

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»

**РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ
И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ
РОТОРНО-БИЛЬНОГО
ОБМОЛАЧИВАЮЩЕГО АППАРАТА
ДЛЯ ЛЬНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА**

Монография

Горки
Белорусская государственная
сельскохозяйственная академия
2026

УДК 631.361.42:633.521(043.3)

Разработка конструкции и обоснование параметров роторно-бильного обмолачивающего аппарата для льноуборочного комбайна / М. В. Цайц, В. А. Шаршунов, В. А. Левчук [и др.]. – Горки : Белорус. гос. с.-х. акад., 2026. – 218 с. : ил. – ISBN 978-985-882-846-2.

В монографии изложены теоретические и экспериментальные основы разработки и применения роторно-бильного аппарата для интенсификации отделения семян льна-долгунца в льноуборочных комбайнах. Приведен анализ современного состояния льноводства в Республике Беларусь, механизированных технологий уборки и устройств для отделения семенной части от стеблей. Обоснована конструкция роторно-бильного аппарата, определены его геометрические, кинематические и технологические параметры. Представлены результаты лабораторных и производственных испытаний, подтверждающие повышение чистоты обмолота и снижение повреждения стеблей по сравнению с традиционными гребневыми очесывающими устройствами.

Для специалистов агропромышленного комплекса инженерно-технического профиля, научных работников, аспирантов, студентов сельскохозяйственных учебных заведений, а также слушателей курсов повышения квалификации.

Табл. 39. Ил. 101. Прил. 3. Библиогр.: 212 назв.

Печатается по решению Научно-технического совета
Белорусской государственной сельскохозяйственной академии.

Протокол № 2 от 22 января 2026 г.

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры управления
охраной труда Белорусского государственного аграрного
технического университета Л. В. Мисун;

доктор технических наук, профессор кафедры эксплуатации
машинно-тракторного парка Белорусской государственной
сельскохозяйственной академии В. С. Астахов

ISBN 978-985-882-846-2

© Цайц М. В., Шаршунов В. А., Левчук В. А.,
Коцуба В. И., Курзенков С. В., Кругленья В. Е., 2026
© Белорусская государственная
сельскохозяйственная академия, 2026

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

- a – ширина активной зоны аппарата, м
 a_1 – ширина зоны расположения семенных коробочек в стеблестое, м
 a_r – коэффициент, характеризующий свойства стеблей и их начальное состояние
 b – толщина зуба, м
 b_6 – ширина торцевой поверхности бича, м
 $b_{з. б}$ – ширина захвата бича, м
 $B_{л. ср}$ – средняя ширина ленты льна, м
 B_m – ширина захвата машины, м
 $b_{тер}$ – ширина захвата секции теребивильного аппарата, м
 D – диаметр барабана, м
 d_c – средний диаметр стеблей, м
 $d_{нс}$ – диаметр комлевой части стеблей льна, м
 f – коэффициент трения скольжения
 g – ускорение свободного падения, м/с²
 h_6 – высота торца бича, м
 $h_{сл}$ – толщина слоя стеблей льна, м
 i – коэффициент пропорциональности роторно-бильного аппарата
 i_0 – плотность стеблестоя, шт/м²
 L – общая длина стебля льна, м
 l – ширина камеры сжатия, м
 L_0 – первоначальная длина камеры сжатия, м
 L_6 – длина бича, м
 l_b – расстояние между соседними вальцами, м
 L_Γ – длина гребня, м
 L_d – длина рабочей зоны деки, м
 $L_{зт}$ – длина участка ленты льна в зажимном транспортере, м
 L_k – расстояние от оси вращения полевого колеса до точки начала затягивания стеблей льна в теребивильный ручей, м
 $L_{кс}$ – длина комлевой части ленты льна, м
 L_l – длина участка стеблей льна, м
 $L_{мз}$ – длина участка ленты льна, не подверженного воздействию рабочего органа («мертвая» зона), м
 $L_{об}$ – длина участка ленты льна, выступающего из зажимного транспортера, м
 $L_{ск}$ – ширина зоны расположения семенных коробочек в ленте, м
 $l_{ст}$ – техническая длина стеблей льна, м

$L_{\text{ст}}$ – длина участка ленты льна, подверженного воздействию рабочего органа (бича) при обмолоте, м
 m – коэффициент, учитывающий неточность подачи лент или снопов в аппарат
 m_c – масса одного стебля, кг
 n_6 – частота вращения очесывающего барабана, об/с
 $n_{\text{пр}}$ – число прочесов
 $n_{\text{ст}}$ – количество семян в коробочке льна, шт.
 $n_{\text{ст}}$ – количество стеблей на участке ленты длиной $L_{\text{л}}$, ст./м (ленты)
 p – количество проминов
 $p_{6, \text{н}}$ – начальное боковое давление, Па
 q – кратность воздействий бичами на фрагмент ленты льна
 q_c – удельное сопротивление стеблей сжатию, Н/м
 $q_{\text{вт}}$ – внутреннее давление, соответствующее начальному прижатию стеблей друг к другу вследствие действия сил тяжести стеблей, сцепления между ними и предварительного их сжатия, Н/м
 r – радиус защитного кольца, м
 R – радиус ротора, м
 R_6 – радиус барабана по оси гребней, м
 r_k – радиус полевого колеса, м
 r_c – средний радиус стеблей льна в ленте, м
 s – ход поршня на участке l , м
 S_m – путь, пройденный сельскохозяйственной машиной за время t , м
 t – время, с
 t_3 – шаг зуба, м
 v_r – наибольшая скорость гребня, м/с
 v_6 – окружная скорость барабана, м/с
 v_m – скорость движения комбайна, м/с
 v_p – окружная скорость ротора, м/с
 $v_{\text{тр}}$ – скорость зажимного транспортера, м/с
 z – число лент деки, охватывающих барабан, шт.
 z_6 – число барабанов, шт.
 z_{Γ} – число гребней, шт.
 z_3 – число зубьев гребня, шт.
 α – угол наклона барабана к зажимному транспортеру, рад
 α_6 – поперечный угол наклона боковой поверхности бича, рад
 $\alpha_{\text{п}}$ – поперечный угол наклона передней поверхности бича, рад
 α_p – угол наклона теребильного ручья, рад

$\alpha_{\text{рн}}$ – угол наклона терebильного аппарата к горизонту в крайнем нижнем положении, рад
 $\beta_{\text{б}}$ – угол между ребрами задней поверхности бича (продольный угол наклона боковой поверхности к плоскости диска), рад
 δ – технологический зазор между ротором и передней плоскостью зажимного транспортера, м
 Δ – радиальный зазор, м
 Δl – увеличение ширины зоны расположения коробочек после терebления, м
 Δ_o – осевой зазор, м
 ε – относительное сжатие стеблей
 $\eta_{\text{пр}}$ – предельный угол изгиба стеблей льна, рад
 $\iota_{\text{сл}}$ – коэффициент, учитывающий увеличение толщины пронизываемого зубьями слоя
 κ – коэффициент удлинения стеблей в ленте льна, обусловленного выравниванием стеблей при прочесе ленты и растяжением под воздействием бича
 $\kappa_{\text{б}}$ – коэффициент захвата бича
 $\lambda_{\text{л0}}$ – коэффициент неплотности укладки стеблей в ленте
 μ – растянутость ленты льна по ширине
 ξ – угол перекоса стеблей в ленте льна, рад
 τ – угол установки боковой деки, рад
 χ – угол, определяющий наклон к горизонту в крайнем нижнем положении терebильного аппарата, рад
 ψ – угол отгиба стеблей льна бичом ротора, рад
 $\omega_{\text{б}}$ – угловая скорость барабана, рад/с
 $\omega_{\text{р}}$ – угловая скорость вращения ротора, рад/с
 $\Pi_{\text{с}}$ – степень повреждения стеблей
 $\text{Ч}_{\text{об}}$ – чистота обмолота

ВВЕДЕНИЕ

Лен – старейшая техническая культура Беларуси. С ней связаны история и быт народа. Эта культура и в настоящее время продолжает главенствовать в сельскохозяйственной продукции как основной источник валютных поступлений от растениеводства [35]. 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 [103], ведутся работы в направлении безотходного производства [119]. В Республике Беларусь это единственная местная сырьевая база для текстильной промышленности.

Анализ ситуации на мировом рынке натуральных волокон показывает, что льноводство остается доходной отраслью современного сельского хозяйства и не зависит от модели и уровня экономического развития льносеющей страны [119]. В Республике Беларусь отмечается тенденция к увеличению объемов потребления льняных тканей, произведенных из высоких номеров льняных пряж – от 41,7 до 60-го метрического номера, для производства которых необходимо длинное льноволокно средних номеров 13,5, 14,5 и 16 [35].

