате проведенных расчетов получили:

$$b_0 = 0,8904; b_1 = -0,0251; b_3 = -0,02734; b_6 = 0,0279; b_{1,3} = 0,0191;$$

$$b_{1,6} = -0,0081; b_{3,6} = 0,0151; S_y^2 = 0,0276; S_{bi} = 0,0107.$$

Табличное значение  $t$ -критерия при числе степеней свободы  $f = 16$  равно 2,12 [89]. Число степеней свободы определяли по формуле [89]

$$f = N \cdot (m - 1). \quad (4.10)$$

Тогда  $\pm \Delta b_i = \pm 0,0227$ .

Сравнив абсолютное значение коэффициентов регрессии с величиной доверительного интервала  $\Delta b_i$ , можно сделать вывод о том, что на параметр оптимизации существенное влияние оказывают только линейные эффекты. Парные взаимодействия не оказывают существенного влияния на параметр оптимизации.

Проверку адекватности представления результатов экспериментов полиномом первой степени осуществляли путем сравнения табличного значения критерия Фишера с расчетным [89].

Расчет критерия Фишера производили по формуле [89]

$$F_p = \frac{S_{LF}^2}{S_y^2}, \quad (4.11)$$

где  $S_{LF}^2$  – дисперсия неадекватности математической модели.

$$S_{LF}^2 = m \sum_{u=1}^N \frac{(\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2}{N - (k + 1)}, \quad (4.12)$$

где  $\hat{y}_u$  – теоретическое (расчетное) значение параметра оптимизации в  $u$ -м опыте;

$k$  – число факторов.

В результате расчетов получили:

$$S_{LF}^2 = 0,0105; F_p = 3,79.$$

Табличное значение  $F$ -критерия при числе степеней свободы  $f_1 = 4$  и  $f_2 = 16$  для 95 %-ного уровня значимости  $F_T = 3,01$  [89].

Расчетное значение критерия Фишера больше табличного, поэтому гипотеза об описании результатов экспериментов линейной моделью отвергается [89].

На основании проведенных расчетов можно сделать заключение о том, что линейная модель

$$\hat{y} = 0,8904 - 0,0251 \cdot x_1 - 0,0274 \cdot x_3 + 0,0279 \cdot x_6 \quad (4.13)$$

для описания результатов эксперимента не может быть принята. Поэтому в дальнейших исследованиях с целью изучения и описания области оптимума линейного приближения недостаточно, т. е. необходимо использовать планирование второго порядка, позволяющее получить представление о функции отклика с помощью полинома второй степени [89].

Несмотря на то, что линейная модель для рассматриваемой зависимости оказалась неадекватной, нами проведено крутое восхождение по

поверхности отклика с помощью полученных коэффициентов регрессии, с учетом, что при удачном движении можно установить более благоприятные условия для проведения следующей стадии эксперимента.

При крутом восхождении в качестве единичного шага нами было выбрано изменение скорости подачи ленты льнотресты (фактор  $x_1$ ) на 0,2 м/с. Величину единичного шага по остальным факторам принимали пропорциональной величине принятого шага фактора  $x_1$ . Поскольку определялись параметры области оптимума, соответствующие максимальной величине параметра оптимизации, то шаговый процесс осуществлялся без смены знаков на обратные [89].

По результатам крутого восхождения можно сделать предположение о том, что выбранный центр эксперимента находится вблизи области оптимума, так как наилучшие результаты параметра оптимизации ( $\bar{y} = 0,979...0,992$ ) были получены после реализации четвертого опыта. При этом значения факторов находились в следующих пределах: скорость подачи ленты льнотресты – 1,2–1,4 м/с; зазор между бичом и декой – 0,010–0,015 м; частота вращения рабочего органа – 2,9–3,3 с<sup>-1</sup>. После проведения шестого опыта наблюдалось снижение степени обмолота, повышение повреждаемости семян и стеблей и отхода их в пуганину, поэтому дальнейшее крутое восхождение было нецелесообразно.

#### 4.6.4. Описание области оптимума

При крутом восхождении, основанном на локально-линейном приближении поверхности отклика, возможно быстрое достижение почти стационарной области, однако нет возможности для детального ее изучения и определения самого экстремума [123]. После крутого восхождения, когда линейного приближения поверхности отклика становится недостаточно, проводят описание почти стационарной области уравнениями второго порядка, которые учитывают кривизну поверхности отклика. В сельском хозяйстве для большинства технологических процессов с допустимой погрешностью до 5 % обычно достаточным является описание поверхности отклика полиномом второго порядка в виде [89]

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i + \sum_{i < j}^k b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} \cdot x_i^2, \quad (4.14)$$

где  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}$  – коэффициенты регрессии уравнения.

Для описания области оптимума уравнениями второго порядка в условиях неоднородностей Боксом – Бенкиным разработаны трехуровневые планы [25].

Их особенностью является то, что во всех строках плана некоторые факторы находятся на нулевых уровнях. По сравнению с ортогональными и рототабельными трехуровневые планы Бокса и Бенкина более экономичны и к тому же обладают свойствами вышеназванных планов.

В результате анализа нами был выбран трехуровневый план второго порядка Бокса – Бенкина для трех факторов, включающий 15 опытов. Матрица выбранного плана с результатами опытов приведена в табл. 4.8.

Опыты проводились в трехкратной повторности в рандомизированном порядке. С учетом данных крутого восхождения центр эксперимента был выбран в новой точке. Интервалы и уровни варьирования факторов приведены в табл. 4.9.

После проведения опытов производили расчет коэффициентов регрессии по формулам [89, 123]:

$$b_0 = \bar{y}_0 = \sum_{u=1}^{n_0} \frac{y_{0u}}{n_0}, \quad (4.15)$$

$$b_i = \frac{1}{8} \sum_{u=1}^N x_{iu} \cdot y_u, \quad (4.16)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{4} \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 \cdot y_u - \frac{1}{16} \sum_{j=1}^k \sum_{u=1}^N x_{ju}^2 y_u - \frac{1}{2} \bar{y}_0, \quad (4.17)$$

где  $\bar{y}_0$  – среднее значение параметра оптимизации в нулевых точках;

$n_0$  – число нулевых точек;

$y_{0u}$  – значение параметра оптимизации в нулевых точках;

$N$  – общее число опытов в матрице плана;

$k$  – число факторов;

$y_u$  – значение параметра оптимизации в  $u$ -м опыте;

$x_{iu}, x_{ju}$  – значения факторов в  $u$ -м опыте.

Таблица 4.8. Матрица планирования эксперимента при описании области оптимума

Обозначения	Факторы			Значения параметра оптимизации				
	Скорость подачи ленты льно-тресты, м/с $x_1$	Зазор между бичом и декой, м $x_3$	Частота вращения рабочего органа, с <sup>-1</sup> $x_6$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$\bar{y}$	$\hat{y}$
Верхний уровень (1)	1,6	0,02	3,5					
Основной уровень (0)	1,4	0,015	3					
Нижний уровень (-1)	1,2	0,01	2,5					
Интервал варьирования $m$	0,2	0,005	0,5					
1	0	+	+	0,9692	0,9821	0,9917	0,9810	0,9785
2	0	-	+	0,9981	0,9920	0,9991	0,9970	0,9928
3	0	+	-	0,9772	0,9731	0,9807	0,9770	0,9713
4	0	-	-	0,9960	0,9890	0,9880	0,9910	0,9855
5	0	0	0	0,9761	0,9722	0,9947	0,9810	0,9820
6	+	0	+	0,9741	0,9775	0,9824	0,9780	0,9816
7	-	0	+	0,9970	0,9987	0,9983	0,9980	0,9896
8	+	0	-	0,9908	0,9738	0,9814	0,9820	0,9744
9	-	0	-	0,9721	0,9799	0,9731	0,9750	0,9824
10	0	0	0	0,9968	0,9722	0,9801	0,9830	0,9820
11	+	+	0	0,9516	0,9778	0,9836	0,9710	0,9709
12	-	+	0	0,9691	0,9915	0,9613	0,9740	0,9789
13	+	-	0	0,9927	0,9760	0,9653	0,9780	0,9851
14	-	-	0	0,9890	0,9990	0,9940	0,9940	0,9931
15	0	0	0	0,9859	0,9624	0,9977	0,9820	0,9820

В результате расчетов по зависимостям (4.15)–(4.17) получили следующие значения коэффициентов регрессии:

$$b_0 = 0,982; b_1 = -0,004; b_3 = -0,00713; b_6 = 0,00363; b_{1,3} = 0,00325;$$

$$b_{1,6} = -0,00675; b_{3,6} = -0,0005; b_1^2 = -0,003; b_3^2 = 0,00025; b_6^2 = 0,00425.$$

Таблица 4.9. Уровни и интервалы варьирования факторов

Наименование фактора	Обозначение	Уровни и интервалы варьирования			
		(-1)	(0)	(+1)	<i>m</i>
Скорость подачи ленты льнотресты, м/с	$x_1$	1,2	1,4	1,6	0,2
Зазор между бичом и декой, м	$x_3$	0,01	0,015	0,02	0,005
Частота вращения рабочего органа, с <sup>-1</sup>	$x_6$	2,5	3,0	3,5	0,5

Подставляя полученные значения коэффициентов регрессии в уравнение (4.14), получим уравнение регрессии в кодированном виде:

$$y = 0,982 - 0,004 \cdot x_1 - 0,00713 \cdot x_3 + 0,00363 \cdot x_6 + 0,00325 \cdot x_{1,3} - 0,00675 \cdot x_{1,6} - 0,0005 \cdot x_{3,6} - 0,003 \cdot x_1^2 + 0,00025 \cdot x_3^2 + 0,00425 \cdot x_6^2. \quad (4.18)$$

Для подтверждения гипотезы об адекватности модели второго порядка нами был проведен статистический анализ полученного уравнения. Оценку адекватности модели второго порядка производили путем сравнения табличного значения критерия Фишера с расчетным [89, 123]. Расчет критерия Фишера осуществляли по формуле [89]

$$F = \frac{SS_{LF}}{f_{LF}} \cdot \frac{f_y}{SS_y}, \quad (4.19)$$

где  $SS_{LF}$  – сумма квадратов, определяющая неадекватность результатов эксперимента [89].

$$SS_{LF} = m \sum_{u=1}^N (\hat{y}_u - \bar{y}_u)^2, \quad (4.20)$$

где  $SS_y$  – сумма квадратов, характеризующая ошибку опытов [89].

$$SS_y = \sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^m (y_{iu} - \bar{y}_u)^2, \quad (4.21)$$

где  $f_{LF}$  и  $f_y$  – число степеней свободы, отвечающее соответственно сумме  $SS_{LF}$  и  $SS_y$  [89].

$$f_{LF} = N - k_p, \quad (4.22)$$

$$f_y = N \cdot (m - 1), \quad (4.23)$$

где  $k_p$  – число коэффициентов в уравнении регрессии.

Для удобства расчета критерия Фишера промежуточные результаты расчетов сводили в табл. 4.10.

Таблица 4.10. Вспомогательная таблица для расчета экспериментального значения критерия Фишера

№ опыта	$\bar{y}$	$\hat{y}$	$(\bar{y} - y_1)^2$	$(\bar{y} - y_2)^2$	$(\bar{y} - y_3)^2$	$\bar{y} - \hat{y}$	$(\bar{y} - \hat{y})^2$
1	0,9810	0,9785	0,00014	0,00001	0,00011	0,00250	0,00001
2	0,9970	0,9928	0,00001	0,00002	0,00002	0,00425	0,00002
3	0,9770	0,9713	0,00001	0,00002	0,00001	0,00575	0,00003
4	0,9910	0,9855	0,00002	0,00001	0,00001	0,00550	0,00003
5	0,9810	0,9820	0,00002	0,00008	0,00019	-0,00100	0,00001
6	0,9780	0,9816	0,00002	0,00001	0,00002	-0,00362	0,00001
7	0,9980	0,9896	0,00001	0,00001	0,00001	0,00838	0,00007
8	0,9820	0,9744	0,00008	0,00007	0,00001	0,00763	0,00006
9	0,9750	0,9824	0,00001	0,00002	0,00001	-0,00737	0,00005
10	0,9830	0,9820	0,00019	0,00012	0,00001	0,00100	0,00001
11	0,9710	0,9709	0,00038	0,00005	0,00016	0,00013	0,00001
12	0,9740	0,9789	0,00002	0,00031	0,00016	-0,00487	0,00002
13	0,9780	0,9851	0,00022	0,00000	0,00016	-0,00712	0,00005
14	0,9940	0,9931	0,00002	0,00002	0,00001	0,00088	0,00001
15	0,9820	0,9820	0,00002	0,00039	0,00025	0,00001	0,00001
Сумма			0,00114	0,00110	0,00110	0,01200	0,00036

Произведя расчеты по формулам (4.19)–(4.23), получили:

$$SS_{LF} = 0,00108; SS_y = 0,00333; f_{LF} = 5; f_y = 30.$$

Расчетное значение критерия Фишера в этом случае  $F_p = 1,94$ .

Табличное значение критерия Фишера  $F_\tau = 2,51$  [87].

Поскольку  $F_p = 1,94 < F_\tau = 2,51$ , то гипотеза об описании результатов эксперимента уравнением второго порядка (4.18) принимается [89].

Затем производили расчет доверительных интервалов по следующим формулам [89]:

$$\pm \Delta b_i = \pm t_c \cdot S_{b_i}, \quad (4.24)$$

$$S_{b_0} = \frac{1}{n_0} \cdot S_y^2, \quad (4.25)$$

$$S_{bi} = \frac{1}{8} \cdot S_y^2, \quad (4.26)$$

$$S_{bii} = \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{4} n_0\right) \cdot S_y^2, \quad (4.27)$$

$$S_{bij} = \frac{1}{4} \cdot S_y^2, \quad (4.28)$$

где  $t_c$  – табличное значение критерия Стьюдента [89];

$S_{bi}$  – квадратичная ошибка коэффициента регрессии [89];

$n_0$  – число нулевых точек в матрице плана.

Числовые коэффициенты зависимостей (4.25)–(4.28) выбирались согласно выбранному плану эксперимента и числу факторов [89].

Результаты расчетов сводили в таблицу 4.11.