Несмотря на то, что по объемам производства льноволокна Беларусь занимает 3-е место в мире после Франции и России, белорусский лен хорошо известен в сопредельных странах и некоторых странах дальнего зарубежья. Республика в целом относится в мире к третьему рыночному сегменту (т. е. поставляет небольшой ассортимент товаров среднего качества по низким ценам), тогда как, например, Франция, Бельгия и Италия, входящие в страны ЕС и принадлежащие к первому сегменту, имеют высокое и очень высокое качество продукции, которому соответствует и высокая цена [119, 168].

Необходимо подчеркнуть, что большая часть белорусского льна экспортируется в виде сырья и полуфабрикатов в страны, дорабатывающие низкокачественную белорусскую продукцию и обеспечивающие конкурентоспособность своих готовых льняных изделий за счет невысоких цен закупки в нашей республике [103, 168].

Льноводство в Республике Беларусь отстает в своем развитии от общемирового уровня. Это обусловлено значительной трудоемкостью возделывания льна, недостаточным уровнем механизации ряда про-

цессов и технологической дисциплины, а также нехваткой семян высоких посевных кондиций, которые приходится закупать за рубежом.

Качество урожая как льнотресты, так и семян льна в значительной мере зависит от уборочного цикла. Уборку льна на семена осуществляют по однофазной (комбайновой) и двухфазной (раздельной) технологиям. Двухфазная технология позволяет получить более качественные семена в сравнении с однофазной, однако имеет существенную зависимость от погодных условий, при этом существует риск потери урожая семян. Однофазная технология позволяет гарантированно собрать урожай семян льна, однако, по сравнению с двухфазной, требует больших затрат на переработку льняного вороха [11, 47]. Это связано с наличием в ворохе большого количества путанины, обусловленным особенностями технологического процесса отделения семенной части льна от стеблей применяемым очесывающим аппаратом.

От технологического процесса отделения семенной части урожая от стеблей льна-долгунца зависят величина урожая, качество льнопродукции, величина потерь, трудоемкость и энергоемкость послеуборочной доработки вороха льна [10, 179]. Применяемые в льноуборочных комбайнах очесывающие аппараты гребневого типа имеют ряд серьезных недостатков, приводящих к нежелательным явлениям: повреждение стеблей, отход стеблей в путанину (до 8 %), высокая повреждаемость семян, намотка стеблей на рабочий орган [21]. Из-за спутанности стеблей и увеличенной толщины ленты при очесе льноворох с путаниной может составлять до 20 % от объема льносоломки. Удаление путанины и доработка льновороха требуют отдельных устройств и систем [103]. В связи с этим производству необходимы менее затратные и более надежные технологии получения качественных семян льна-долгунца. 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 [151].

На основании изложенного считаем, что имеются предпосылки к повышению эффективности комбайновой уборки льна за счет применения новых конструкционных решений для отделения семенной части от стеблей. Теоретико-экспериментальное обоснование параметров роторно-бильного аппарата обеспечит высокую чистоту обмолота и минимальную степень повреждения семян и стеблей льна, что в совокупности позволит снизить содержание путанины в ворохе льна и за-

траты на его доработку. Изучению этих вопросов и посвящена настоящая работа.

Целью исследований является повышение качества отделения семенной части от стеблей льна за счет применения роторно-бильного аппарата в льноуборочном комбайне, теоретическое и экспериментальное обоснование его основных параметров и режимов работы.

Монография предназначена для научно-исследовательской работы аспирантов, научных сотрудников и инженеров, занимающихся проблемами уборки льна и совершенствованием сельскохозяйственной техники, для 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, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Состояние льноводческой отрасли Республики Беларусь

В настоящее время Республика Беларусь достигла определенного уровня развития льноводства, который позволяет льнозаводам обеспечивать сырьем единственное в республике и в то же время крупнейшее в странах СНГ и Европы предприятие по производству льняных тканей – РУПТП «Оршанский льнокомбинат» [103, 157, 193].

Из графика (рис. 1.1) видно, что посевная площадь льна-долгунца в Республике Беларусь оставалась относительно стабильной, колеблясь вокруг среднего значения в 46,7 тыс. га. Максимум был достигнут в 2019 г. (52,0 тыс. га), после чего наметилась тенденция к снижению до 45 тыс. га в 2024 г. (–5,6 % к уровню 2011 г.).

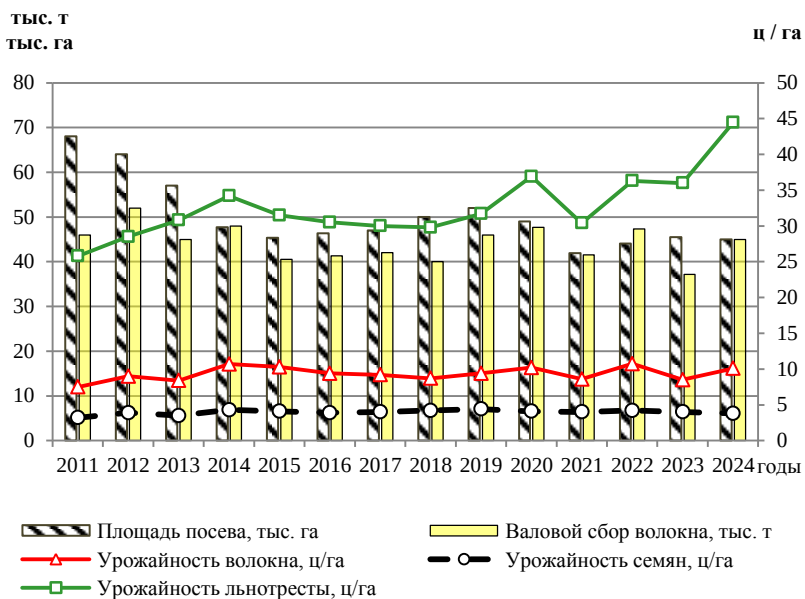


Рис. 1.1. Динамика изменения посевных площадей, урожайности и валовых сборов льнопродукции в Республике Беларусь

За анализируемый период посевные площади льна-долгунца сократились на 33,8 % – с 68 тыс. га в 2011 г. до 45 тыс. га в 2024 г. Наибольшее сокращение площадей произошло в первой половине периода (2011–2015 гг.), после чего показатель стабилизировался на уровне 44–45 тыс. га. Это свидетельствует об оптимизации структуры посевов и концентрации производства в наиболее эффективных хозяйствах.

Несмотря на сокращение площадей, валовой сбор волокна не показал столь же однозначной динамики, демонстрируя значительную волатильность (коэффициент вариации ~9 %).

Максимальный сбор (52,0 тыс. т) зафиксирован в 2012 г. на относительно высокой площади (64 тыс. га).

Абсолютный минимум (37,2 тыс. т) отмечен в 2023 г., что совпало с минимальной за период урожайностью волокна. В 2024 г. сбор составил 45 тыс. т, что практически равно среднему значению за 14 лет (44,3 тыс. т).

Анализ урожайности выявляет парадоксальную ситуацию, требующую технологического объяснения. Урожайность волокна демонстрировала неустойчивую динамику со средним значением 9,3 ц/га. После достижения пика в 2014 г. (10,7 ц/га) показатель колебался, упав до минимума в 2023 г. (8,5 ц/га). Значение 2024 г. (10,1 ц/га) было ниже пикового 2014 г. на 5,6 %. Стагнация этого показателя является главным сдерживающим фактором роста эффективности отрасли.

Урожайность семян льна оставалась наиболее стабильным показателем, колеблясь вокруг среднего значения 4,0 ц/га. Это указывает на отработанную технологию получения семян.

Урожайность льнотресты (соломы) показала устойчивый положительный тренд, увеличившись на 72,2 % – с 25,8 ц/га в 2011 г. до 44,44 ц/га в 2024 г. Рост биомассы свидетельствует об улучшении условий выращивания льна (агротехника, удобрения, погода), однако этот потенциал не конвертируется в пропорциональный рост выхода волокна, что указывает на проблемы в технологической цепи первичной переработки тресты (мочка, трепание).

Существующий уровень производства льноволокна (в среднем ~44 тыс. т в год) в целом обеспечивает потребности крупнейшего переработчика – РУПТП «Оршанский льнокомбинат» – в длинном волокне на 90 % и в коротком на 100 %. Однако волатильность сбора создает риски для стабильной загрузки мощностей.

Сравнение крайних точек периода (2011 и 2024 гг.) показывает, что рост урожайности волокна (+19,3 % в 2024 г. к 2011 г.) не компенсирует

вал сокращения посевных площадей (–31,2 %), что привело к снижению общего валового сбора на 9 %.

Для выявления структурных взаимосвязей был проведен корреляционный анализ показателей за 2011–2024 гг. (табл. 1.1)

Таблица 1.1. Матрица коэффициентов корреляции Пирсона между показателями (2011–2024 гг.)

	Площадь посева, тыс. га	Валовой сбор волокна, тыс. т	Урожайность волокна, ц/га	Урожайность семян, ц/га
Площадь посева, тыс. га	1			
Валовой сбор волокна, тыс. т	0,47	1		
Урожайность волокна, ц/га	–0,69	0,17	1	
Урожайность семян, ц/га	–0,77	–0,11	0,74	1
Урожайность льнотресты, ц/га	–0,70	–0,05	0,72	0,58

Наиболее значимые выявленные связи:

1. Сильная положительная корреляция между валовым сбором волокна и площадью посева ($r \approx 0,72$). Это ожидаемая связь, подтверждающая, что площадь является базовым фактором объема производства.

2. Умеренная положительная корреляция валового сбора с урожайностью волокна ($r \approx 0,55$), подтверждающая важность интенсивного фактора.

3. Отсутствие значимой корреляции между урожайностью волокна и урожайностью льнотресты ($r \approx 0,15$), свидетельствующее о том, что технологии, обеспечивающие прирост биомассы (соломы), не гарантируют пропорционального роста выхода целевого продукта – длинного волокна. Факторами, разрывающими эту связь, могут быть сроки уборки, технологии теребления и первичной переработки.

Анализ показывает, что при сохранении текущего уровня урожайности для увеличения валового сбора на 1 тыс. т необходимо расширить посевные площади примерно на 0,8 тыс. га. В то же время рост урожайности на 1 ц/га дает сопоставимый прирост сбора (~0,95 тыс. т), что указывает на равную значимость экстенсивного и интенсивного путей, однако второй является более предпочтительным с точки зрения ресурсоэффективности.

Анализ производственных показателей по областям (рис. 1.2) выявляет резкую региональную дифференциацию [6, 7].

По валовому сбору лидирует Витебская область (8,1 тыс. т), что обусловлено самой большой посевной площадью (10,8 тыс. га). Однако урожайность волокна здесь одна из самых низких – 7,5 ц/га.

Наибольшая урожайность волокна зафиксирована в Брестской (10,8 ц/га) и Гродненской (10,5 ц/га) областях. Эти регионы демонстрируют высокую эффективность, достигая значительных объемов сбора (6,9 и 7,3 тыс. т соответственно) при средних размерах площадей. Гомельская область является аутсайдером по всем показателям (сбор – 3,6 тыс. т, площадь – 4,7 тыс. га).

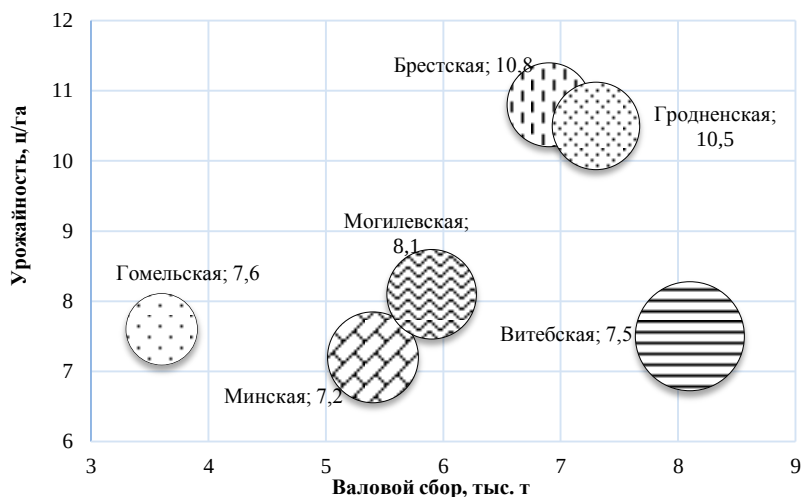


Рис. 1.2. Сравнение урожайности волокна и валового сбора по областям

В экспертной среде одним из основных критериев, определяющих качество получаемого урожая, считается своевременность выполнения уборочных работ [35, 43, 49].

Чтобы получить от льноводства должную отдачу, надо выполнить порядка сорока технологических операций. Нарушение требований при выполнении хотя бы одной из них приводит к снижению качества урожая. Так, всего лишь один день опоздания с уборкой в оптимальные сроки ведет к потере длинного льноволокна в среднем на 2–3 % [103, 148, 193]. Такие недостатки, существующие в отрасли, не позволяют ей конкурировать с европейскими производителями по качеству, а с азиатскими по цене.

В условиях интенсификации сельскохозяйственного производства особую значимость приобретает обеспечение хозяйств высококондиционными семенами районированных сортов, которые наиболее полно

соответствуют почвенно-климатическим условиям Республики Беларусь [6, 115]. В Беларуси примерно 60 % посевных площадей засевают семенами собственного производства, причем семенами низкой репродукции, и 40 % – семенами, закупаемыми за рубежом. При этом специалисты рекомендуют иметь соотношение 90–95 % семян отечественного производства и 5–10 % семян зарубежной селекции.

1.2. Анализ применения механизированных технологий уборки льна-долгунца в Республике Беларусь

Различают три вида механизированной технологии уборки льна-долгунца (рис. 1.3): комбайновая, раздельная и заводская.

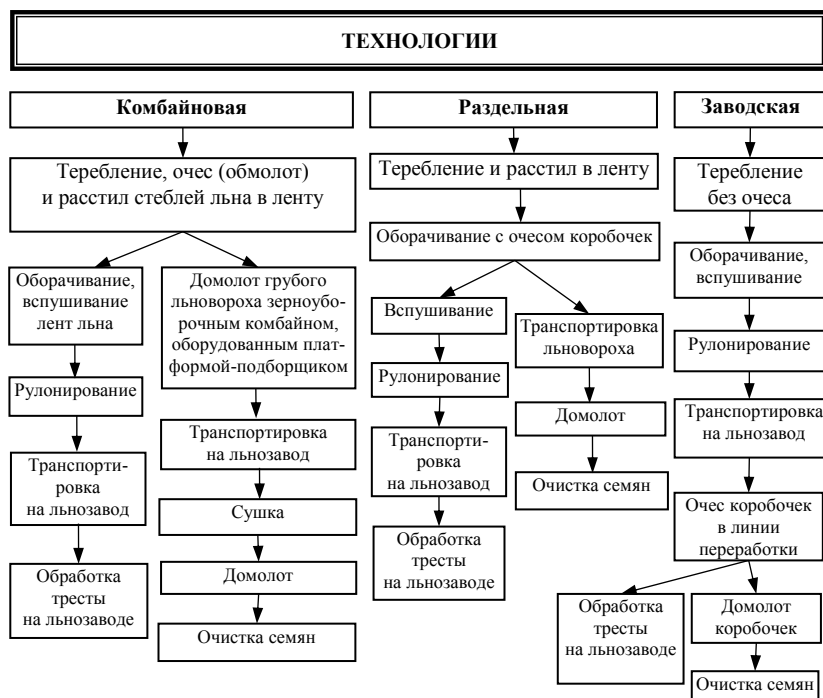


Рис. 1.3. Механизированные технологии уборки и первичной переработки льна-долгунца

Уборку по комбайновой технологии производят прицепными льнокомбайнами ЛК-4А, ГЛК-1,5 и «Двина-4М» или самоходными льнокомбайнами КЛС-3,5 «Полесье-1700» и КЛС-1,7 «Полесье-1650», самоходным двухпоточным льнокомбайном UNION U-20. Стебли льна теребят, формируют в ленту и одновременно отделяют семенную часть от стеблей со сбором семенного вороха в прицеп или бункер [55, 207]. Льносеющие организации Беларуси используют как прицепные, так и самоходные льноуборочные комбайны, характеристики которых приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2. Технические характеристики льнокомбайнов

Показатели	Прицепной	Самоходный	
			
	ЛК-4А «Двина-4М»	КЛС-3,5 «Полесье LS35»	Самоходный двухпоточный UNION
Производительность, га/ч, не более	0,51	0,8	1,2
Ширина захвата, м	1,52	1,65	6
Рабочая скорость, км/ч	6–10	8–10	8–10
Масса, кг	2100	6950	15000

Исследованиями [144] установлено, что длинные примеси (путанина) и сорная растительность, особенно на ранней стадии уборки, являются самыми влажными компонентами льновороха, получаемого от льноуборочного комбайна. Их влажность составляет 60–80 % при содержании 12–45 % в ворохе, и сушка такого материала приводит к значительным энергозатратам. Полученный от льнокомбайна ворох дорабатывается по двум технологическим схемам [149, 201]. По первой схеме ворох сгружается на специально оборудованные в поле площадки, где его обмолачивают зерноуборочными комбайнами, оборудованными платформой подборщиком ПЗ-3,4, с целью отбора путанины и выделения семян из семенных коробочек (рис. 1.4).