Таблица 4.11. **Результаты расчета доверительных интервалов для коэффициентов регрессии**

Параметр	Значение
$N$	15
$k$	3
$n_0$	3
$S_y^2$	0,00011
$S_{b0}$	0,00004
$S_{bi}$	0,00001
$S_{bii}$	0,00011
$S_{bij}$	0,00003
$\pm \Delta b_0$	$\pm 0,00009$
$\pm \Delta b_i$	$\pm 0,00003$
$\pm \Delta b_{ii}$	$\pm 0,00026$
$\pm \Delta b_{ij}$	$\pm 0,00006$
Незначимый коэффициент регрессии	$b_3^2$

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод о том, что незначимым является коэффициент регрессии  $b_3^2$ .

Однако в случае исключения членов уравнения (4.18) с этим коэффициентом произойдет нарушение адекватности модели.

Было произведено раскодирование уравнения (4.18) для интерпретации результатов и возможности его использования в качестве расчетной формулы. Раскодирование производилось по общепринятой методике [89]. В результате получили следующее уравнение:

$$E_{об} = 0,7936 + 0,3438 \cdot v_{л} - 5,675 \cdot \Delta + 0,00278 \cdot n_{б} + 3,25 \cdot \Delta \cdot v_{л} - 0,0675 \cdot n_{б} \cdot v_{л} - 0,2 \cdot n_{б} \cdot \Delta - 0,075 \cdot v_{л}^2 + 10 \cdot \Delta^2 + 0,017 \cdot n_{б}^2, \quad (4.29)$$

где  $v_{л}$  – скорость подачи ленты льнотресты, м/с;

$\Delta$  – зазор между бичом и декой, м;

$n_{б}$  – частота вращения рабочего органа,  $c^{-1}$ .

Подставляя в уравнение (4.29) значения факторов, соответствующие их нулевым уровням, получили значение степени обмолота  $E_{об} = 0,9832$ . В результате экспериментов, проведенных при этих же уровнях факторов, получили значение степени обмолота  $E_{об} = 0,982$ .

Разность между расчетным и экспериментальным значениями не превышает 5 %. На основании этого можно сделать вывод о том, что экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными и подтверждают их.

#### 4.6.5. Анализ математической модели процесса

После получения адекватной математической модели второго порядка следующим этапом методики экспериментального планирования является определение координат оптимума и изучение свойств поверхности отклика в окрестности оптимума [4].

Нахождение оптимальных параметров сводили к решению задач оптимизации [89]:

$$0,7936 + 0,3438 \cdot v_{л} - 5,675 \cdot \Delta + 0,0028 \cdot n_{б} + 3,25 \cdot \Delta \cdot v_{л} - 0,0675 \cdot n_{б} \cdot v_{л} - 0,2 \cdot n_{б} \cdot \Delta - 0,075 \cdot v_{л}^2 + 10 \cdot \Delta^2 + 0,017 \cdot n_{б}^2 \rightarrow \max. \quad (4.30)$$

$$2,5 \leq n_{б} \leq 3,5;$$

$$0,01 \leq \Delta \leq 0,02;$$

$$1,2 \leq v_{л} \leq 1,6.$$

Задачи решали двойственным симплекс-методом в Microsoft Excel [89] на ПЭВМ. В результате решения задач были получены оптимальные значения:

$$n_{б} = 3,09 \text{ c}^{-1}, \Delta = 0,01 \text{ м}, v_{л} = 1,25 \text{ м/с}, \text{ при этом } E_{об} = 0,995.$$

Изучение поверхности отклика проводили методом двумерных сечений. Для этого в полученной модели второго порядка в закодированном виде один из факторов фиксировали на уровне, близком к оптимальному. Далее для полученных моделей определяли центр поверхности отклика путем взятия частных производных по каждому фактору и приравнивания полученных выражений к нулю. Затем проводили каноническое преобразование модели второго порядка и определяли тип поверхности отклика в сечении [4]. Полученное выражение подвергали графоаналитическому анализу, в котором использовали графики в координатах независимых переменных с натуральным масштабом (рис. 4.20, 4.21 и 4.22).

Как видно из двумерного сечения поверхности отклика для факторов  $v_d$  и  $\Delta$  (рис. 4.20), оно представляет собой возвышающийся гребень. Максимальное значение степени обмолота в рассматриваемом сечении при  $n_6$ , взятом на нулевом уровне, равно 0,993 и имеет место при зазоре между бичом и декой 0,0116 м и скорости подачи ленты льнотресты 1,25 м/с [75].

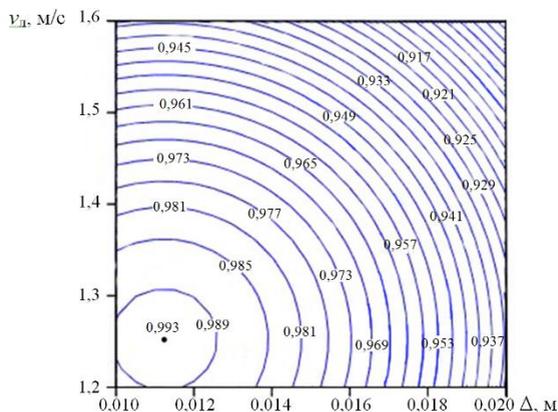


Рис. 4.20. Двумерное сечение поверхности отклика для факторов  $v_d$  и  $\Delta$

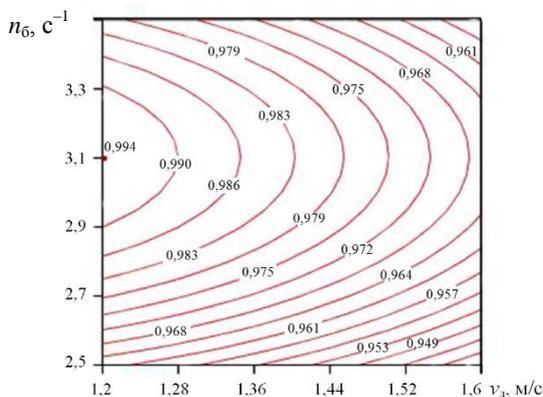


Рис. 4.21. Двумерное сечение поверхности отклика для факторов  $n_6$  и  $v_{л}$

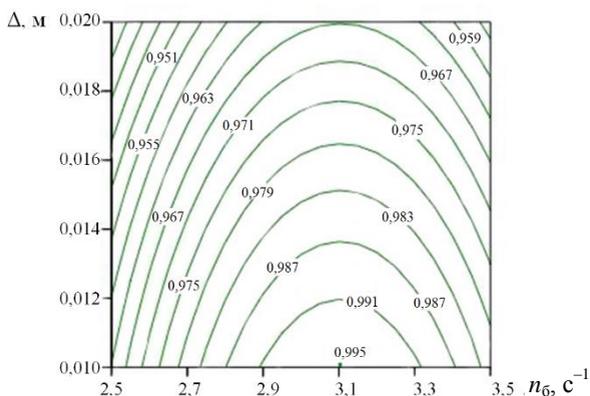


Рис. 4.22. Двумерное сечение поверхности отклика для факторов  $\Delta$  и  $n_6$

Анализируя двумерное сечение поверхности отклика для факторов  $v_{л}$  и  $n_6$  (рис. 4.21), видим, что сечение представляет собой возвышающийся гребень. Максимальное значение степени обмолота в рассматриваемом сечении при  $\Delta$ , взятом на нулевом уровне, равно 0,994 и имеет место при скорости подачи ленты льнотресты 1,2 м/с и частоте вращения рабочего органа 3,1  $c^{-1}$  [75].

Из двумерного сечения поверхности отклика для факторов  $\Delta$  и  $n_6$  (рис. 4.22), представляющего собой возвышающийся гребень, видно, что максимальное значение степени обмолота в рассматриваемом

сечении при  $v_{\text{л}}$ , взятом на нулевом уровне, равно 0,995 и имеет место при частоте вращения рабочего органа  $3,1 \text{ с}^{-1}$  и зазоре между бичом и декой 0,01 м [75].

Рассмотрение двумерных сечений поверхности отклика (см. рис. 4.20, 4.21, 4.22) показывает, что исследуемые факторы оказывают существенное влияние на критерий оптимизации, а их рациональные значения находятся в следующих пределах: скорость подачи ленты льнотресты – 1,2–1,3 м/с; зазор между бичом и декой – 0,010–0,012 м; частота вращения рабочего органа – 2,9–3,3  $\text{с}^{-1}$  [75].

## Выводы

1. Определены основные физико-механические свойства ленты льнотресты, поступающей на обмолот: влажность льнотресты – 13–14 %; количество стеблей в ленте льнотресты на один погонный метр – 2140–2480 шт.; количество семенных коробочек на стебле – 8–10 шт.; количество семян в коробочке – 6–8 шт.; общая длина стеблей – 0,65–0,8 м; средняя ширина ленты льнотресты – 0,78–0,96 м; конусность стеблей льнотресты – 0,0008–0,0017; растянутость ленты льнотресты – 1,18–1,25; относительный перекося стеблей в ленте льнотресты – 18–35° [75].

Установлены закономерности изменения угла отгиба стеблей льна и предельной величины смещения ленты за время с момента начала воздействия бича на стебли до возможного их обрыва в зависимости от диаметра стеблей в наиболее тонком месте исследуемого участка при различных значениях величины «мертвой» зоны [59].

Установлена величина упругой деформации семенной коробочки льна. Получены данные, определяющие взаимосвязь поперечной деформации семенной коробочки льна и силы упругости для различных диаметров семенных коробочек льна. Получены зависимости механического напряжения, возникающего в семенной коробочке, от степени сжатия ее. Расчетные значения модуля Юнга для семенных коробочек диаметром 0,0056–0,0078 м составили 0,28–0,55 МПа. Установлены предельные значения поперечной деформации семенной коробочки (0,0006–0,0022 м), определяющие момент ее разрушения [39].

2. В результате проведенных исследований установлено, что рациональной формой рабочей кромки эластичного бича является зубчатая с высотой зуба  $h_3 = 0,01 \dots 0,02$  м при фиксированном значении основа-

ния зуба  $z_3 = 0,007$  м. Она обеспечивает большую степень обмолота по сравнению с прямой и параболической рабочими кромками в большинстве случаев проведенных опытов. Это объясняется тем, что треугольная форма обладает большей проникающей способностью в нижние слои ленты и более интенсивным воздействием на стебли, уплотненные в межзубовом пространстве [105, 157].

Проведенные поисковые эксперименты очесывающе-плющильного аппарата с эластичным рабочим органом и различной конфигурацией рабочей кромки позволили определить рациональные интервалы варьирования факторов при обмолоте лент льнотресты: скорости подачи ленты льнотресты – от 1,2 до 1,6 м/с; смещения ленты льнотресты относительно обмолачивающего устройства – от  $-0,02$  до  $0,03$  м; зазора между бичом и декой – от  $0,01$  до  $0,015$  м; толщины слоя ленты льнотресты – от  $0,01$  до  $0,03$  м; частоты вращения рабочего органа – от 2,7 до  $3,2$  с<sup>-1</sup>; угла установки плоскости бича к плоскости ленты – от  $0,85$  до  $1,1$  рад [157].

3. Получена математическая модель, описывающая процесс обмолота лент льнотресты очесывающе-плющильным аппаратом. Она позволяет определить значения факторов, при которых достигается наибольшая степень обмолота ( $E_{об} = 0,995$ ): скорость подачи ленты льнотресты – 1,25 м/с; зазор между бичом и декой –  $0,01$  м; частота вращения рабочего органа –  $3,09$  с<sup>-1</sup>. Остальные факторы фиксировались на следующих уровнях: смещение ленты льнотресты относительно обмолачивающего устройства –  $0$  м; толщина слоя ленты льнотресты –  $0,03$  м; угол установки плоскости бича к плоскости ленты –  $0,9$  рад [65, 76].

## **5. РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ**

### **5.1. Результаты производственных испытаний очесывающе-плющильного аппарата**

После определения рациональных значений параметров предлагаемого очесывающе-плющильного аппарата был изготовлен опытный образец устройства, который был установлен в линии первичной переработки льна «Van Dommele» ОАО «Дубровенский льнозавод», где проводились его производственные испытания [75].

Линия первичной переработки льна «Van Dommele» представляет собой совокупность последовательно установленных машин, осуществляющих технологические процессы, включающие подготовку льнотресты к переработке (загрузку и размотку рулонов льнотресты, формирование слоя, выравнивание стеблей, отделение семенной части), переработку семенной части (домолачивание и очистку семян), получение длинного и короткого волокна и удаление отходов трепания. Поэтому изменение технологических параметров процесса (скорости подачи ленты льнотресты, равномерности слоя и т. д.) на одном участке оказывает влияние на протекание последующих процессов на других участках и на производительность всей линии в целом. Основным фактором, влияющим на производительность линии, является масса погонного метра ленты льнотресты, которая является величиной непостоянной, зависящей от биологической урожайности льна, а также качества выравнивания ленты обслуживающим линию персоналом на участке размотки рулонов. В производственных условиях масса погонного метра ленты льнотресты варьируется в пределах от 2,0 до 4,5 кг, в то время как для обеспечения наиболее эффективного использования линии первичной переработки льна этот показатель должен составлять не менее 3 кг [75, 133].

Кроме того, масса погонного метра ленты оказывает существенное влияние на качество отделения семенной части, что определяет дополнительный экономический эффект использования линии. В связи с этим проводились исследования влияния данного фактора на качественные показатели работы обмолачивающего устройства: степень обмола, степень повреждения семян и стеблей, отход стеблей в пунтину [75].

Производственные испытания проводились на ленте льна,

получаемой из рулона льна-долгунца сорта Грант, убранного по заводской технологии. Характеристики ленты льнотресты, используемой при проведении испытаний, представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1. Характеристики ленты льнотресты

Показатель	Значение
Культура, сорт	Лен-долгунец, Грант
Фаза спелости льна	Льнотреста
Спелость коробочек по семенам, %:	
- желтые	7
- бурые	93
Влажность, %:	
- стеблей	14
- коробочек	13
- сорняков	15,5
Зона расположения коробочек в ленте, м	0,25–0,35
Средняя общая длина стебля, м	0,73
Засоренность ленты льнотресты сорняками, %	3,04
Средний диаметр стебля, мм	1,15
Растянutosть ленты льнотресты	1,25

В результате обмолота ленты льнотресты (рис. 5.1) предлагаемым очесывающе-плющильным аппаратом в линии первичной переработки получали коробочки, семена и обмолоченную ленту (рис. 5.2, 5.3) [63, 75].