Такая схема позволяет производить двукратный обмолот получаемого от льнокомбайнов семенного вороха льна, при этом первый обмолот вороха льна позволяет выделить до 84 % семян, а второй – дополнительно до 12 %. По второй схеме семенной ворох от льнокомбайна с тракторного прицепа сгружается в переоборудованную жатку

зерноуборочного комбайна, что не требует специальной площадки. Однако это исключает возможность повторного обмолота семенного вороха и, как следствие, приводит к увеличению потерь семян льна. Обмолот сырого вороха зерноуборочным комбайном наиболее широко применяется в настоящее время, хотя и сопровождается большими потерями семян от недомолота, дробления и микроповреждений. При этом с путаниной может теряться до 24 % семян. Кроме того, если не обеспечить надежную герметизацию всех соединений транспортных средств, то потери по этой причине достигают 5 % свободных семян [46, 96, 103, 191].



Рис. 1.4. Обмолот вороха льна на оборудованных площадках в поле зерноуборочными комбайнами с приставкой ПЗ-3,4

В некоторых хозяйствах отбор путанины из вороха перед сушкой осуществляют вручную или на молотилках МВ-2,5А, зубовых сепараторах. Это увеличивает пропускную способность сушильного пункта в 1,2–2,2 раза в расчете на убираемую площадь, примерно во столько же раз сокращает расход топлива, так как влажность стеблей в 1,5–2 раза выше, чем семенных коробочек [64, 65]. Однако с путаниной теряется до 30 % семян в коробочках, не отделенных от стеблей, а также в отделенных свободными коробочками, которые плохо выделяются из вороха [63, 85].

Сформированная льнокомбайном лента расстилается на поле для получения стланцевой тресты. Основные агротехнические требования к комбайновой уборке согласно отраслевому регламенту следующие: чистота теребления – 99 %, очеса – 98 %, общие потери семян – не более 2 %, растянутость стеблей в ленте – не более 1,05 раза. Лента должна быть прямолинейной и оптимальной толщины (5–7 см) [24, 96].

Во время вылежки ленту оборачивают подборщиками-оборачивателями ОЛ-140 «Долгунец», ОПК-1,5К, ОСЛ-1, самоходны-

ми однопоточными или двухпоточными оборачивателями на базе DEHONDT и проводят вспушивание (ВЛН-4,5, ВЛК-3). Прицепные оборачиватели – ОЛ-140 (производство ОАО «Бобруйскагромаш»), самоходные оборачивателями – ОЛЛ-1 (продукция РПДУП «Экспериментальный завод» РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства») и ОСЛ-1 (ОАО «Щучинский ремонтный завод», двухпоточные оборачиватели «Лида-GE240») (табл. 1.3).

Таблица 1.3. Технические характеристики оборачивателей льна [167]

Показатели	Прицепной	Самоходный	
			
	ОЛ-140 «Долгунец»	DEHONDT однопоточный	DEHONDT двухпоточный
Производительность, га/ч, не более	1,2	1,3	2,5
Ширина захвата, м	1,5	1,5	3
Рабочая скорость, км/ч	8	15	15
Масса, кг	980	–	–

Оборачивание лент льна повышает качество тресты в среднем на 0,5–1,0 сортономер. Чистота подбора лент льна при оборачивании должна быть не менее 99 %, увеличение растянутости за одно оборачивание – не более чем на 5 %, увеличение угла ξ перекоса стеблей – не более чем на 5° от первоначального положения. Необходимо производить не менее одного оборачивания в 5–10 суток [11, 124, 204]. При выполнении этой операции должна сохраняться прямолинейность лент без перепутывания и скручивания стеблей.

Для отрыва лент льнотресты и льносоломки от поверхности почвы с целью их просушки перед последующим вязанием, рулонированием применяются вспушиватели лент льна ВЛК-3, ВЛН-4,5 производства ОАО «Бобруйскагромаш» и ВВЛ-3,4 производства РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства» (табл. 1.4).

Вспушивание применяется перед оборачиванием или подъемом льнотресты в экстремальных погодных условиях. Полнота вспушивания должна быть не менее 95 %, увеличение угла ξ перекоса стеблей в ленте – не более 8°, повреждение стеблей – не более 1,5 % [124, 96].

Таблица 1.4. Технические характеристики вспушивателей льна [167]

Показатели			
	ВЛК-3	ВЛН-4,5	ВВЛ-3,4
Производительность, га/ч, не более	2,53	2,8	3,1
Ширина захвата, м	4,5	4,5	3
Рабочая скорость, км/ч	7–9	7–9	6–12
Масса, кг	542	Не более 1100	860

Полученную льнотресту формируют в рулоны с помощью пресс-подборщиков ПРЛ-150, самоходных одно- и двухпоточных пресс-подборщиков на базе DEHONDT или Depoortere и транспортируют на льнозавод (ТПР-1, ЗППТ-8,9, 2ПТС-6, ТП-10, ПСТ-10, МАЗ-53360 + прицеп МАЗ-837810) (табл. 1.5). Для погрузки рулонов на транспорт используют погрузчики ТП-10, ПФ-0,5 + ППЛ-0,5, А-527 [145]. При погрузке на транспортные средства и укладке на хранение рулоны устанавливаются вертикально комлями вниз. При транспортировке рулоны скрепляются специальным приспособлением.

Таблица 1.5. Технические характеристики пресс-подборщиков льна [167]

Показатели	Прицепные		Самоходные	
				
	ПРЛ-150	ППЛ-1	Однопоточный ПРС-1	Двухпоточный DEHONDT
Производительность, га/ч, не более	0,62	0,6	0,8	1,6
Ширина захвата, м	1,3	1,2	1,3	2,5
Рабочая скорость, км/ч	8–10	6–12	До 15	До 16
Масса, кг	2700	3150	4200	7100

Комбайновая технология уборки льна-долгунца является основной в Республике Беларусь для получения посевного материала. Недостаток ее состоит в противоречии между двумя целями: получением

льноволокна и семян достаточного качества. Это обусловлено неодновременным наступлением физиологической спелости волокна и семян. Данное противоречие усиливается неправильной организацией уборочных работ и несовершенством уборочной техники. В результате качество льносемян и волокнистой продукции остается низким [77]. Однако при уборке урожая в желтой фазе спелости в короткий промежуток времени возможно получение достаточно качественного урожая семян и волокна.

Решение проблемы повышения качества урожая путем увеличения количества льнокомбайнов экономически нецелесообразно в связи с тем, что сокращение сроков технологии комбайновой уборки приведет к соответствующему сокращению сроков подъема льнотресты и потребует соответствующего увеличения количества пресс-подборщиков, погрузчиков и транспортных средств.

В таком случае целесообразно использовать удлинение сроков уборки путем более раннего ее начала, чтобы не допустить общего сокращения резерва времени для проведения уборочных работ, за счет посева сортов льна ранней, средней и поздней спелости.

Раздельная (двухфазная) уборка льна за счет более раннего теребления растений и созревания семян на стеблях в коробочках позволяет получить качественную тресту и одновременно семена, пригодные для посева, при меньших затратах топлива и средств на сушку вороха. Двухфазную уборку льна целесообразно применять для получения семян высокого качества. При уборке по раздельной технологии стебли льна теребят при помощи самоходных льнотеребилков (ТСЛ-2,4, Дероотере, ЛТС-2, самоходные льнотеребилки на базе DEHONDT) и льноуборочных комбайнов с отключенным очесывающим аппаратом и получают ленту стеблей льна с коробочками, после чего производится подбор ленты и очес стеблей прицепными ОСВ-100 и NECANY 2008 или самоходными одно- и двухпоточными подборщиками-очесывателями Дероотере (табл. 1.6). После очеса ленты стеблей производят те же операции, что и при комбайновой уборке. Семенной ворох льна направляют на стационарные пункты доработки, а ленту оборачивают и при необходимости вспушивают. Преимуществами раздельной уборки являются возможность начать уборку льна в более ранние, оптимальные сроки и снижение затрат на доработку льновороха. Главный недостаток ее – зависимость от погодных условий [145].

Таблица 1.6. Технические характеристики теребилок льна [167]

Показатели	Навесные	Самоходные двухпоточные			
					
	ТЛН-1,9	ЛТС-2	ТСЛ-2,4	DEHONDT ADE18	Union GX220
Производительность, га/ч, не более	1,5	1,2–1,7	1,58–2,4	2,5	2,4
Ширина захвата, м	1,9	2,4–2,8	2,4	2,4	2,6
Рабочая скорость, км/ч	6,4–8,4	До 15	До 15	20	18
Масса, кг	334	6800	6815	9500	10460

Очевидно, что технологию раздельной уборки в условиях льноводческой зоны Беларуси невозможно использовать как альтернативу комбайновой в связи с особенностями погодных условий. Даже при средних погодных условиях процесс дозревания семян в ленте при раздельной уборке льна и вылежка тресты не согласуются во времени. Чем суше погода, тем быстрее дозревают семена и медленнее идет процесс мацерации (вылежки льносоломки), и наоборот. Условия дозревания семян в необмолоченной ленте далеки от идеальных, поскольку относительная влажность воздуха в надпочвенном горизонте 0–20 см всегда в 2–2,5 раза выше, чем на высоте 1 м. А если учесть, что семена в этой фазе имеют достаточно высокий процент физиологической влаги, то процесс дозревания растягивается на значительно более длительный период. Кроме того, сам процесс дозревания семян в ленте происходит неодинаково. Коробочки растений, находящихся сверху, высыхают быстрее, но при этом часто растрескиваются и теряют семена. Семена из коробочек нижнего слоя значительно дольше сохраняют высокую влажность, а в дождливую погоду, будучи прибитыми к земле, просто прорастают. Если учесть, что в Республике Беларусь в среднем три из пяти лет бывают дождливыми, то можно представить себе величину риска потерь семян от прорастания в ленте. Потери семян при раздельной уборке также могут повышаться из-за необходимости дополнительного прохода при оборачивании ленты и, как следствие, осыпания семенных коробочек и семян, причем самых спелых [11].

Следует отметить, что даже в сухие годы влажность семян в неочесанной ленте не опускается ниже 15 %, а предельная влажность для се-

мян I, II классов составляет 12 %. Следовательно, ворох все равно придется досушивать.

Организация процесса уборки должна опираться на обеспеченность уборочными машинами. На рис. 1.5 приведены данные об обеспеченности льноуборочными машинами по областям республики.

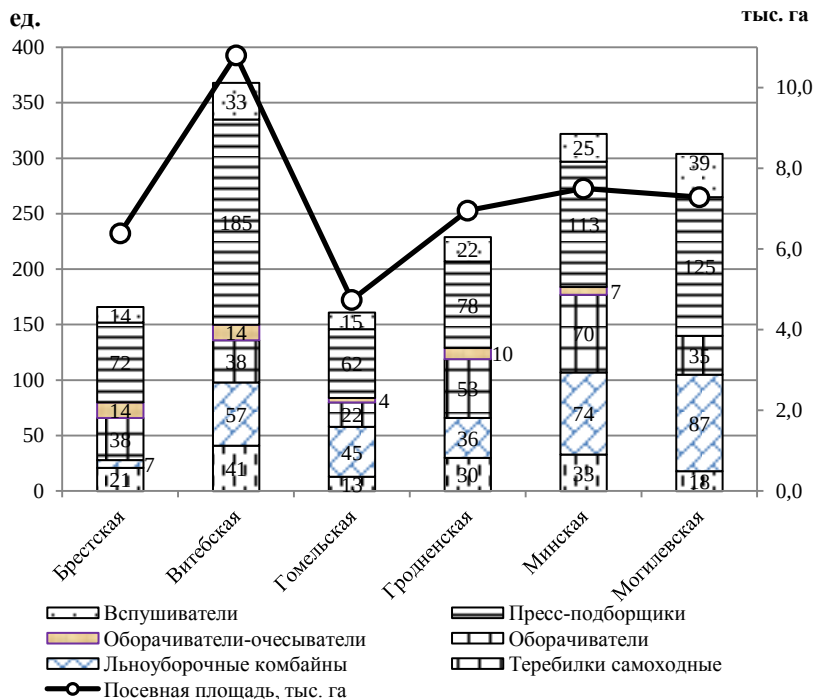


Рис. 1.5. Обеспеченность льноуборочной техникой по областям (на 2022 г.)

Как видно из рис. 1.5, обеспеченность льноуборочной техникой по областям Республики Беларусь отличается не только по количеству, но и по структуре [192].

Брестская область, демонстрирующая максимальную урожайность, имеет наибольшую нагрузку на уборочный парк (170 га/маш.). Это может свидетельствовать о более эффективной организации работ, лучшем техническом состоянии машин или более благоприятных почвенно-климатических условиях, позволяющих проводить уборку в оп-

тимальные сроки даже при меньшем количестве единиц техники.

Технологические операции и технические средства заводской технологии почти совпадают с раздельной. Отличие заключается в том, что из полевых операций исключается очес ленты льна и отделение семенной части урожая переносится на стационар [210]. Для этого используются линии первичной переработки (Van Dommele, Vanhauwaert, Depoortere), оснащенные комплексом оборудования для отделения семенной части от стеблей [40, 62].

В связи с этим шире стали использоваться ускоренные приемы тербления стеблей льна двухпоточными тербилками с последующим после оборачивания и впускивания подбором пресс-подборщиками лент льнотресты с семенными коробочками. При этом тербление льна проводится на большей скорости в более сжатые сроки (10–15 дней) в оптимальную фазу созревания (ранняя желтая спелость) и сокращаются прямые эксплуатационные затраты на 10–15 %. Освоением данной технологии в Республике Беларусь занимаются Дубровенский, Пружанский, Шкловский и другие льнозаводы.

Основной недостаток заводской технологии – большие потери семян (до 70 %) как в поле во время вылежки и проведения технологических операций (ворошение, впускивание и рулонирование), так и на льнозаводе из-за спутанности стеблей, их неправильной ориентации в ленте и несоответствия требуемых параметров ленты конструкции очесывающего аппарата. Неоднородность ленты льна, подаваемой в зону очеса, приводит к некачественной работе очесывающего устройства, намотке стеблей на рабочий орган, их обрыву и выдергиванию, выносу семян вместе с лентой льна [11]. Перерывы на обслуживание очесывающего устройства, его очистку от намоток приводят к остановке всей технологической линии, что значительно снижает ее производительность. Поэтому технология заводского обмолота не всегда приемлема, и очесывающее устройство часто простаивает и не используется в технологическом процессе [41].

Заводскую технологию могут применять только те заводы, на которых установлены линии первичной переработки иностранного производства Van Dommele или Deportere, оборудованные очесывающими устройствами. В республике на переработке льнотресты задействовано 20 льнозаводов, на которых имеется 41 линия, и лишь 9 из них оборудованы очесывающими аппаратами (рис. 1.6).

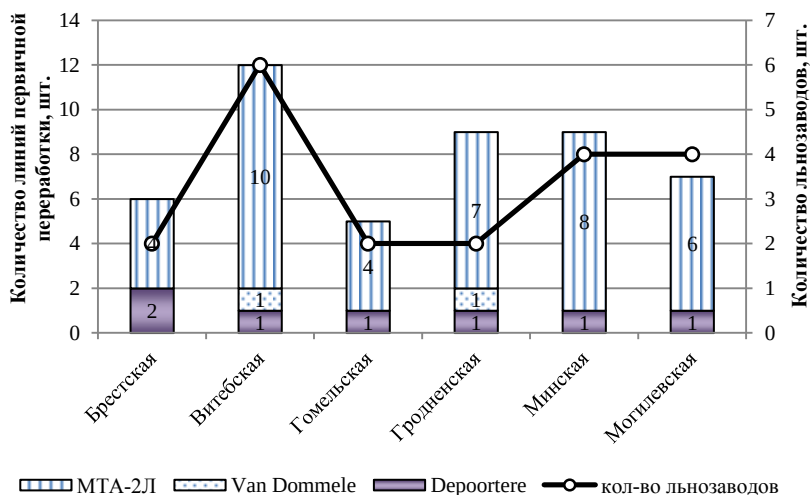


Рис. 1.6. Обеспеченность линиями первичной переработки льна по областям (на 2022 г.)

На льнозаводах Брестской области установлены две линии первичной переработки Deportere (производительностью 1790 кг/ч на тресте с номером 1,25) и четыре линии МТА-2Л (производительностью 704 кг/ч на тресте с номером 1,25). Исходя из годовой производственной программы на линии первичной переработки иностранного производства можно выполнить переработку с отделением семян до 56 % от общего объема убранной льнотресты. В разрезе областей Республики Беларусь этот показатель существенно разнится: Витебская область (одна линия Van Dommele и одна Deportere) – до 31 %, Гомельская (одна линия Deportere) – до 39 %, Гродненская (одна линия Van Dommele и одна линия Deportere) – до 40 %, Минская (одна линия Deportere) – до 24 %, Могилевская (одна линия Deportere) – до 30 %.

При всех преимуществах раздельной и заводской технологий современные реалии таковы, что обеспеченность организаций техникой для раздельной технологии неудовлетворительна, а перспективы оснащения льнозаводов стационарными линиями с очесывающими аппаратами весьма туманны из-за санкционной политики европейских стран. В связи с этим комбайновая технология еще долгое время будет оставаться основной технологией получения продуктивных семян льна в Республике Беларусь. А значит, и техника для ее обеспечения будет востребована в льносеющих организациях.