Рис. 5.1. Общий вид поступающей на обмолот ленты льнотресты



Рис. 5.2. Общий вид ленты льнотресты после обмолота



Рис. 5.3. Общий вид коробочек и семян льна после обмолота

Графические зависимости, полученные в результате проведения производственных испытаний, представлены на рис. 5.4–5.7.

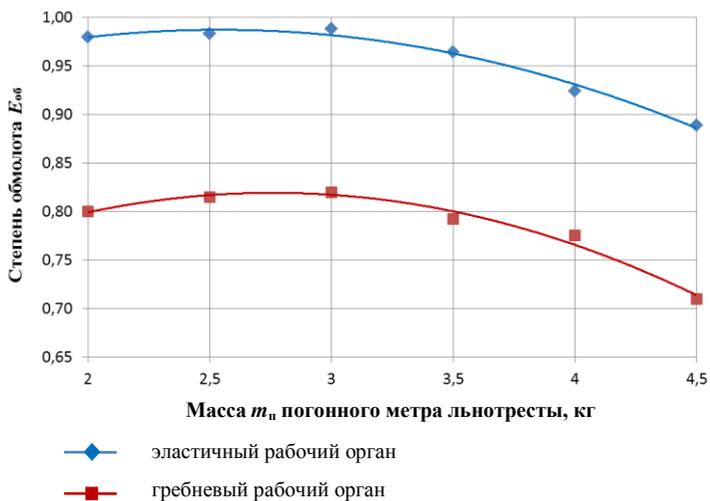


Рис. 5.4. Зависимость степени обмолота от массы погонного метра подаваемой на обмолот ленты льнотресты

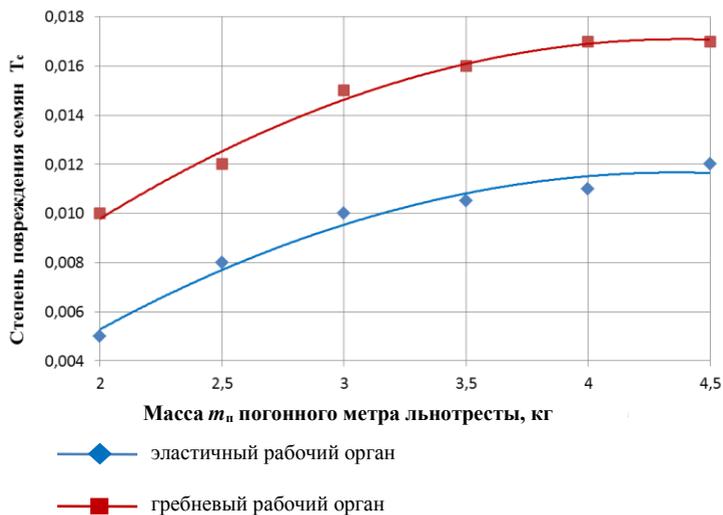


Рис. 5.5. Зависимость степени повреждения семян от массы погонного метра подаваемой на обмолот ленты льнотресты

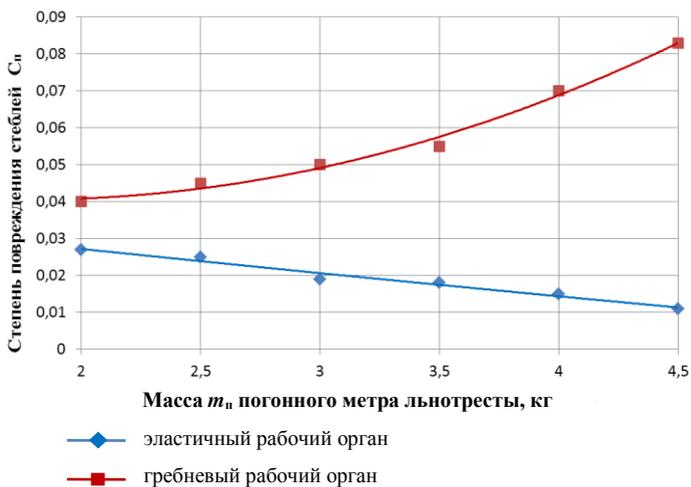


Рис. 5.6. Зависимость степени повреждения стеблей от массы погонного метра подаваемой на обмолот ленты льнотресты

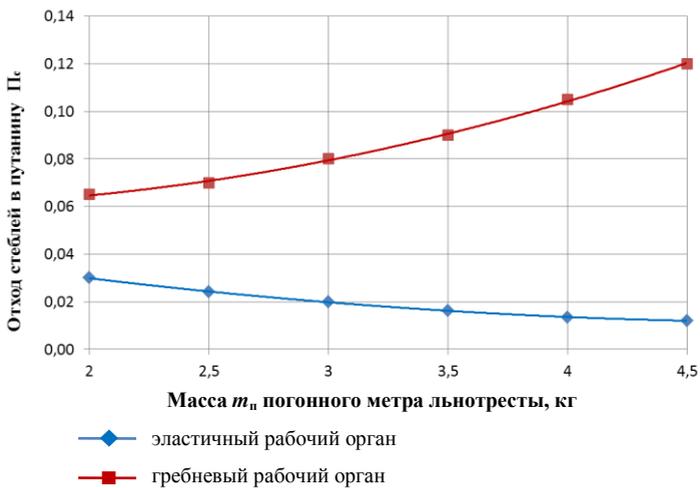


Рис. 5.7. Зависимость отхода стеблей в пуганну от массы погонного метра подаваемой на обмолот ленты льнотресты

Анализируя графические зависимости, приведенные на рис. 5.4, можно сделать вывод о том, что при увеличении массы погонного метра ленты льнотресты степень обмолота снижается как у серийного гребневого рабочего органа, так и у разработанного эластичного рабочего органа. При этом существенное снижение степени обмолота эластичным рабочим органом происходит при массе погонного метра более 3,5 кг. Максимальное значение степени обмолота 0,988 достигается при массе погонного метра 3 кг. При массе 2 кг наблюдается незначительное снижение степени обмолота, что объясняется небольшим давлением эластичного бича на ленту льнотресты вследствие ее недостаточной упругости из-за малой толщины. На участке от 3 до 4,5 кг степень обмолота снижается до 0,88. Это объясняется растущей толщиной обрабатываемого слоя, которая уменьшает проникающую способность зубчатого бича в обрабатываемый слой. Снижение степени обмолота с увеличением массы погонного метра ленты льнотресты у серийного гребневого рабочего органа происходит более интенсивно. При массе погонного метра от 2 до 3 кг плотность ленты небольшая и при рабочем движении гребенки коробочки проскальзывают между зубьями. При массе погонного метра около 3 кг создается достаточная для качественного очеса плотность ленты. Последующее увеличение массы приводит к снижению степени обмолота за счет превышения допустимой толщины слоя ленты, приводящей к возрастанию плотности стеблей в межзубовом пространстве. Степень обмолота при нормированном значении массы погонного метра ленты льнотресты 3 кг составила 0,822 [75, 121].

Анализируя графические зависимости, приведенные на рис. 5.5, можно сделать вывод о том, что степень повреждения семян у обоих рабочих органов возрастает с увеличением массы погонного метра подаваемой на обмолот ленты льнотресты. Вместе с тем у эластичного рабочего органа степень повреждения семян во всем диапазоне исследования ниже, чем у гребневого, что обусловлено свойствами его материала. Металлическая поверхность серийного гребневого рабочего органа травмирует семена в большей степени, чем полиуретановая эластичного рабочего органа. Повреждение семян при обмолоте эластичным рабочим органом наблюдается в основном в нижних слоях ленты при взаимодействии их с металлической поверхностью сепарирующей решетки (деки) [75].

Анализируя графические зависимости, приведенные на рис. 5.6,

можно сделать вывод, что степень повреждения стеблей с увеличением массы погонного метра подаваемой на обмолот ленты льнотресты при использовании эластичного рабочего органа снижается в отличие от серийного. Повреждение стеблей происходит главным образом из-за обрывных сил, создаваемых эластичным рабочим органом в верхних слоях обрабатываемой ленты. Чем толще слой ленты, тем меньше процент стеблей льна, непосредственно контактирующих с рабочим органом. При использовании гребневого рабочего органа повышение степени повреждения стеблей с увеличением массы погонного метра обусловлено защемлением порций стеблей в межзубовом пространстве при их прочесывании и ростом вероятности обрыва их зубьями. Степень повреждения стеблей льна при нормированном значении массы погонного метра ленты льнотресты 3 кг составила для эластичного и гребневого рабочих органов соответственно 0,02 и 0,05 [75].

Анализируя графические зависимости, приведенные на рис. 5.7, можно сделать вывод о том, что изменение степени отхода стеблей в путанину с увеличением массы погонного метра подаваемой на обмолот ленты льнотресты при использовании обоих рабочих органов аналогично вышерассмотренному изменению степени повреждения стеблей. У эластичного рабочего органа показатель отхода стеблей в путанину уменьшается, у гребневого – растет. Выдергивание стеблей из зажимного транспортера при работе эластичного рабочего органа происходит главным образом из-за продольных сил, создаваемых им в верхних слоях обрабатываемой ленты зубчатой рабочей кромкой, и сил трения. Чем толще слой ленты, тем меньше количество стеблей, непосредственно контактирующих с рабочим органом. Проникновение зубьев гребневого рабочего органа в слой стеблей и разделение его на порции в процессе прочесывания сопровождается исправлением дефектов ориентации и нарушением связей между стеблями и спутавшимися коробочками, что приводит к выдергиванию сцепленных между собой стеблей. Степень отхода стеблей льна в путанину при нормированном значении массы погонного метра ленты льнотресты 3 кг составила для эластичного и гребневого рабочих органов соответственно 0,02 и 0,08 [75].

В результате проведенных производственных испытаний обмолачивающего устройства с эластичным рабочим органом в линии первичной переработки льна фирмы «Van Dommele» установлено, что по сравнению с серийным гребневым рабочим органом увеличивается

степень обмолота лент льнотресты с 0,82 до 0,988, происходит снижение повреждения семян с 0,015 до 0,01, повреждения стеблей, влияющего на выход длинного волокна, с 0,05 до 0,02 и отхода стеблей в путанину с 0,08 до 0,02 [75].

## **5.2. Методика выбора параметров и режимов работы очесывающе-плющильного аппарата**

Методика выбора технологических параметров и режимов работы очесывающе-плющильного аппарата линии первичной переработки льна основывается на результатах теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в соответствии с программой исследований. Их анализ позволяет сделать следующие выводы [4, 75].

Факторами, оказывающими наиболее существенное влияние на параметр оптимизации процесса обмолота лент льнотресты очесывающе-плющильным аппаратом, являются скорость подачи ленты льнотресты, зазор между бичом и декой и частота вращения рабочего органа. В зависимости от состояния поступающей на обмолот льнотресты необходимо изменять значения этих факторов, а также толщину подаваемого на обмолот слоя льнотресты. Для получения высокой степени обмолота вышеуказанные факторы необходимо устанавливать на уровне, обеспечивающем наилучшие значения показателей качества.

Для упрощения выбора технологических параметров предлагается использовать номограмму (рис. 5.8), разработанную по результатам теоретических и экспериментальных исследований.

В первом квадранте номограммы представлены линии, соответствующие номерности льнотресты, поступающей в линию первичной переработки, во втором – график зависимости зазора между бичом и декой от толщины слоя ленты льнотресты, в третьем – линии, соответствующие требуемой степени обмолота, в четвертом – график зависимости скорости ленты льнотресты, обеспечивающей заданную производительность линии первичной переработки.

Приведем пример использования номограммы. Исходные данные: производительность линии первичной переработки  $Q = 1,5$  т/ч, номерность льнотресты, поступающей в линию первичной переработки, – 1,5, степень обмолота, соответствующая агротехническим требованиям, – 0,98.

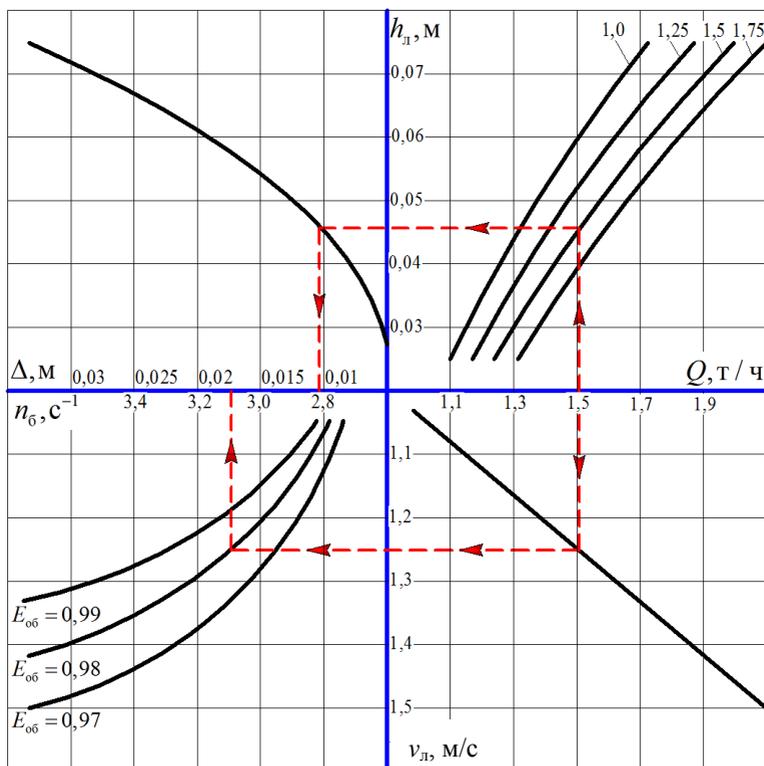


Рис. 5.8. Номограмма для выбора технологических параметров обмолачивающего устройства линии первичной переработки льна:  
 $Q$  – производительность линии первичной переработки льна, т/ч;  
 $h_{л}$  – толщина слоя ленты льнотресты, м;  $\Delta$  – зазор между бичом и декой, м;  
 $n_6$  – частота вращения рабочего органа,  $c^{-1}$ ;  $E_{об}$  – степень обмолота;  
 $v_{л}$  – скорость ленты льнотресты, м/с

В первом квадранте номограммы восстанавливаем перпендикуляр в точке, соответствующей  $Q = 1,5$  т/ч, до пересечения с линией номерности льнотресты 1,5 и проводим горизонталь до оси  $h_{л}$ . Таким образом, определяем толщину слоя ленты льнотресты  $h_{л} = 0,046$  м. Продолжив горизонталь до пересечения с графиком второго квадранта и опустив его на ось  $\Delta$ , получим значение зазора между бичом и декой  $\Delta = 0,011$  м. В четвертом квадранте из точки, соответствующей  $Q = 1,5$  т/ч, проводим перпендикуляр до пересечения с графиком зави-

симости скорости ленты льнотресты от производительности линии, а затем проводим горизонталь до оси  $v_{л}$ . Таким образом, определяем скорость ленты льнотресты  $v_{л} = 1,25$  м/с. Продолжив горизонталь до линии степени обмолота  $E_{об} = 0,98$  и проведя перпендикуляр до оси  $n_6$ , получим значение частоты вращения рабочего органа  $n_6 = 3,09$  с<sup>-1</sup>.