Для корректной оценки технической оснащенности рассчитаны показатели нагрузки посевной площади на единицу техники (га/ед.) по каждому типу машин и по областям. Установлено, что наибольшая нагрузка на теребилки наблюдается в Могилевской и Гомельской областях (>360 га/ед.), что может приводить к сжатым срокам уборки и потере качества [6].

Наибольшая нагрузка на пресс-подборщики – в Брестской и Гродненской областях (>89 га/ед.), что потенциально создает узкое место на этапе подбора валков.

По суммарной уборочной технике (теребилки + комбайны) наилучшая обеспеченность (наименьшая нагрузка) – в Минской и Могилевской областях (~70 га/маш.). Парадоксально, но именно эти области имеют одну из самых низких урожайностей (7,2 и 8,1 ц/га соответственно). Это указывает на то, что количество техники не является определяющим фактором урожайности. Ключевыми становятся качество техники (износ), агротехника и сроки выполнения работ.

Брестская область, демонстрирующая максимальную урожайность, имеет наибольшую нагрузку на уборочный парк (170 га/маш.). Это может свидетельствовать о более эффективной организации работ, лучшем техническом состоянии машин или более благоприятных почвенно-климатических условиях, позволяющих проводить уборку в оптимальные сроки даже при меньшем количестве единиц техники.

1.3. Анализ устройств для отделения семенной части от стеблей льна

К устройствам, осуществляющим отделение семенной части от стеблей льна и используемым на мобильных льноуборочных машинах, предъявляются следующие агротехнические требования [124]: чистота обмолота (очеса) $Ч_{об}$ должна составлять не менее 98 % при полегании стеблестоя 5 баллов, отход стеблей в путанину $О_{с.п}$ при полегании стеблестоя 5 баллов – не более 3 %, низкая степень повреждения стеблей $П_{с.}$, влияющая на выход волокна, производительность $Q = (5,8...8,5) \cdot 10^3$ ст./с.

Способы отделения коробочек, листьев, семян и соцветий от стеблевой части растений при уборке многих технических культур и устройства для их осуществления отличаются большим многообразием. В зависимости от характера взаимодействия рабочих органов различных устройств с обрабатываемым материалом и механизма отделения семенных коробочек или выделения из них семян выделяют очес

(отрыв), обмолот (разрушение) и их комбинации (рис. 1.7) [10, 13, 19, 157, 184, 186].

Метод прочеса (отрыв) лежит в основе технологических процессов, осуществляемых одно- и двухбарабанными гребневыми очесывающими аппаратами, получившими основное распространение в системах отечественных льноуборочных машин. Наибольшее распространение из них получили однобарабанные очесывающие аппараты с плоскопараллельным движением гребней, включающие зажимной транспортер 1 и установленный под углом или параллельно ему барабан 2, зубья 3 гребней которого, благодаря наличию параллелограммного механизма 4, совершают плоскопараллельное движение вокруг оси барабана (рис. 1.7, а) [10, 13, 61].

Сущность технологического процесса отделения коробочек заключается в проникновении зубьев в слой стеблей, разделении его на порции, принудительном прочесывании последних с исправлением ориентации и нарушением связей между стеблями и коробочками [13, 61, 137].

При установке очесывающего барабана параллельно зажимному транспортеру зона воздействия гребней на стебли постоянна относительно зоны расположения коробочек в ленте льна. При установке очесывающего барабана под углом к зажимному транспортеру очес осуществляется последовательно от вершинной части слоя к его основанию с постепенным расширением зоны воздействия зубьев аппарата на стебли. Благодаря постепенному расширению зоны воздействия зубьев барабана на слой при последовательном очесе снижаются повреждения стеблей P_c и отход стеблей в путанину $O_{c.п.}$, но из-за уменьшения на 2–3 % числа прочесов снижается чистота очеса [61].

К достоинствам однобарабанных аппаратов с плоскопараллельным движением гребней относятся надежность и универсальность – способность осуществлять процесс очеса в широком диапазоне спелости и влажности льна. Главными и серьезными недостатками являются повышенные повреждения стеблей $P_c = 2...6 \%$ и отход их в путанину $O_{c.п.} = 4...8 \%$, обусловленные прочесыванием спутанных и сцепленных между собой стеблей [41, 186].

Конструкция двухбарабанного гребневого аппарата (рис. 1.7, б) включает зажимной транспортер 1 и два очесывающих барабана 2, состоящих из валов, жестко закрепленных на них обечаек, закрывающих диски, и прикрепленных к последним четырех планок, снабженных зубьями 3. Несмотря на некоторые отличия в осуществлении технологического процесса, ему в полной мере присущи недостатки, отмеченные выше.

Тип устройства				
Очес	Барабанные			
	Гребневые		Щеточные	Зуб-скоба
	Однобарабанные	Двухбарабанные		
	Роторные		Линейные	
	Бильный	Планчатые	Пассивные	Активные
	Щелевые			
	Ротационные	Роторные		Импульсные
		с параллелограммным приводом	с кулачково-шестеренчатым приводом	
Обмолот				
	Вальцовые		Клавишные	Барабанно-вальцовые
	Гладкие	Рифленные		
Комбинированное воздей-	Вибрационные	Пневматические		Вальцово-битерные
	Роторно-дисковые	Вальцово-гребневые	Битерно-гребневые	Пневмомеханические

Рис. 1.7. Классификация устройств для отделения семян льна от стеблей:

1 – зажимной транспортер; 2 – барабан; 3 – система зубьев (гребни);
 4 – параллелограммный механизм; 5 – зуб-скоба; 6 – планки очесывающие;
 7 – контур параллельный цепной (ременной); 8 – лопатки; 9 – цилиндрические роторы; 10 – бичи; 11 – щетки; 12 – сборное устройство; 13 – механизм образования импульса; 14 – пневмомеханизм; 15 – упругий элемент (пружина); 16 – валец;
 17 – клавиша; 18 – вибратор; 19 – диск с зубьями; 20 – центробежный вентилятор;
 21 – камера очеса; 22 – дека; $V_{тр}$ – скорость движения зажимного транспортера;
 $L_{мз}$ – «мертвая» зона; ω – угловая скорость

Для выполнения последовательного прочеса ленты, начиная с вершинной части стеблей и до конца зоны расположения коробочек в очесываемом слое, зубья гребней аппарата выполняют различными по длине [128].

Достоинствами двухбарабанного очесывающего аппарата являются высокая полнота выделения продуктов очеса из слоя стеблей и технологическая надежность.

Попытки снижения негативных последствий жесткого прочеса стеблей зубьями гребней в западных странах привели к замене их щетками из мягкого полимерного материала или резины. Такие аппараты использовались в очесывающих адаптерах фирмы Shelbourne, применяемых для уборки зерновых и льна в системах комбайнов Paynes New Holland-8070, а также исследовались в нашей стране [2, 3, 104, 189]. Их конструкция включала подающе-зажимное устройство и пару цилиндрических роторов, поверхность которых была снабжена тонкими гибкими элементами – щетками (рис. 1.7, в). Опыт использования роторных щеточных устройств и исследования показали, что они имеют низкую чистоту очеса ($\text{Ч}_{\text{об}} = 80 \dots 85 \%$), склонность к намотке стеблей льна на роторы, а содержание путанины в ворохе $\text{O}_{\text{сп}}$ достигает 10–15 % [13, 184]. Из-за намоток и быстрого изнашивания щеток данные аппараты имеют недостаточную технологическую надежность.

В Японии и других странах Азии широкое применение получили очесывающие аппараты, работающие по методу захлестывания [184, 212]. Таким способом очесывают преимущественно растения риса. Конструкция очесывающего аппарата (рис. 1.7, з), работающего по принципу захлестывания вершины стебля за исполнительный элемент рабочего органа, представляет собой [141] подающий стебли в зону очеса зажимной транспортер 1 и барабан 2, на котором в определенном порядке установлены П-образные зубья 5. Каждый зуб представляет собой скобу из металлического прутка. Зуб-скоба взаимодействует со слоем стеблей в поперечном и продольном направлениях, так как установлен под углом к оси барабана. Экспериментальная проверка эффективности устройства при двухстороннем очесе риса и пшеницы показала высокие результаты: значительное снижение травмирования семян, снижение потерь при выносе с соломой, трех-четырекратное снижение энергоемкости процесса по сравнению с молотильными аппаратами. Работоспособность устройства в льноуборочных машинах не проверялась.

Отрыв семенных коробочек от стеблей методом протяжки или волочения осуществляют щелевые устройства, которые могут быть пассивными и активными. Исполнение щелевого устройства может быть различным, как и сам метод создания разрывных сил, действующих по линии стебля. Отрыв семенных коробочек происходит путем протягивания стеблей между двумя твердыми телами, образующими щель. Это возможно при относительном движении стеблей как вдоль, так и поперек щели. При этом создается эффект торможения продольного движения коробочек боковыми стенками щели и в стебле возникают растягивающие усилия, направленные по его оси [4, 13, 50, 136, 137]. По такому принципу работают аппараты импульсного, роторно-бильного и роторно-планчатого типов.