Применение разработанной номограммы позволяет в значительной мере облегчить задачу по выбору технологических параметров и режимов работы очесывающе-плющильного аппарата линии первичной переработки льна.

### 5.3. Реализация результатов исследований

По результатам теоретических и экспериментальных исследований был изготовлен опытный образец очесывающе-плющильного аппарата. Конструкция обеспечивала варьирование основных параметров обмолачивающего устройства в установленных пределах. Производственные испытания разработанного обмолачивающего устройства проводились в ОАО «Дубровенский льнозавод» Витебской области.

По результатам проведенных производственных испытаний можно сделать заключение о том, что обмолачивающее устройство работоспособно и обеспечивает значение качественных показателей процесса обмолота в пределах агротехнических требований. Это подтверждается соответствующими актами.

Полученные результаты исследований рассматривались как составная часть хозяйственной темы № 35/4 «Разработать и освоить в производстве обмолачивающее устройство для линии первичной переработки льна на отечественных льнозаводах», № госрегистрации 20111830, работы по которой проводились в 2010 году, хозяйственной темы № 315 «Исследование процесса взаимодействия различных типов рабочих органов с льнотрестой и льноволокном», № госрегистрации 20143309, работы по которой проводились в 2014–2015 годах.

В ОАО «Дубровенский льнозавод» (г. Дубровно Витебской обл.) на протяжении 2010–2014 годов проводились производственные испытания опытного образца обмолачивающего устройства с эластичным рабочим органом в линии первичной переработки льна «Van Dommele». По результатам исследований получен акт о практическом использовании результатов исследований в ОАО «Дубровенский льнозавод».

В 2014 году результаты исследований рассмотрены конструкторским бюро ОАО «Калинковичский ремонтно-механический завод» и приняты к использованию при модернизации линии ЛВДЛ-2500.

В 2019 году проведена оценка возможности использования обмолачивающего устройства с эластичным рабочим органом в ОАО «Ореховский льнозавод» в линии первичной переработки «Deportere».

В 2022 году результаты исследований рассмотрены и одобрены научным советом РУП «Институт льна» НАН Беларуси и рекомендованы к использованию в линиях первичной переработки, оборудованных очесывающими аппаратами.

В 2022 году результаты исследований рассмотрены и одобрены научно-техническим советом Центра научно-технических разработок ОАО «Управляющая компания холдинга «Бобрсагроماش» и приняты к использованию при проектировании новых машин для уборки и первичной переработки льна.

Полученные материалы используются в учреждении образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия» на кафедрах сельскохозяйственных машин и механизации растениеводства и практического обучения при изучении современных технологий и машин для уборки и первичной переработки льна.

Результаты исследований, а также макетный образец обмолачивающего устройства линии первичной переработки льна были представлены на выставке межрегионального бизнес-форума «Кооперация производства, бизнеса и науки» в 2015 году в г. Могилеве в РУП «Научно-аналитический центр информации, инноваций и трансфера технологий».

Научная новизна исследований подтверждается патентами Республики Беларусь на полезную модель.

#### **5.4. Расчет экономической эффективности применения очесывающе-плющильного аппарата в линии первичной переработки льна «Van Dommele»**

Для определения экономической эффективности использования очесывающе-плющильного аппарата в линии первичной переработки льна «Van Dommele» были проведены его исследования в сравнении с серийным очесывающим устройством.

При определении экономической эффективности применения но-

вой техники основным критерием является приведенный годовой экономический эффект [91, 92, 98, 132, 142, 161].

Исходные данные, принятые для расчета экономической эффективности применения очесывающе-плющильного аппарата, представлены в табл. 5.2.

Таблица 5.2. Исходные данные для расчета экономической эффективности

Показатель	Обозначение	Единица измерения	Устройство для отделения коробочек льна	
			серийное	предлагаемое
Производительность за 1 ч эксплуатационного времени	$W_{ЭК}$	т/ч	1,5	1,5
Мощность приводов	$N_{ДВ}$	кВт	4,5	4,5
Количество обслуживающего персонала	Л	чел.	1	1
Балансовая стоимость машин	Б	руб.	22885	–
Коэффициент использования времени смены	$k_{СМ}$		0,85	0,85
Нормативная годовая загрузка	$T_H$	ч	1020	1020
Годовой объем производства линии первичной переработки льна «Van Dommele»	$V_T$	т	5100	5100
Стоимость 1 кВт · ч электроэнергии	$Ц_{ЭЛ}$	руб.	0,4	0,4
Стоимость 1 т семян	$Ц_С$	руб.	2500	2500
Стоимость 1 т льнотресты	$Ц_T$	руб.	1084	1084
Стоимость 1 т льноволокна (длинного)	$Ц_{ВД}$	руб.	17844,89	17844,89
Стоимость 1 т льноволокна (короткого)	$Ц_{ВК}$	руб.	4523,85	4523,85

Годовой экономический эффект от использования очесывающе-плющильного аппарата

$$\mathcal{E} = V_T \cdot (D - (Z_{пз2} - Z_{пз1})), \quad (5.1)$$

где  $V_T$  – годовой объем льняной тресты, поступающей на обмолот, т;

$D$  – дополнительная выручка на 1 т переработанной тресты за счет увеличения выхода и роста качества продукции, руб.;

$Z_{пз2}$  – приведенные затраты на обработку 1 т льняной тресты предлагаемым обмолачивающим устройством, руб.;

$Z_{пз1}$  – приведенные затраты на обработку 1 т льняной тресты серийным очесывающим устройством, руб.

$$V_T = V_{\Gamma} \cdot k_{исп}, \quad (5.2)$$

где  $V_{\Gamma}$  – годовой объем производства линии первичной переработки льна «Van Dommele», т;

$k_{исп}$  – коэффициент, учитывающий объем льняной тресты, поступающий на обмолот, от общего объема перерабатываемой тресты,  $k_{исп} = 0,2 \dots 0,5$  (рис. 5.9).

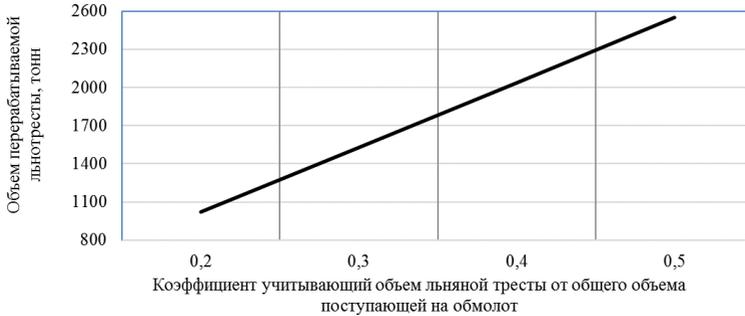


Рис. 5.9. График зависимости объема перерабатываемой льнотресты с выделением семян от коэффициента, учитывающего объем льняной тресты поступающей на обмолот

$$D = D_C + D_T + D_B, \quad (5.3)$$

где  $D_C$  – дополнительный доход с 1 т переработанной продукции за счет увеличения степени выделения семян, руб.;

$D_T$  – дополнительный доход с 1 т переработанной продукции за счет снижения потерь тресты, руб.;

$D_B$  – дополнительный доход с 1 т переработанной продукции за счет увеличения выхода длинного волокна, руб.

$$D_C = \Delta_C \cdot Ц_C, \quad (5.4)$$

где  $\Delta_C$  – дополнительный выход семян за счет снижения потерь при обмолоте, т;

$Ц_C$  – стоимость 1 т семян на технические нужды, руб.

$$\Delta_C = k_t \cdot \frac{m_c}{100}, \quad (5.5)$$

где  $k_T$  – коэффициент содержания семян в 1 т перерабатываемой продукции,  $k_T = 0,12$ ;

$m_C$  – показатель увеличения выхода семян за счет снижения потерь, %.

$$D_T = \Delta_T \cdot C_T, \quad (5.6)$$

где  $\Delta_T$  – дополнительный выход стеблей льна из 1 т за счет снижения их отхода в пуганину, т;

$C_T$  – стоимость 1 т льняной тресты среднего номера, руб.

$$\Delta_T = m_1 \cdot \frac{(m_{T6} - m_{Tn})}{100}, \quad (5.7)$$

где  $m_1$  – масса перерабатываемой продукции, т;

$m_{T6}$  – потери льняной тресты при использовании серийного очесывающего устройства, %;

$m_{Tn}$  – потери льняной тресты при использовании предлагаемого обмолачивающего устройства, %.

$$D_B = \Delta_B \cdot (C_{ВД} - C_{ВК}), \quad (5.8)$$

где  $\Delta_B$  – дополнительный выход длинного волокна, т;

$C_{ВД}$  – стоимость 1 т длинного льняного волокна № 11, руб.;

$C_{ВК}$  – стоимость 1 т короткого льняного волокна № 4, руб.

$$\Delta_B = k_B \cdot m_1 \cdot \frac{(m_{B6} - m_{Bn})}{100}, \quad (5.9)$$

где  $k_B$  – коэффициент выхода льноволокна из льняной тресты,  $k_B = 0,3$  [143];

$m_{B6}$  – повреждения стеблей льна, влияющие на выход длинного волокна, при использовании серийного очесывающего устройства, %;

$m_{Bn}$  – повреждения стеблей льна, влияющие на выход длинного волокна, при использовании предлагаемого обмолачивающего устройства, %.

Приведенные затраты на обработку 1 т льняной тресты серийным очесывающим устройством

$$Z_{\text{нз1}} = \frac{Z_{\text{з1}} + K_1 \cdot E_{\text{н}}}{V_{\text{T}}}, \quad (5.10)$$

где  $Z_{\text{з1}}$  – эксплуатационные затраты в расчете на годовой объем льняной тресты, поступающей на обмолот, при использовании серийного очесывающего устройства, руб.;

$K_1$  – стоимость серийного очесывающего устройства, руб.;

$E_{\text{н}}$  – нормативный коэффициент эффективности сельскохозяйственной техники,  $E_{\text{н}} = 0,067$  [91].

Приведенные затраты на обработку 1 т льняной тресты предлагаемым очесывающе-плющильным аппаратом

$$Z_{\text{нз2}} = \frac{Z_{\text{з2}} + K_2 \cdot E_{\text{н}}}{V_{\text{T}}}, \quad (5.11)$$

где  $Z_{\text{з2}}$  – эксплуатационные затраты в расчете на годовой объем льняной тресты, поступающей на обмолот, при использовании предлагаемого очесывающе-плющильного аппарата, руб.;

$K_2$  – сумма капиталовложений на изготовление очесывающе-плющильного аппарата, руб.

Сумма капиталовложений на изготовление очесывающе-плющильного аппарата

$$K_2 = (K_1 - Ц_{\text{гр}}) + C_{\text{д}} + P_{\text{тз}} + Z_3 + P_{\text{оп}} + P_{\text{ох}} + P_{\text{пр}}, \quad (5.12)$$

где  $Ц_{\text{гр}}$  – стоимость рабочего органа гребневого типа, руб.,  $Ц_{\text{гр}} = 125$  руб.;

$C_{\text{д}}$  – стоимость деталей и покупных изделий, руб.;

$P_{\text{тз}}$  – транспортно-заготовительные расходы, руб.;

$Z_3$  – затраты на оплату труда при изготовлении деталей установки, руб.;

$P_{\text{оп}}$  – общепроизводственные расходы, руб.;

$P_{\text{ох}}$  – общехозяйственные расходы, руб.;

$P_{\text{пр}}$  – прочие расходы (35 %  $P_{\text{оп}}$ ), руб.

Стоимость деталей и покупных изделий  $C_{\text{д}}$  включает стоимость полиуретановой пластины, крепежных изделий, металла и других элементов, предназначенных для изготовления эластичного рабочего органа и сепарирующей решетки (табл. 5.3) [81, 122].

Таблица 5.3. Стоимость элементов очесывающе-плющильного аппарата на 19.01.2025 г.

Название элемента	Типоразмер	Стоимость, руб.
Пластина полиуретановая ЛУР-90 ТУ 2226-001-37455706-2011 (3,1 кг)	10×500×500	202,8
Крепежные изделия	–	40,5
Металл	5×1500×1500	292,5
Другие элементы	–	68
Итого...	–	603,8

Транспортно-заготовительные расходы определяются в процентах от стоимости покупных материалов и изделий [98]:

$$P_{\text{тз}} = C_{\text{д}} \cdot \Pi_{\text{тз}}, \quad (5.13)$$

где  $\Pi_{\text{тз}}$  – процент транспортно-заготовительных расходов,  $\Pi_{\text{тз}} = 5\%$ .

Затраты на оплату труда при изготовлении деталей обмолачивающего устройства

$$Z_3 = OT_{\text{тар}} \cdot a_{\text{п}} \cdot O_{\text{доп}} \cdot O_{\text{отч}}, \quad (5.14)$$

где  $OT_{\text{тар}}$  – тарифная оплата труда, руб.;

$a_{\text{п}}$  – коэффициент, учитывающий премии по фонду оплаты труда,  $a_{\text{п}} = 1,7$  [100];

$O_{\text{доп}}$  – коэффициент, учитывающий размеры дополнительной оплаты труда,  $O_{\text{доп}} = 1,9$  [99];

$O_{\text{отч}}$  – коэффициент, учитывающий отчисления на социальное страхование,  $O_{\text{отч}} = 1,34$  [97].

Тарифная оплата труда зависит от трудоемкости работ и часовой тарифной ставки соответствующих разрядов персонала:

$$OT_{\text{тар}} = T_{\text{ем}} \cdot C_{\text{ч}}, \quad (5.15)$$

где  $T_{\text{ем}}$  – трудоемкость работ, необходимых для изготовления устройства, чел.-ч (в соответствии с данными, полученными в результате нормирования труда работников ремонтного звена,  $T_{\text{ем}} = 32$  чел.-ч);

$C_{\text{ч}}$  – часовая тарифная ставка рабочего 5-го разряда, руб. [152].

Общепроизводственные и общехозяйственные расходы определяем в процентах от основной зарплаты на изготовление обмолачивающего устройства [98]:

$$P_{\text{оп}} = Z_3 \cdot \Pi_{\text{оп}} / 100, \quad (5.16)$$

$$P_{\text{ох}} = Z_3 \cdot \Pi_{\text{ох}} / 100, \quad (5.17)$$

где  $\Pi_{\text{оп}}$  – процент общепроизводственных расходов (по данным предприятия,  $\Pi_{\text{оп}} = 10\%$ );

$\Pi_{\text{ох}}$  – процент общехозяйственных расходов (по данным предприятия,  $\Pi_{\text{ох}} = 15\%$ ).

Эксплуатационные затраты в расчете на годовой объем льняной тресты, поступающей на обмолот, представляют собой прямые текущие затраты:

$$Z_{\text{э1}} = Z + A_1 + Z_{\text{р1}} + Z_{\text{эн}} + Z_{\text{пр1}}, \quad (5.18)$$

где  $Z$  – годовой фонд заработной платы, руб.;

$A_1$  – амортизационные отчисления на серийное очесывающее устройство, руб.;

$Z_{\text{р1}}$  – затраты на ремонт и техническое обслуживание серийного очесывающего устройства, руб.;

$Z_{\text{эн}}$  – годовые затраты на электроэнергию, руб.;

$Z_{\text{пр1}}$  – прочие затраты при использовании серийного очесывающего устройства, руб.

$$Z_{\text{э2}} = Z + A_2 + Z_{\text{р2}} + Z_{\text{эн}} + Z_{\text{пр2}}, \quad (5.19)$$

где  $A_2$  – амортизационные отчисления на предлагаемое обмолачивающее устройство, руб.;

$Z_{\text{р2}}$  – затраты на ремонт и техническое обслуживание предлагаемого обмолачивающего устройства, руб.;

$Z_{\text{пр2}}$  – прочие затраты при использовании предлагаемого обмолачивающего устройства, руб.

Годовой фонд заработной платы обслуживающего персонала

$$Z = T_{\text{год}} \cdot C_{\text{ч}} \cdot a_{\text{п}} \cdot O_{\text{доп}} \cdot O_{\text{отч}}, \quad (5.20)$$

где  $T_{\text{год}}$  – трудоемкость процесса обмолота (очеса) льняной тресты, чел.-ч;

$C_{\text{ч}}$  – часовая тарифная ставка рабочих 6-го разряда, руб. [152].

Амортизационные отчисления на серийное очесывающее устройство

$$A_1 = \frac{K_1 \cdot N_a}{100}, \quad (5.21)$$

где  $N_a$  – норматив годовых амортизационных отчислений по оборудованию.

Амортизационные отчисления на предлагаемое обмолочивающее устройство

$$A_2 = \frac{K_2 \cdot N_a}{100}. \quad (5.22)$$

$$N_a = \frac{100}{B}, \quad (5.23)$$

где  $B$  – нормативный срок службы установки, лет. Для машин первичной переработки льна (шифры в соответствии с классификацией основных средств согласно приложению к постановлению Министерства экономики Республики Беларусь от 30 сентября 2011 г. № 161-45706) нормативный срок службы  $B = 15$  лет [101].

Затраты на ремонт и техническое обслуживание [161]

$$Z_p = K \cdot \frac{N_p}{100}, \quad (5.24)$$

где  $K$  – сумма капиталовложений, руб.;

$N_p$  – норматив годовых отчислений на ремонт и техническое обслуживание,  $N_p = 10$  %.

Затраты на потребленную электроэнергию

$$Z_{\text{эн}} = \frac{V_{\text{т}} \cdot N_{\text{дв}} \cdot \Pi_{\text{эл}}}{W_{\text{ЭК}}}, \quad (5.25)$$

где  $N_{\text{дв}}$  – мощность рассматриваемого оборудования, кВт · ч;

$C_{ЭЛ}$  – стоимость 1 кВт · ч электроэнергии, руб. (по данным предприятия, на 19.04.2025 г. стоимость 1 кВт · ч электроэнергии  $C_{ЭЛ} = 0,4$  руб.);

$W_{ЭК}$  – производительность обмолачивающего (очесывающего) устройства, т/ч.

Прочие затраты с учетом сложившегося их уровня в организации

$$Z_{пр} = 0,05 \cdot (Z + A + Z_p + Z_{эн}). \quad (5.26)$$

Согласно уравнению (5.1) произведен расчет годового экономического эффекта в зависимости от объема перерабатываемой льнотресты (рис. 5.10).

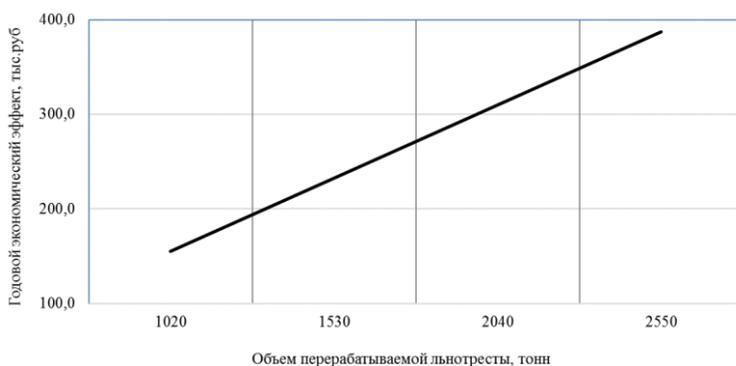


Рис. 5.10. График зависимости годового экономического эффекта от объема перерабатываемой льнотресты

Экономический эффект в расчете на 1 т переработанной льнотресты

$$\mathcal{E}_y = \frac{\mathcal{E}}{V_T}. \quad (5.27)$$

Срок окупаемости капитальных вложений

$$r = \frac{K_2}{\mathcal{E}}. \quad (5.28)$$

Результаты расчета экономической эффективности обмолачивающего устройства с эластичным рабочим органом представлены в табл. 5.4.

Таблица 5.4. Техничко-экономические показатели эффективности очесывающе-плющильного аппарата

Показатели	Обозначение	Устройство для отделения коробочек льна	
		серийное	предлагаемое
Сумма капиталовложений, руб.	К	22885,0	23668,07
Годовой объем льняной тресты, поступающей на обмолот, т	$V_T$	1530	
Эксплуатационные затраты, руб.	$Z_3$	16952,4	17089,5
В том числе:			
- амортизационные отчисления, руб.	А	1525,67	1577,87
- затраты на ремонт и техническое обслуживание, руб.	$Z_p$	2288,50	2367,0
- фонд заработной платы, руб.	З	9271	
- затраты на электроэнергию, руб.	$Z_{эл}$	3060	
- прочие затраты, руб.	$Z_{пр}$	807,3	813,8
Приведенные затраты на обработку 1 т льняной тресты, руб.	$Z_{пз}$	7,25	7,32
Годовой экономический эффект, руб.	Э	387067,8	
Экономический эффект в расчете на 1 т переработанной льнотресты, руб.	$Э_y$	151,79	
Срок окупаемости капитальных вложений, лет	$r$	0,06	

Результаты расчетов технико-экономических показателей, приведенные в табл. 5.4, показывают, что годовой экономический эффект от применения очесывающе-плющильного аппарата составляет 387067,8 руб., а экономический эффект в расчете на 1 т переработанной льнотресты – 151,79 руб. (в масштабе цен первого квартала 2025 года).

## Выводы

1. Установлены закономерности изменения степени обмолота, степени повреждения семян и стеблей и отхода стеблей в путанину от массы погонного метра подаваемой ленты льнотресты при различных значениях параметров процесса.

В результате производственных испытаний разработанного очесывающе-плющильного аппарата с эластичным рабочим органом в сравнении с серийным гребневым рабочим органом линии первичной переработки льна «Van Dommele» установлено: увеличение степени обмолота лент льнотресты с 0,820 до 0,988, снижение повреждения семян с 1,5 до 1 %, снижение повреждения стеблей, влияющего на выход длинного волокна, с 5 до 1,9 % и снижение отхода стеблей в путанину с 8 до 2 % [74, 75].

2. Разработана номограмма, которая позволяет в упрощенной форме определить технологические параметры и режимы работы обмолачивающего устройства исходя из качества подаваемой на обмолот ленты льнотресты и требуемой степени обмолота с учетом заданной производительности линии первичной переработки льна [71].

3. Расчетный годовой экономический эффект от внедрения очесывающе-плющильного аппарата составил 387067,8 руб., а экономический эффект в расчете на 1 т переработанной льнотресты – 151,79 руб. (в масштабе цен первого квартала 2025 года) [71].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Определены аналитические зависимости, позволяющие определить площадь и объем слоя ленты льнотресты, находящегося под периодическим воздействием эластичного рабочего органа в зоне обмола, исходя из ширины бича, длины стеблей и толщины ленты. Получены уравнения, позволяющие определить значения деформаций и механического напряжения в различных точках оболочки семенной коробочки льна в зависимости от диаметра семенной коробочки льна и величины поперечной деформации. Получена математическая модель для определения минимального допустимого зазора между бичом и декой (0,005 м) исходя из размеров коробочек и семян льна и условия наименьшего повреждения семян [39, 57, 58, 60, 61, 62].

2. Установлены зависимости, позволяющие определить геометрические параметры треугольной формы зуба бича, исходя из уплотняющей и проникающей его способности. Установлены рациональные интервалы параметров зубчатой рабочей кромки бича: угла при вершине зуба – 5–40°, высоты зуба – 0,0096–0,05 м. Получены параметрические уравнения, позволяющие связать конструктивные параметры исследуемого обмолачивающего устройства с кинематическими параметрами движения его основных звеньев. Получена зависимость для определения скорости ленты льнотресты с учетом допустимого относительного удлинения участка стеблей, расположенного в «мертвой» зоне, а также времени от момента начала воздействия бича на стебли до возможного их обрыва. Получены уравнения, позволяющие определить параметры взаимного расположения рабочих органов разработанного обмолачивающего устройства с учетом конструктивных параметров кривошипно-шатунного механизма с коромыслом [59, 61, 62, 104, 105, 145].

3. Установлены закономерности изменения угла отгиба стеблей льна и предельной величины смещения ленты за время с момента начала воздействия бича на стебли до возможного их обрыва в зависимости от диаметра стеблей. Установлены зависимости механического напряжения, возникающего в семенной коробочке, от степени сжатия ее. Расчетные значения модуля Юнга для семенных коробочек диаметром 0,0056–0,0078 м составляют 0,28–0,55 МПа. Установлены предельные значения поперечной деформации семенной коробочки (0,0006–0,0022 м), определяющие момент ее разрушения [39, 59, 62].

4. Получена математическая модель, описывающая процесс обмо-

лота лент льнотресты очесывающе-плющильным аппаратом, которая позволяет определить значения факторов, обеспечивающих наибольшую степень обмолота ( $E_{об} = 0,995$ ): скорости подачи ленты льнотресты – 1,25 м/с; зазора между бичом и декой – 0,01 м; частоты вращения рабочего органа –  $3,09 \text{ с}^{-1}$  [61, 62, 65, 76].

5. Производственными испытаниями подтверждена эффективность разработанного очесывающе-плющильного аппарата с эластичным рабочим органом в сравнении с серийным гребневым рабочим органом линии первичной переработки льна «Van Dommele». Установлено: увеличение степени обмолота лент льнотресты с 0,820 до 0,988, снижение повреждения семян с 1,5 до 1 %, повреждения стеблей, влияющего на выход длинного волокна, с 5 до 1,9 % и отхода стеблей в путанину с 8 до 2 %. Расчетный годовой экономический эффект от внедрения очесывающе-плющильного аппарата составил 387067,8 руб. (151,79 руб/т) [61, 71, 74, 75].

6. Полученные теоретические и экспериментальные результаты могут быть использованы при разработке машин и оборудования для отделения семян от стеблей льна.

Результаты исследований рассмотрены конструкторским бюро ОАО «Калинковичский ремонтно-механический завод» и приняты к использованию при разработке новой техники, предназначенной для отделения семян от стеблей льна.

Результаты исследований рассмотрены и одобрены научно-техническим советом Центра научно-технических разработок ОАО «Управляющая компания холдинга «Бобруйскагроماش» и приняты к использованию при проектировании новых машин для уборки и первичной переработки льна.