Конструкция роторно-бильного аппарата (рис. 1.7, *д*) включает зажимной транспортер 1 и пару цилиндрических роторов 9, снабженных бичами. Оси роторов образуют с зажимным транспортером острый угол, вершина которого расположена со стороны входа стеблей в аппарат. Бичи вращающихся во встречном направлении роторов образуют в плоскости зажимного транспортера щель, размеры которой непрерывно изменяются. Коробочки льна, попадая в зону действия бичей, подвергаются многократным кратковременным ударным воздействиям, что обеспечивает их отделение или разрушение, а свободные семена просыпаются сквозь слой в результате его пульсации [51, 130, 189]. Поскольку гладкие бичи не проникают внутрь очесываемого слоя, повреждения и отход стеблей в путанину при работе роторно-бильного аппарата минимальные. Простота конструкции и невысокая энергоемкость процесса очеса также являются достоинствами этого аппарата.

Конструкция роторно-планчатого аппарата (рис. 1.7, *е*) [28, 58, 60, 97] представляет собой пару установленных друг над другом роторов 9, каждый из которых состоит из двух дисков с планками, кромки которых расположены под углом к зажимному транспортеру 1. Между планками барабанов имеется рабочий зазор, расположенный в плоскости зажимного транспортера. Процесс очеса таким аппаратом не имеет отличий от очеса роторно-бильным аппаратом, но использование дисков в качестве рабочих поверхностей несущих бичей вместо цилиндрических труб позволяет уменьшить металлоемкость конструкции.

По методу волочения работает и аппарат, в котором отрыв коробочек осуществляется протяжкой стеблей через зазор, образованный установленными под углом к зажимному транспортеру 1 двумя парал-

лельными контурами в виде ремней или цепей специальной конструкции 2 (рис. 1.7, з), а также планок, установленных в одной плоскости (рис. 1.7, ж). Наиболее существенным преимуществом такого устройства является отсутствие прочесывания слоя, вследствие чего неправильная ориентация стеблей в нем не вызывает образования путанины.

Ротационный очесывающий аппарат (рис. 1.7, и) представляет 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 и направлено вдоль стеблей, что уменьшает их повреждаемость, но приводит к снижению эффективности очеса [13, 61]. Данное устройство имеет преимущества и недостатки рассмотренных выше щелевых аппаратов.

Рабочими органами роторно-щелевого аппарата являются плоские лопатки 8 с изменяющимся очесывающим щелевым пространством [140, 142, 152], жестко установленные на барабане 2 с параллелограммным механизмом 3 (рис. 1.7, к), или лопатки серповидной формы, установленные на барабан 2 с кулачково-шестеренчатым приводом (рис. 1.7, л). Оси вращения лопаток располагаются перпендикулярно зажимному транспортеру. Параллелограммный механизм и форма щели лопаток обеспечивают надежный захват стеблей льна, направление их в щелевое пространство и отрыв коробочек в результате взаимодействия с боковыми кромками щели. Расположенные на цилиндрической поверхности лопатки совершают круговое движение, но процесс очеса осуществляется аналогично. Этим устройствам присущи недостатки щелевых очесывающих аппаратов.

Основными конструкционными элементами импульсного очесывающего устройства (рис. 1.7, м) являются зажимной транспортер 1 и установленные под острым углом к нему очесывающие планки 2, образующие щель. С помощью кулачкового механизма обеспечивается возвратно-поступательное движение планок. Отрыв коробочек происходит за счет импульса силы пружины, освобождаемой кулачковым механизмом. Расположение очесывающих планок под острым углом к зажимному транспортеру обеспечивает продольное напряжение стеблей, вследствие чего зажатые в щелевом пространстве коробочки льна отрываются [13]. Взаимодействие рабочих органов с боковой поверхностью планок без проникновения их внутрь ленты льна исключает обрыв стеблей и выход их в путанину. Импульсное возвратно-поступательное движение минимизирует тормозящее действие щелевого устройства.

Недостатками очесывающих аппаратов щелевого типа являются низкая производительность каждой из очесывающих секций ($Q = (2 \dots 3,5) \cdot 10^3$ ст./с), сложность сбора продуктов очеса и снижение чистоты обмолота $\text{Ч}_{\text{об}}$ ниже 98 % при превышении плотности ленты льна $\rho_{\text{л}}$ более 2000 ст./м [28, 138, 184].

К устройствам, которые обеспечивают отделение семенной части льна способом плющения коробочек на стебле, относятся вальцовые, клавишные и барабанно-вальцовые аппараты [23]. Вальцовое устройство использовалось в стационарных льномолотилках «Эдди», ЛМС-5 и МПЛ-10. Его конструкция (рис. 1.7, *н, о*) [13, 56, 159, 184, 209,] включала зажимной транспортер 1 и несколько пар установленных перпендикулярно ему друг над другом гладких вальцов 16. Верхние вальцы прижимались к нижним с помощью пружин. При проходе стеблей между вальцами коробочки разрушались, а выделившиеся семена просыпались сквозь слой стеблей на транспортер [23]. Такие устройства позволяли обеспечить чистоту обмолота $\text{Ч}_{\text{об}}$ до 98 % [205].

Достоинством аппаратов вальцового типа является низкий отход стеблей в путанину ($\text{О}_{\text{сп}} = 0,5 \dots 1,0$ %) и меньшее их повреждение при работе на льне с влажностью стебельной массы до 15 % [23, 64]. При увеличении влажности свыше 15 % наблюдалось снижение производительности, увеличение потерь семян и повреждений стеблей и отход их в путанину [13, 64, 103].

Отличие клавишного аппарата (рис. 1.7, *н*) состоит 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 [23, 30].

Барабанно-вальцовое молотильное устройство (рис. 1.6, *р*) включает вращающийся барабан с вальцами и деку, выполненную из эластичных лент, один конец которых закреплен через пружины. Обмолачиваемая лента обсеменной частью подается на деку 22 и попадает под действие вращающегося барабана 2, вальцы 16 которого, прокатываясь многократно по ленте льна, разрушают коробочки, выделяя при этом семена. Устройство показало хорошие результаты работы ($\text{Ч}_{\text{об}} = 98,6$ %, из них 99,3 % выделенных из коробочек семян, повреждения семян – 0,45 % при влажности обрабатываемого материала 11 %) [31]. С увеличением влажности коробочек до 23 % $\text{Ч}_{\text{об}}$ уменьшается до 96,2 %, а дробление семян увеличивается до 0,9 % [31]. Широкого применения

данное устройство не нашло из-за сложной конструкции и низкой производительности.

В щелевом вибрационном очесывающем устройстве (рис. 1.7, *с*) с целью исключения забивания планки, закрепленные на эластичных опорах 15 и образующие щель, снабжены вибраторами 18, выполненными в виде приводных валов с неуравновешенными грузами [13, 103]. Колебание планок способствует освобождению щели от очесанных коробочек. За счет вибрации осуществляется также транспортировка очесанных коробочек в бункер по транспортирующей доске 12.

Пневматический очесывающий аппарат (рис. 1.7, *т*) имеет 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 главным образом из-за большого расхода воздуха [13].

Конструкция вальцово-битерного аппарата (рис. 1.7, *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 [23, 184]. 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 [184, 103].

Роторно-дисковый аппарат (рис. 1.7, *ф*) позволяет постепенно увеличивать интенсивность обработки лент льна, обеспечивая снижение повреждаемости стеблей и отход их в путанину. Устройство состоит из набора попарно установленных зубовых дисков 19, образующих зону очеса. Лента льна подается в пространство между дисками, которые осу-

ществляют отрыв семенных коробочек зубьями. Существенным недостатком данного типа устройств является сложность изготовления.

Вальцово-гребневый аппарат (рис. 1.7, х) включает зажимной транспортер, плющильные вальцы и очесывающий барабан с плоско-параллельным движением гребней, который помещен в камеру. Для отвода продуктов очеса от барабана служит вентилятор и транспортер вороха [49]. С увеличением зоны расположения коробочек до 0,35 м отход стеблей в путанину $O_{с.п}$ возрастал с 1 до 3 %, происходило увеличение чистоты обмолота $Ч_{об}$ с 99,15 до 99,96 %, мощность на привод барабана возрастала с 1,8 до 2,5 кВт. Указанное явление обусловлено более продолжительным воздействием гребней на стебли по ширине ленты и выдергиванием растений, не полностью попавших в ремни зажимного транспортера [49].