Полученные материалы используются в учреждении образования «Белорусская государственная орден Отябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия» на кафедре сельскохозяйственных машин (акт о внедрении № 735 от 5 января 2021 г.), на кафедре технологии и организации механизированных работ в растениеводстве (акт о внедрении № 207 от 23 мая 2017 г.) при изучении современных технологий и машин для уборки и первичной переработки льна.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авторское свидетельство SU № 852228, кл. А 01 D 45/06. Очесывающий аппарат : опубл. 08.05.1980 / И. Ф. Дворниченко [и др.] – 3 с.
2. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 279 с.
3. Азовцев, Н. Г. Машины для возделывания и уборки льна : учеб. пособие / Н. Г. Азовцев. – 3-е изд. – М. : Высш. шк., 1984. – 167 с.
4. Алексеенко, А. С. Досушивание льновороха на двухъярусной карусельной сушилке с рыхляще-перемешивающим устройством : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Алексеенко Александр Сергеевич. – Горки, 2008. – 215 с.
5. Алешкин, В. Р. Механизация животноводства / В. Р. Алешкин, П. М. Рощин ; под ред. С. В. Мельникова. – М. : Агропромиздат, 1985. – 336 с.
6. Анализ взаимодействия передней поверхности бича роторно-бильного обмолачивающего аппарата с лентой льна / М. В. Цайц, В. А. Левчук, С. В. Курзенков [и др.] // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2024. – № 4. – С. 63–68.
7. Анализ и классификация способов и средств для отделения семенной части от стеблей льна / А. В. Шик, Д. Ю. Босак, В. А. Левчук, М. В. Цайц // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. – Горки : Белорус. гос. с.-х. акад., 2024. – С. 174–176.
8. Анализ исследований физико-механических и технологических характеристик стеблей и лент льна / А. В. Чайчиц, В. А. Левчук, М. В. Цайц, А. В. Шик // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. – Горки : Белорус. гос. с.-х. акад., 2024. – С. 162–167.
9. Анализ механизированных технологий уборки и первичной переработки льна / В. А. Шаршунов, А. С. Алексеенко, М. В. Цайц, В. А. Левчук // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 2. – С. 137–141.
10. Анализ теоретических и экспериментальных исследований устройств для отделения семенной части от стеблей льна / М. В. Цайц, В. А. Левчук, С. В. Курзенков [и др.] // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. – Горки : Белорус. гос. с.-х. акад., 2024. – С. 156–161.
11. Анализ устройств для отделения семян льна от стеблей / В. А. Шаршунов, А. С. Алексеенко, М. В. Цайц, В. А. Левчук // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 4. – С. 174–180.
12. Андроник, Е. Л. Отбор индивидуальных высокопродуктивных растений льна масличного в гибридной популяции F<sub>2</sub> / Е. Л. Андроник, Е. В. Иванова // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 4. – С. 114–117.
13. Баранов, И. В. Комплексная механизация возделывания и уборки льна-долгунца / И. В. Баранов. – Л. : Колос, 1972. – 74 с.
14. Бочаров, П. П. Теория вероятностей. Математическая статистика : учеб. пособие / П. П. Бочаров. – М. : Гардарика, 1998. – 328 с.
15. Быков, Н. Н. Исследование технологического процесса и устройств для зажима стеблей в льноуборочных комбайнах : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Быков Николай Нилович. – Торжок, 1969. – 163 с.
16. Быков, Н. Н. Справочник механизатора-льновода / Н. Н. Быков, В. М. Луценко, В. И. Смирнов. – М. : Россельхозиздат, 1981. – 240 с.
17. Веденяпин, Г. В. Общая методика экспериментальных исследований и обработка опытных данных / Г. В. Веденяпин. – М. : Колос, 1967. – 159 с.
18. Воднев, В. Т. Основные математические формулы : справочник / В. Т. Воднев,

- Н. Ф. Наумович, А. Ф. Наумович ; ред. Ю. С. Богданов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Минск : Выш. шк., 1995. – 380 с.
19. Вольф, В. Г. Статистическая обработка опытных данных / В. Г. Вольф. – М. : Колос, 1966. – 255 с.
20. Выбор и обоснование технологии переработки льновороха / В. А. Шаршунов, В. Е. Круглень, В. И. Коцуба [и др.] // *Ekologiczne aspekty mechanizacji produkcji roslinnej* : 9 International simpozium. – Warszawa, 2002. – С. 361–368.
21. Галимов, Э. Р. Современные конструкционные материалы для машиностроения : учеб. пособие / Э. Р. Галимов, А. Л. Абдуллин. – 2-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2019. – 268 с.
22. Галкин, А. В. Повышение эффективности льноуборочного комбайна путем совершенствования гребневого очесывающе-транспортирующего аппарата : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Галкин Алексей Васильевич. – Тверь, 2007. – 239 с.
23. Галкин, А. Д. Ресурсосберегающая технология послепоборочной обработки семян / А. Д. Галкин, В. Д. Галкин // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. – 2003. – № 3. – С. 15–17.
24. Гейдель, В. Э. Современные технологии и машины для уборки льна : рекомендации / В. Э. Гейдель, В. Р. Петровец, Н. В. Чайчиц. – Горки : БГСХА, 2008. – 29 с.
25. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – М. : Высш. шк., 1972. – 358 с.
26. Голуб, И. А. Перспективы возделывания и переработки льна-долгунца в Республике Беларусь / И. А. Голуб // *Вестці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук*. – 2017. – № 3. – С. 91–98.
27. Горя, В. С. Алгоритмы математической обработки результатов исследований / В. С. Горя. – Кишинев : Штиница, 1978. – 117 с.
28. Горячкин, В. П. Собрание сочинений : в 3 т. / В. П. Горячкин. – М. : Колос, 1965. – Т. 3. – 384 с.
29. Гурвич, Л. Ю. Исследование и обоснование основных параметров очесывающе-транспортирующего устройства льноуборочного комбайна : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Гурвич Лев Юрьевич. – М. : ВИСХОМ, 1967. – 198 с.
30. Гусаров, В. В. Молотильно-сепарирующее устройство с дифференцированным подбарабаньем для интенсификации обмолота и сепарации зерна : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Гусаров Владимир Владимирович. – Горки, 2016. – 212 с.
31. Гусаров, В. В. Результаты экспериментальных исследований процесса обмолота бильным молотильным аппаратом с дифференцированным подбарабаньем / В. В. Гусаров, С. В. Курзенков // *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2015. – № 3. – С. 175–181.
32. Домброу, Б. А. Полиуретаны / Б. А. Домброу. – М. : Госхимиздат, 1961. – 151 с.
33. Еругин, А. Ф. Обоснование процессов, средств вымолота и очистки семян льна в селекции и семеноводстве : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / Еругин Александр Федорович. – Торжок, 1990. – 235 с.
34. Зедгеиндзе, И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И. Г. Зедгеиндзе. – М. : Наука, 1976. – 390 с.
35. Зинцов, А. Н. Повышение эффективности подборщика-очесывателя путем ориентирования ленты льнотресты перед очесывающим аппаратом : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Зинцов Александр Николаевич. – Кострома, 1996. – 208 с.
36. Зинцов, А. Н. Обоснование и разработка процессов и машин для раздельной уборки льна-долгунца : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / Зинцов Александр Николаевич. – Кострома, 2007. – 347 с.
37. Исследование качества обмолота льнотресты в линии первичной переработки льна / В. Е. Круглень, В. А. Левчук, М. В. Цайц, М. М. Мазаловский // *Вестник Брянской*

государственной сельскохозяйственной академии. – 2014. – № 3. – С. 69–72.

38. Исследование обмолачивающего устройства в линии первичной переработки льна / В. А. Шаршунов, В. Е. Кругленья, А. С. Алексеенко, В. А. Левчук, М. В. Цайц // Вестні Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2015. – № 3. – С. 112–117.

39. Исследование характера деформации и разрушения семенной коробочки льна / В. А. Шаршунов, С. В. Курзенков, В. А. Левчук, М. В. Цайц // Вестник Барановичского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2022. – № 1 (11). – С. 96–105.

40. Казакевич, П. П. Лен-долгунец: современные машинные технологии уборки и организации работ / П. П. Казакевич, В. Н. Перевозников, П. В. Хорт // Актуальные проблемы механизации сельскохозяйственного производства : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Горки, 12–14 окт. 2001 г. : в 2 ч. / Белорус. гос. с.-х. акад. ; редкол.: В. А. Шаршунов (отв. ред.) [и др.]. – Горки, 2001. – Ч. 2. – С. 81–86.

41. Казакевич, П. П. Льноводство и льнопереработка в Беларуси: проблемы развития / П. П. Казакевич // Белорусское сельское хозяйство. – 2010. – № 7. – С. 4–11.

42. Керча, Ю. Ю. Физическая химия полиуретанов / Ю. Ю. Керча. – Киев : Наук. думка, 1977. – 224 с.

43. Кленин, Н. И. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины / Н. И. Кленин, В. А. Сакун. – М. : Колос, 1980. – 671 с.

44. Ковалев, М. М. Технологии и машины для комбинированной уборки льна долгунца : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / Ковалев Михаил Михайлович. – Тверь, 2010. – 615 с.

45. Комаров, В. В. Повышение эффективности процесса отделения семян от стеблей льна путем применения вальцово-гребневого аппарата : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Комаров Владимир Витальевич. – Кострома, 2005. – 23 с.

46. Комаров, В. В. Повышение эффективности процесса отделения семян от стеблей льна путем применения вальцово-гребневого аппарата : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Комаров Владимир Витальевич. – Кострома, 2005. – 140 с.

47. Комплексная механизация возделывания и уборки льна / А. В. Писарчик, В. А. Бакунович, А. И. Тарасевич [и др.]. – Минск : Ураджай, 1983. – 127 с.

48. Корн, Г. А. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. А. Корн, Т. М. Корн ; под общ. ред. И. Г. Арамановича. – М. : Наука, 1984. – 831 с.

49. Коцуба, В. И. Очистка семян льна молотилкой-сепаратором с подпружиненными инерционными качающимися решетками : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Коцуба Виктор Иосифович. – Горки, 2012. – 215 с.

50. Кругленья, В. Е. Определение энергии удара обмолачивающего устройства бильного типа в линии переработки льна / В. Е. Кругленья, В. А. Левчук // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. – 2013. – № 1 (12). – С. 84–88.

51. Кругленья, В. Е. Применение эластичного рабочего органа для отделения коробочки льна / В. Е. Кругленья, М. В. Левкин, В. А. Левчук // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 60-летию Белорус. гос. аграр. техн. ун-та и памяти первого ректора БИМСХ (БГАТУ), д-ра техн. наук, проф. В. П. Суслова, Минск, 4–6 июня 2014 г. : в 2 ч. / под общ. ред. И. Н. Шило, Н. А. Лабушева. – Минск : БГАТУ, 2014. – Ч. 2. – С. 56–61.

52. Кругленья, В. Е. Устройства для отделения семенных коробочек от стеблей – очесывающие аппараты / В. Е. Кругленья, В. А. Левчук, М. В. Цайц // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. – 2015. – № 1 (14). – С. 168–178.

53. Кудрявцев, А. Н. Повышение эффективности обмолаа льновороха эластич-

ными вальцами молотилки : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Кудрявцев Александр Николаевич. – Горки, 2001. – 182 с.

54. Кудрявцев, А. Н. Ресурсосберегающая технология послеуборочной переработки льновороха / А. Н. Кудрявцев, А. С. Алексеев, В. И. Коцуба // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. – 2014. – № 3. – С. 47–49.

55. Кузнецова, Т. М. Развитие рынка полиуретана – перспективное направление повышения эффективности российской нефтехимии. Ч. 1 / Т. М. Кузнецова // Нефтехимический комплекс России. Ежемесячный бюллетень. – 2008. – № 5. – С. 23–28.

56. Кузьминский, А. С. Физико-механические основы получения, переработки и применения эластомеров / А. С. Кузьминский. – М. : Химия, 1976. – 368 с.

57. Курзенков, С. В. Методика расчета параметров слоя стеблей льна в зоне обмола / С. В. Курзенков, В. А. Левчук, М. В. Цайц // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 1. – С. 154–159.

58. Курзенков, С. В. Моделирование деформации формы коробочки льна при ее сжатии между бичом и декой в процессе обмола / С. В. Курзенков, В. А. Левчук, М. В. Цайц // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 1. – С. 142–147.

59. Курзенков, С. В. Обоснование скорости зажимного транспортера обмолачивающего устройства линии первичной переработки льна / С. В. Курзенков, В. А. Левчук, М. В. Цайц // Агропанорама. – 2022. – № 1 (149). – С. 14–19.

60. Курзенков, С. В. Теоретическое обоснование молотильного зазора обмолачивающего устройства линии первичной переработки льна / С. В. Курзенков, В. А. Левчук, М. В. Цайц // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 2. – С. 160–164.

61. Левчук, В. А. Обмолот лент льнотресты в линии первичной переработки очесывающе-плющильным аппаратом : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Левчук Виталий Анатольевич. – Горки, 2023. – 26 с.

62. Левчук, В. А. Обмолот лент льнотресты в линии первичной переработки очесывающе-плющильным аппаратом : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Левчук Виталий Анатольевич. – Горки, 2023. – 236 с.

63. Левчук, В. А. Повышение эффективности отделения семенной части от стеблей льнотресты путем применения очесывающе-плющильного аппарата / В. А. Левчук, М. В. Цайц // Аграрное образование и наука для агропромышленного комплекса : материалы респ. науч.-практ. конф. Белорусская агропромышленная неделя БЕЛАГРО-2024, Горки, 5 июня 2024 г. – Горки: Белорус. гос. с.-х. акад., 2024. – С. 152–154.

64. Левчук, В. А. Выбор и обоснование основных технологических параметров обмолачивающего устройства в линии первичной переработки льна / В. А. Левчук, М. В. Цайц // Наука и молодежь: новые идеи и решения : материалы X междунар. науч.-практ. конф. молодых исследователей, Волгоград, 15–17 марта 2016 г. – Волгоград : Волгогр. ГАУ, 2016. – С. 289–292.

65. Левчук, В. А. Исследования процесса обмола лент льнотресты эластичным рабочим органом / В. А. Левчук, М. В. Цайц // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 1. – С. 161–166.

66. Левчук, В. А. Народнохозяйственное значение производства семян льна в Республике Беларусь / В. А. Левчук // Молодежь и инновации – 2013 : материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Горки, 29–31 мая 2013 г. : в 4 ч. / Белорус. гос. с.-х. акад. ; редкол.: А. П. Курдеко [и др.]. – Горки, 2013. – Ч. 2. – С. 253–256.

67. Левчук, В. А. Обзор и анализ технологий уборки льна / В. А. Левчук // Молодежь и инновации – 2011 : материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых,

Горки, 25–28 мая 2011 г. : в 2 ч. / Беларус. гос. с.-х. акад. ; редкол.: А. П. Курдеко [и др.]. – Горки, 2011. – Ч. 2. – С. 80–83.

68. Левчук, В. А. Обмолотывающее устройство в линии первичной переработки льна фирмы «Van Dommele» / В. А. Левчук // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 17–18 нояб. 2011 г. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Беларус.-Рос. ун-т ; редкол.: И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2011. – С. 220.

69. Левчук, В. А. Обмолот семенных коробочек льна в линии первичной переработки / В. А. Левчук, М. В. Цайц // Научно-практические аспекты технологий возделывания и переработки масличных и эфиромасличных культур : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Рязань, 3–4 марта 2016 г. – Рязань : РГАТУ, 2016. – С. 130–137.

70. Левчук, В. А. Определение зоны обмолота аппарата бильного типа в линии первичной переработки льна / В. А. Левчук // Наука и молодежь: новые идеи и решения : материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых исследователей, посвящ. 70-летию Победы в Сталинградской битве, Волгоград, май 2013 г. – Волгоград : Волгогр. ГАУ, ИПК «Нива», 2013. – Ч. I. – С. 135–139.

71. Левчук, В. А. Определение технологических параметров обмолачивающего устройства и экономическая эффективность его применения в линии первичной переработки льна / В. А. Левчук // Агропанорама. – 2022. – № 2 (151). – С. 2–5.

72. Левчук, В. А. Повышение эффективности обмолота головок льна в линии переработки фирмы «Van Dommele» / В. А. Левчук // Научно-практические аспекты технологий возделывания и переработки масличных культур : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Рязань, 15–16 февр. 2013 г. : в 12 т. / под ред. Д. В. Виноградова. – Рязань : РГАТУ, 2013. – Т. 9. – С. 198–201.

73. Левчук, В. А. Разработка комбинированного очесывающего устройства льноуборочного комбайна / В. А. Левчук, М. В. Лёвкин // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы X Междунар. межвуз. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Гомель, 29–30 апр. 2010 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2010. – С. 40–42.

74. Левчук, В. А. Результаты исследования обмолачивающего устройства в линии первичной переработки льна / В. А. Левчук, М. В. Цайц // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Беларус.-Рос. ун-т ; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2016. – С. 23.

75. Левчук, В. А. Результаты производственных испытаний обмолачивающего устройства с эластичным рабочим органом в линии первичной переработки льна «Van Dommele» / В. А. Левчук, М. В. Цайц // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 1. – С. 172–177.

76. Левчук, В. А. Результаты экспериментальных исследований обмолачивающего устройства с эластичным рабочим органом в линии первичной переработки льна / В. А. Левчук, М. В. Цайц // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 1. – С. 149–155.

77. Левчук, В. А. Совершенствование процесса обмолота головок льна в линии первичной переработки фирмы «Van Dommele» / В. А. Левчук, В. Е. Кругленья // Знания молодых: наука, практика и инновации : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и соискателей, Киров, 5 апр. 2013 г. : в 2 ч. – Киров : Вятская ГСХА, 2013. – Ч. 2: Технические и экономические науки. – С. 31–33.

78. Леонов, А. Н. Основы научных исследований в примерах и задачах / А. Н. Леонов, М. М. Дечко, В. Б. Ловкис. – Минск : БГАТУ, 2010. – 136 с.
79. Летошнев, М. Н. Сельскохозяйственные машины. Теория, расчет, проектирование и испытания / М. Н. Летошнев. – М. – Л., 1955. – 764 с.
80. Липатов, Ю. С. Структура и свойства полиуретанов / Ю. С. Липатов, Ю. Ю. Керча, Л. М. Сергеева. – Киев : Наук. думка, 1970. – 280 с.
81. Лист стальной горячекатаный (r/к) 5×1500×6000 / Металлобаза ЧТУП «Аксвил». – URL: [https://aksvil.by/Optovaya-torgovlya/Chernyy\\_metal/Listy/List\\_g\\_k\\_goryachekatanuy/list\\_stalnoy\\_g\\_k\\_50.html](https://aksvil.by/Optovaya-torgovlya/Chernyy_metal/Listy/List_g_k_goryachekatanuy/list_stalnoy_g_k_50.html) (дата обращения: 19.01.2025).
82. Листопад, И. А. Планирование эксперимента в исследованиях по механизации сельскохозяйственного производства / И. А. Листопад. – М. : Агропромиздат, 1988. – 88 с.
83. Лукомская, А. И. Основы прогнозирования механического поведения каучуков и резин / А. И. Лукомская, В. Ф. Евстратов. – М. : Химия, 1975. – 360 с.
84. Льноводство: реалии и перспективы : сб. науч. материалов междунар. науч.-практ. конф., 25–27 июня 2008 г. / Ин-т льна. – Могилев : Могилев. обл. укрупн. тип., 2008. – 408 с.
85. Ляднов, Л. Г. Анализ процесса очесывания льняной соломки : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Ляднов Лев Георгиевич. – М. : ВИСХОМ, 1955. – 138 с.
86. Масленников, В. А. Совершенствование технологии с обоснованием параметров и режимов работы аппарата для отделения коробочек от стеблей льна : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Масленников Валерий Александрович. – Рязань, 1995. – 134 с.
87. Математическая физика. Энциклопедия / гл. ред. Л. Д. Фадеев. – М. : Большая рос. энцикл., 1998. – 691 с.
88. Махов, И. М. Исследование, создание и внедрение в производство машин для уборки льна, обмолота конопли и кенафа : докл., обобщ. работы, предст. на соиск. учен. ст. канд. техн. наук (по совокупности) / И. М. Махов. – М., 1967. – 61 с.
89. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследовании сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рощин. – Л. : Колос, 1980. – 168 с.
90. Методика выбора и оптимизации контролируемых параметров технологических процессов : метод. указания, РДМУ 109-77. – М. : Изд-во стандартов, 1978. – 64 с.
91. Методика определения экономической эффективности использования в сельском хозяйстве результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, новой техники, изобретений и рационализаторских предложений : учеб. пособие для вузов. – Киев : Урожай, 1986. – 118 с.
92. Методика экономической оценки сельскохозяйственной техники : учеб. пособие для вузов / Н. С. Власов, Ю. А. Конкин, Г. Г. Косачев [и др.] ; под общ. ред. Н. С. Власова. – М. : Колос, 1979. – 399 с.
93. Можаров, Б. П. Исследование, обоснование и разработка аппаратов для обмолота льна-долгунца : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Можаров Борис Петрович. – М. : ВИСХОМ, 1968. – 128 с.
94. Мозгунов, В. Г. Повышение производительности очесывающего устройства льнокомбайна / В. Г. Мозгунов // Повышение производительности и качества работы сельскохозяйственных машин в условиях Нечерноземной зоны РСФСР : тр. ВСХИЗО. – М. : ВСХИЗО, 1986. – 176 с.
95. Надежность в технике. Система сбора и обработки информации. Планирование наблюдений : ГОСТ 27502–83. – Взамен ГОСТ 17510–79 ; введ. 01.07.84. – М. : Изд-во стандартов, 1984. – 23 с.

96. Налимов, В. В. Статические методы планирования экстремальных экспериментов / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М. : Наука, 1965. – 340 с.
97. Налоговый кодекс Республики Беларусь (особенная часть): 29 дек. 2009 г. № 71-3 : принят Палатой представителей 11 дек. 2009 г. : одобрен Советом Респ. 18 дек. 2009 г. // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 19.01.2025).
98. Новиков, А. И. Эконометрика : учеб. пособие для вузов / А. И. Новиков. – 2-е изд. – М. : ИНФРА-М, 2007. – 144 с.
99. О внесении дополнения в Трудовой кодекс Республики Беларусь : Закон Респ. Беларусь от 29 июня 2006 г. № 138-3 // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 19.01.2025).
100. О внесении изменений в постановление Министерства труда Республики Беларусь от 21 января 2000 г. № 6 : постановление М-ва труда и соц. защиты Респ. Беларусь от 26 сент. 2003 г. № 108. – URL: <http://www.pravo.by.info/tema/mintruda/page20.htm> (дата обращения: 19.01.2025).
101. Об установлении нормативных сроков службы основных средств и признании утратившими силу некоторых постановлений Министерства экономики Республики Беларусь : постановление М-ва экономики Респ. Беларусь от 30 сент. 2011 г. № 161 : с изм. и доп. // ЭТАЛОН : информ.-поисковая система (дата обращения: 19.01.2025).
102. Обзор и анализ механизированных технологий уборки и переработки льна / В. А. Левчук, М. В. Цайц, А. В. Шик, Д. Ю. Босак // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. – Горки : Белорус. гос. с.-х. акад., 2024. – С. 137–140.
103. Обоснование конструкционных параметров бичей роторно-бильного обмолачивающего аппарата / В. А. Шаршунов, М. В. Цайц, В. А. Левчук [и др.] // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2024. – № 2. – С. 147–153.
104. Обоснование параметров установки зажимного транспортера и деки обмолачивающего устройства линии первичной переработки / В. А. Шаршунов, С. В. Курзенков, В. А. Левчук, М. В. Цайц // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 2. – С. 170–175.
105. Обоснование параметров эластичного бича обмолачивающего устройства линии первичной переработки / В. А. Шаршунов, С. В. Курзенков, В. А. Левчук, М. В. Цайц // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 2. – С. 153–159.
106. Обоснование продольного угла наклона боковой поверхности бича к плоскости диска роторно-бильного обмолачивающего аппарата / М. В. Цайц, В. А. Левчук, В. О. Коцуба [и др.] // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2024. – № 1. – С. 149–153.
107. Общетехнический справочник / Э. В. Анисимов, В. П. Законников, С. Н. Никифорова-Денисова [и др.] ; под ред. А. Н. Малова. – М. : Машиностроение, 1971. – 464 с.
108. Объедков, М. Г. Лен-долгунец / М. Г. Объедков. – М. : Россельхозиздат, 1979. – 223 с.
109. Основы расчета рабочих органов машин и оборудования для производства семян льна / В. А. Шаршунов, В. Е. Кругленя, А. Н. Кудрявцев [и др.]. – Горки : БГСХА, 2016. – 156 с.
110. Отраслевой регламент. Возделывание и уборка льна-долгунца. Типовые технологические процессы. – Минск : Ин-т систем. исслед. в АПК НАН Беларуси, 2019. – 12 с.
111. Панфилова, Л. И. Обоснование параметров конструкции и режима работы двухбарабанного очесывающего аппарата льномолотилки : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Панфилова Лидия Ивановна. – М. : ВИСХОМ, 1968. – 144 с.
112. Патент ВУ 10253, МПК В07В1/36. Импульсное очесывающее устройство :

№ U 2014.08.30 : заявлено 04.11.2013 : опубл. 02.06.2014 / В. Е. Кругленя, В. И. Коцуба, М. В. Цайц, Е. И. Кармишин, М. М. Мазаловский, В. А. Левчук, И. Л. Подшиваленко, А. Н. Кудрявцев. – 4 с.

113. Патент BY 7224, МПК A01F11/00. Устройство для отделения семенных коробочек от стеблей льна : № U 2011.04.30 : заявлено 06.07.2010 : опубл. 02.02.2011 / В. Е. Кругленя, М. В. Лёвкин, В. И. Коцуба, С. Н. Крепочин, В. А. Левчук. – 3 с.

114. Патент BY 8183, МПК A01D45/06. Устройство для выделения семян из ленты льнотресты : № U 2012.04.30 : заявлено 29.09.2011 : опубл. 30.04.2012 / В. Е. Кругленя, М. В. Лёвкин, В. А. Левчук. – 2 с.

115. Патент BY 8332, МПК A01F11/02. Обмолачивающее устройство ленты льнотресты : № U 2012.06.30 : заявлено 29.09.2011 : опубл. 30.06.2012 / В. Е. Кругленя, М. В. Лёвкин, В. А. Левчук. – 2 с.

116. Патент BY 8493, МПК A01F11/02. Очесывающий аппарат льноуборочного комбайна : № U 2012.08.30 : заявлено 29.09.2011 : опубл. 04.08.2012 / В. Е. Кругленя, М. В. Лёвкин, В. А. Левчук. – 2 с.

117. Патент BY 8494, МПК A01F11/02. Устройство для обмолота коробочек льна : № U 2012.08.30 : заявлено 29.09.2011 : опубл. 04.08.2012 / В. Е. Кругленя, М. В. Лёвкин, В. А. Левчук. – 2 с.

118. Патент РФ № 2004954 кл. A01D45/06. Устройство для отделения семенных коробочек льна : опубл. 18.06.1993 / В. Т. Черников, В. Л. Снегирев, Г. Н. Ратов. – 2 с.

119. Перспективы развития и совершенствования процесса отделения семенной части от стеблей льна / В. А. Шаршунов, М. В. Цайц, В. А. Левчук [и др.] // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2024. – № 3. – С. 132–136.

120. Планирование и обработка результатов отсеивающего эксперимента обмолота льнотресты устройством с эластичным рабочим органом / В. А. Левчук, С. В. Курзенков, А. Н. Чайчиц, М. В. Цайц // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. – Горки : Белорус. гос. с.-х. акад., 2023. – С. 171–178.

121. Повышение эффективности уборки льна-долгунца методом обмолота семенных коробочек на стеблях / С. В. Курзенков, М. В. Цайц, В. А. Левчук, И. А. Савченко // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. – 2024. – № 1 (23). – С. 276–281.

122. Полиуретановые пластины / ООО «Кеапл». – URL: <https://keapl.deal.by/r47792740-poliuretananovye-plity.html> (дата обращения: 19.01.2025).

123. Понталев, О. В. Обработка смеси фуражного зерна и пудрета экспандером с активной матрицей : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Понталев Олег Владимирович. – Горки, 2007. – 231 с.

124. Порфирьев, С. Г. Исследование резервов повышения производительности льномолотильных агрегатов : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Порфирьев Сергей Григорьевич. – М. : ВИСХОМ, 1959. – 153 с.

125. Порфирьев, С. Г. Обоснование параметров очесывающего аппарата для льноуборочных машин / С. Г. Порфирьев // Комплексная механизация возделывания сельскохозяйственных культур : сб. науч. тр. – М. : ВСХИЗО, 1991. – С. 51–60.

126. Прибытков, П. Ф. Экспериментальные исследования процесса очеса льна у комбайна ЛК-7 : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Прибытков Павел Федорович. – Л., 1952. – 177 с.

127. Применение математических методов и ЭВМ. Планирование и обработка результатов эксперимента : учеб. пособие / А. Н. Останин, В. П. Тюленев, А. В. Романов [и др.] ; под общ. ред. А. Н. Основина. – Минск : Выш. шк., 1989. – 218 с.

128. Пугачев, А. Н. Влияние повышения производительности молотильного аппа-

рата на механические повреждения зерна пшеницы и ржи / А. Н. Пугачев // Тр. Челяб. ин-та механизации и электрификации сел. хоз-ва. – Челябинск, 1973. – Вып. 62. – С. 19–24.

129. Радченко, Г. Е. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий протекания процесса / Г. Е. Радченко. – Горки : БСХА, 1978. – 69 с.

130. Райлян, Г. А. Повышение эффективности раздельной уборки льна применением двухбарабанного обмолачивающего устройства с эластичными билами : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Райлян Геннадий Антонович. – Горки, 2006. – 176 с.

131. Райт, П. Полиуретановые эластомеры / П. Райт, А. Камминг ; пер. с англ. под ред. Н. П. Апухтиной. – Л. : Химия, 1973. – 304 с.

132. Расчет экономической эффективности разработанного обмолачивающего устройства в линии первичной переработки льна «Van Dommele» / А. С. Алексеев, Т. Л. Хроменкова, В. А. Левчук, М. В. Цайц // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2018. – № 2. – С. 186–191.

133. Результаты производственных испытаний и экономическая оценка применения роторного бильно-вычесывающего устройства на льноуборочном комбайне / В. А. Шаршунов, В. Н. Босак, М. В. Цайц [и др.] // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2023. – Т. 61, № 4. – С. 324–336. – DOI 10.29235/1817-7204-2023-61-4-324-336.

134. Родионов, Л. В. Способы и средства для очеса стеблей льна / Л. В. Родионов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1980. – № 11. – С. 22–23.

135. Родионов, Л. В. Сравнительный анализ очесывающих устройств поли- и мощелевого типа / Л. В. Родионов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1986. – № 5. – С. 31–33.

136. Руководство по освоению интенсивной технологии возделывания льна-долгунца. – Минск : Ураджай, 1987. – 127 с.

137. Русанов, А. И. Зависимость работы молотильно-сепарирующего устройства от диаметра барабана и длины подбарабья / А. И. Русанов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1971. – № 8. – С. 16–18.

138. Смирнов, Н. А. Результаты испытаний льнокомбайнов с измененными очесывающе-транспортирующими системами / Н. А. Смирнов // Испытание сельскохозяйственных машин : сб. науч. тр. / ВСХИЗО. – М., 1991. – С. 153–162.

139. Соловьев, А. Я. Льноводство / А. Я. Соловьев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Агропромиздат, 1989. – 320 с.

140. Степанова, Н. В. Белорусский лён и его значение в мировом производстве / Н. В. Степанова // Наше сельское хозяйство. – 2020. – № 11 (235). – С. 24–33.

141. Техника сельскохозяйственная. Комбайны и машины для уборки льна. Методы испытаний : ГОСТ 33734–2016. – Введ. 01.01.2018. – М. : Стандартинформ, 2017. – 73 с.

142. Технично-экономические аспекты применения роторно-бильного аппарата в льноуборочном комбайне / М. В. Цайц, В. А. Левчук, В. И. Коцуба [и др.] // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2023. – № 4. – С. 112–117.

143. Технологические нормативы переработки тресты и получения трёпаного длинного и короткого льноволокна на действующих и импортных льноперерабатывающих линиях // Ин-т льна. – URL: <http://surl.li/dlngw> (дата обращения: 19.01.2025).

144. Улахович, А. Е. Обмолот семенного вороха клевера вальцовым аппаратом с эластичными рабочими поверхностями : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Улахович Александр Егорович. – Горки, 1989. – 214 с.

145. Уравнения траектории движения рабочего органа обмолачивающего устройства колебательного типа линии первичной переработки льна «Van Dommele» / В. А. Шаршунов, А. С. Алексеев, С. В. Курзенков [и др.] // Вестник Белорусской государственной

ной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 4. – С. 164–168.

146. Хайлис, Г. А. Исследования сельскохозяйственной техники и обработка опытных данных / Г. А. Хайлис. – М. : Колос, 1994. – 169 с.

147. Хайлис, Г. А. Механика растительных материалов / Г. А. Хайлис. – Киев : УААН, 1994. – 332 с.

148. Хайлис, Г. А. Теория и расчет льноуборочных машин / Г. А. Хайлис // Тр. Великолуцкого сельхозинститута. – Елгава : Великолуцкий с.-х. ин-т, 1973. – Вып. XXVI. – 334 с.

149. Хамутовский, П. Р. Направления и результаты селекции льна-долгунца / П. Р. Хамутовский, Л. Н. Каргопольцев // Льноводство: реалии и перспективы : сб. материалов междунар. науч.-практ. конф., 25–27 июня 2008 г. / Нац. акад. наук Беларуси, Науч.-практ. центр НАН Беларуси по земледелию, Ин-т льна, Ин-т генетики и цитологии НАН Беларуси. – Могилев : Могилев. обл. укрупн. тип., 2008. – 408 с.

150. Цайц, М. В. Анализ состояния производства льна-долгунца в Республике Беларусь / М. В. Цайц, В. А. Левчук // Наука и молодёжь: новые идеи и решения : материалы X междунар. науч.-практ. конф. молодых исследователей, Волгоград, 15–17 марта 2016 г. – Волгоград : Волгогр. ГАУ, 2016. – С. 329–333.

151. Цайц, М. В. Определение усилия разрушения коробочек льна-долгунца / М. В. Цайц // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 4. – С. 93–99.

152. Часовая тарифная ставка рабочих // Национальный статистический комитет Республики Беларусь. – 2024. – URL: <http://belstat.gov.by/> (дата обращения: 19.01.2025).

153. Черников, В. Г. Направления развития механизации льноводства / В. Г. Черников // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2003. – № 1. – С. 43–45.

154. Черников, В. Г. Очищающие аппараты льноуборочных машин (теория, конструкция, расчет) : монография / В. Г. Черников. – М. : Изд-во ВИМ, 2004. – 240 с.

155. Чернышков, А. А. Обоснование схемы и основных параметров очищающего аппарата для отделения семенных коробочек льна : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Чернышков Алексей Алексеевич. – М. : ВИСХОМ, 1987. – 142 с.

156. Шайкова, Е. В. Математические методы принятия управленческих решений по реструктуризации сырьевых зон льняного подкомплекса / Е. В. Шайкова // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2016. – № 3. – С. 26–28.

157. Шаршунов, В. А. Поисквые эксперименты процесса обмолота лент льнотресты устройством с эластичным рабочим органом в линии первичной переработки / В. А. Шаршунов, В. А. Левчук, М. В. Цайц // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 1. – С. 148–153.

158. Шаршунов, В. А. Состояние льноводческой отрасли Республики Беларусь и пути повышения ее эффективности / В. А. Шаршунов, А. С. Алексеенко, М. В. Цайц // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2019. – № 2. – С. 267–271.

159. Шаршунов, В. А. Технология и оборудование для производства растительных масел и переработки их отходов : пособие / В. А. Шаршунов. – Минск : Мисанта, 2011. – 536 с.

160. Шлыков, М. И. Льноуборочные комбайны (теория, расчет, конструкция) / М. И. Шлыков. – М. : Машгиз, 1949. – 300 с.

161. Шпилько, А. В. Экономическая эффективность механизации сельскохозяйственного производства / А. В. Шпилько, В. И. Драганцев, Н. М. Морозов ; под ред. А. В. Шпилько. – М. : Высш. шк., 2001. – 346 с.

162. Шрамко, П. К. Изыскание способов снижения выхода путанины в работе очищающего аппарата в системе льнокомбайна ЛК-7 : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Шрамко Петр Климентьевич. – Л., 1955. – 167 с.

163. Экономика, механизация и первичная обработка льна : сб. науч. тр. / ВНИИ льна. – Минск, 1983. – Вып. 20. – 141 с.
164. Энциклопедия полимеров : в 3 т. / под ред. В. А. Кабанова. – М. : Сов. энцикл., 1977. – 3 т. – 1152 с.
165. Яворский, Б. М. Справочник по физике для инженеров и студентов ВУЗов / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – 4-е изд., перераб. – М. : Наука, 1968. – 940 с.
166. Яковлев, С. Н. Проектирование и основы технологии деталей машин из полиуретана / С. Н. Яковлев. – СПб.: Реноме, 2013. – 176 с.
167. Яковлев, С. Н. Выбор критериев работоспособности деталей машин из полиуретана : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.02 / Яковлев Станислав Николаевич. – СПб., 2015. – 220 с.
168. Bader, W. Der Einfluss der Beschickungsrichtung der Lage des Beschickungspunktes zur Trommel und der Schlagleistenanordnung auf den Dreschvorgang / W. Bader. – *Grundl. der Landtechnik*, – 1964. – Vol. 21, № 7. – P. 382–389.
169. Butler, I. L. Factors affecting the pelting of hay / I. L. Butler // *Agricultural Engineering*. – 1962. – Vol. 40, № 8. – P. 442–446.
170. Culver, E. G. Polyurethane elastomers – durable and versatile polymers. *Materials World*. – 1993. – № 6. – P. 225–22.
171. Datta, J. Glikoliza odpadów poliuretanowych / J. Datta, M. Ronh // *Polimery*. – 2007. – Vol. 52, № 7–8. – P. 579–582.
172. Datta, J. Influence of Glycols on the Glycolysis Process and the Structure and Properties of Polyurethane Elastomers / J. Datta // *Journal of Elastomers and Plastics*. – 2011. – № 43. – P. 529–541.
173. Gonella, L. B. Ultrasonic Devulcanization of Carbon Black Filled Polyurethane Rubber / L. B. Gonella // *Journal of Elastomers and Plastics*. – 2004. – № 36. – P. 213–239.
174. Govorcin Bajsic, E. Thermal Degradation of Polyurethane Elastomers: Determination of Kinetic Parameters / E. Govorcin Bajsic // *Journal of Elastomers and Plastics*. – 2003. – № 35. – P. 311–323.
175. Hoppe, H. G. Application for polyurethane elastomers / H. G. Hoppe // *Solid polyurethane materials. Engineer*. – 2003. – № 3. – P. 15–18.
176. Kugler, K. Einfluss des Trommeldurchmessers auf Dreschmoment and Leistungsbedarf der Dreschtrommel / K. Kugler // *Agrartechnik*. – 1977. – Vol. 27, № 6. – P. 241–248.
177. Limont, A. S. Morphological indices of fiber flax stalks and machines for its harvesting / A. S. Limont // *Europaische Fachhochschule*. – 2015. – № 1. – P. 79–84.
178. Maity, M. Polyblend Systems of Polyurethane Rubber and Silicone Rubber in the Presence of Silane Grafting Agent / M. Maity // *Journal of Elastomers and Plastics*. – 2001. – № 33. – P. 211–224.
179. Synthesis and Characterization of Polyurethane Elastomers / H. Zhang [et al.] // *Journal of Elastomers and Plastics*. – 2008. – № 40. – P. 161–177.
180. Thumer, W. Entwicklung von Elementen zur Korn-Stroh-Sortierung in einem Dreschwerk mit Hilfe von Methoden der mathematischen Modellierung / W. Thumer // *Agrartechnik*. – 1977. – Vol. 27, № 6. – P. 139–146.
181. Wressing, G. Stabilisierung der Bedingungen zur Beschickung von Abscheideeinrichtung, die der Drescheinrichtung nachgeordnet sind / G. Wressing // *Agrartechnik*. – 1977. – Vol. 27, № 6. – P. 312–320.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	5
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ .....	8
1.1. Состояние отрасли льноводства в Республике Беларусь и перспективы ее развития .....	8
1.2. Обзор и анализ технологий уборки и переработки льна .....	11
1.3. Обзор и анализ устройств для отделения семенной части от стеблей льна .....	14
1.4. Обоснование конструкции очесывающе-плющильного аппарата в линии первичной переработки льна .....	25
1.5. Выбор и обоснование материала эластичного рабочего органа .....	26
1.6. Обзор исследований морфологических и агробиологических свойств льна .....	30
1.7. Обзор и анализ исследований процесса отделения семенных коробочек от стеблей льна .....	33
Выводы .....	38
2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОЧЕСЫВАЮЩЕ- ПЛЮЩИЛЬНОГО АППАРАТА ЛИНИИ ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЛЬНА .....	40
2.1. Определение площади и объема зоны воздействия бича на обмолачиваемый материал .....	41
2.2. Моделирование деформации коробочки льна при ее сжатии между бичом и декой .....	48
2.3. Определение изменений координат точек поверхности семенной коробочки льна при ее сжатии .....	55
2.4. Обоснование молотильного зазора между бичом и декой .....	66
2.5. Обоснование формы рабочей кромки эластичного бича .....	70
2.6. Обоснование параметров эластичного рабочего органа .....	72
2.7. Определение уравнений траектории движения эластичного рабочего органа обмолачивающего устройства .....	78
2.8. Обоснование скорости зажимного транспортера обмолачивающего устройства .....	84
2.9. Обоснование параметров взаимного расположения рабочих органов обмолачивающего устройства .....	87
Выводы .....	95
3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	97
3.1. Программа исследований .....	97
3.2. Определение параметров ленты льнотресты в линии первичной переработки .....	98
3.3. Методика определения деформации семенной коробочки льна .....	100
3.4. Методика определения угла отгиба и относительного удлинения стеблей льнотресты при обрыве .....	102
3.5. Обоснование выбора параметра оптимизации, основных влияющих на него факторов и интервалов их варьирования .....	105
3.6. Методика проведения лабораторных исследований .....	108
3.7. Методика проведения производственных испытаний очесывающе-плющильного аппарата .....	114
Выводы .....	118
4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	119

4.1. Определение параметров ленты льнотресты, поступающей на обмолот в линии первичной переработки.....	119
4.2. Определение деформаций семенных коробочек льна.....	119
4.3. Определение угла отгиба и относительного удлинения стеблей при обрыве.....	121
4.4. Определение высоты зуба рабочей кромки бича.....	127
4.5. Результаты поисковых исследований.....	128
4.6. Оптимизация процесса обмолота коробочек льна очесывающе-площильным аппаратом.....	135
4.6.1. Выбор параметра оптимизации и уровней варьирования факторов при проведении отсеивающих экспериментов.....	136
4.6.2. Оценка существенности факторов при проведении отсеивающих экспериментов.....	137
4.6.3. Движение в область оптимума.....	142
4.6.4. Описание области оптимума.....	146
4.6.5. Анализ математической модели процесса.....	152
Выводы.....	155
5. РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ.....	157
5.1. Результаты производственных испытаний очесывающе-площильного аппарата.....	157
5.2. Методика выбора параметров и режимов работы очесывающе-площильного аппарата.....	164
5.3. Реализация результатов исследований.....	166
5.4. Расчет экономической эффективности применения очесывающе-площильного аппарата в линии первичной переработки льна «Van Dommele».....	167
Выводы.....	177
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	178
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	180