Битерно-гребневый аппарат (рис. 1.7, и) включал зажимной транспортер и расположенные последовательно в единой камере, разделенной перегородкой с окном для прохода стеблей, пару битеров и гребневый барабан. Битеры устанавливались друг над другом с зазором 4,9 мм и под углом 143° к продольной оси зажимного транспортера. Барабан имел четыре гребня с зубьями. Битеры выполняли функцию подготовки слоя стеблей к прочесыванию гребнями [79].

Пневмомеханический очесывающий аппарат (рис. 1.7, ч) имел камеру очеса, в которой был установлен очесывающий барабан 2 с гребнями 3 и торцевыми дисками и центробежный вентилятор [13, 184]. С целью уменьшения потерь семян и повышения надежности выполнения технологического процесса в торцевых дисках очесывающего барабана и в боковых стенках камеры очеса были выполнены окна для подсоса воздуха, при этом с каждой боковой стороны камеры под проемами для прохода ленты стеблей через камеру и окнами подсоса воздуха установлены семяуловители. Устройство данного типа имело низкую эффективность работы на короткостебельном льне из-за относительно большой величины непрочесываемой зоны $L_{мз}$ [13, 184]. Производственные испытания макетного образца льноуборочного комбайна с таким аппаратом показали, что в диапазоне линейной плотности подачи стеблей $(1,63...3,57) \cdot 10^3$ шт/м технологические показатели процесса очеса отвечали агротехническим требованиям и по сравнению с серийным очесывающим аппаратом $O_{с.п}$ снижается в 2,52 раза [79]. Однако из-за больших габаритов он не нашел широкого применения в мобильных льноуборочных машинах.

Анализ существующих способов отделения семенной части льна-долгунца позволяет сделать вывод о том, что наиболее эффективным с учетом агробиологических, морфологических и физико-механических свойств льна является комбинированное воздействие рабочих органов на обрабатываемый материал. Наиболее полное и качественное отделение семенной части с минимальным повреждением стеблей может быть достигнуто путем сочетания разрушающего и вычесывающего воздействия без грубого прочеса. Такое сочетание возможно при обмолаоте роторно-бильным аппаратом.

1.4. Обоснование конструкции роторно-бильного аппарата для отделения семенной части от стеблей в льноуборочном комбайне

С целью повышения качества отделения семян от стеблей льна авторами был предложен обмолачивающий аппарат роторного типа (рис. 1.8, 1.9) [59, 129, 176, 196].

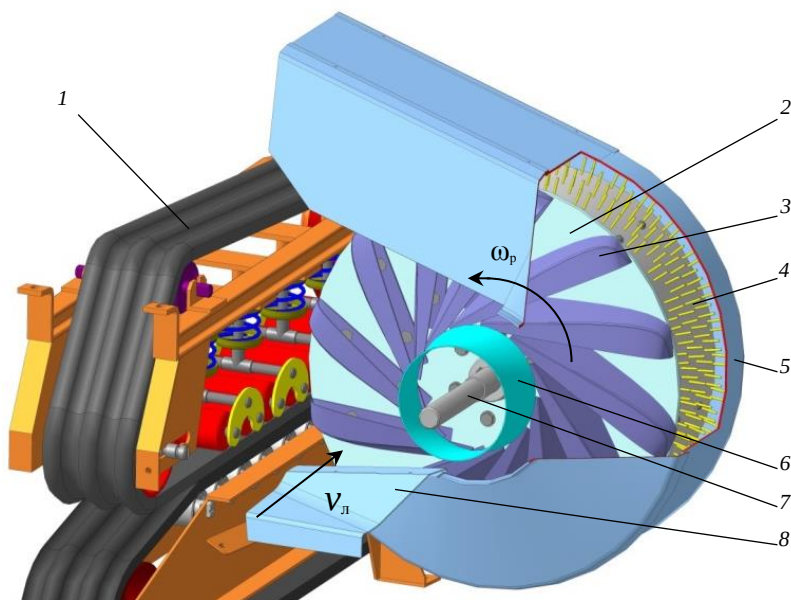


Рис. 1.8. Общий вид роторно-бильного устройства для отделения семенной части от стеблей льна:
1 – зажимной транспортер; 2 – ротор; 3 – бичи; 4 – вычесывающе-транспортирующая щетка; 5 – кожух; 6 – кольцо; 7 – вал ротора; 8 – стол

Предлагаемое устройство для отделения семенной части от стеблей льна состоит из зажимного транспортера 1 и роторно-бильного аппарата, имеющего улиткообразный кожух 5. Внутри кожуха на валу, параллельном транспортеру, установлен ротор 2, на боковой стороне которого жестко закреплены бичи 3, расположенные осями на расстоянии r от центра вращения ротора. За ротором по ходу движения ленты льна установлена вычесывающе-транспортирующая щетка 4, имеющая кольцо с расположенным на его внешней поверхности ворсом. Кожух на входе и выходе ленты имеет технологические щели для прохождения ленты стеблей. Боковая часть кожуха, установленная под углом τ , выполняет роль боковой деки 9 (рис. 1.9), а цилиндрическая – нижней 10. Угол τ установки боковой деки зависит от продольного угла β_6 наклона боковой поверхности к плоскости диска. Пространство между деками и ротором представляет собой зону отделения коробочек от стеблей, на входе в которую соосно ротору установлено защитное кольцо 6, выходящее по ширине за пределы кожуха для исключения намотки стеблей льна на вал ротора и внутренние торцы бичей. Для поддержания стеблей льна при подводе к ротору установлен стол 8.

Устройство работает следующим образом. Стебли 11 льна по поверхности стола, обеспечивающего подъем верхушечной части, подводятся зажимным транспортером к ротору в направлении v_d (рис. 1.8, 1.9).

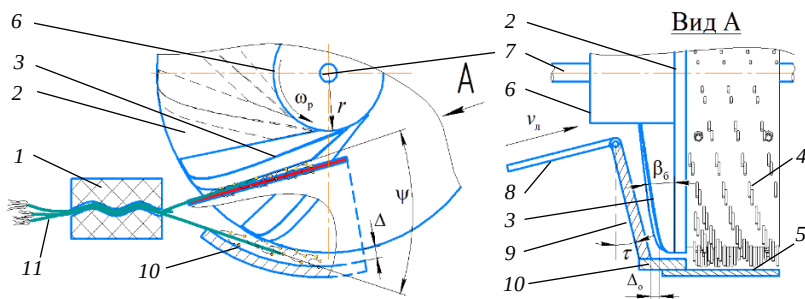


Рис. 1.9. Схема работы роторно-бильного аппарата:

- 1 – зажимной транспортер; 2 – ротор; 3 – бич; 4 – вычесывающе-транспортирующая щетка; 5 – кожух; 6 – защитное кольцо; 7 – вал ротора; 8 – стол; 9 – боковая дека; 10 – нижняя дека; 11 – стебли льна

При вращении в направлении ω_p ротор 2, установленный перпендикулярно движению ленты, увлекает бичом 3

порцию стеблей вниз в пространство между ротором 2 и декой 10, где происходит отделение семенной части от стеблей и частичное разрушение коробочек (рис. 1.10). Вертикальное смещение порции стеблей, горизонтально ориентированной поверхностью стола, приводит к нарушению связей между захваченной бичом порцией стеблей и соседними стеблями в ленте. Такое непрерывно повторяющееся действие в установившемся режиме работы обмолачивающего устройства обеспечивает веерное распределение стеблей льна в зоне отделения и способствует утонению ленты. Вытирание семенных коробочек в осевом зазоре Δ_0 между поверхностью боковой деки и боковой поверхностью бича приводит к выделению семян льна из семенных коробочек.

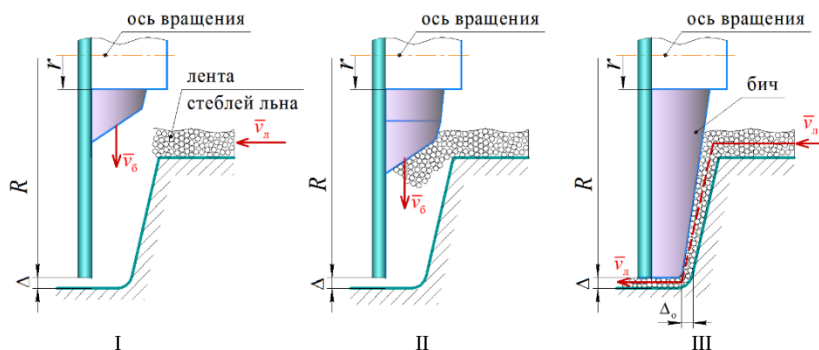


Рис. 1.10. Этапы воздействия бича на ленту льна

Затем стебли, зажатые транспортером, протаскиваются через радиальный зазор Δ между нижней декой 10 и торцевыми поверхностями бича и ротора. В образованном пространстве стебли подвергаются периодическому воздействию бичей, что способствует отделению семенной части. После зоны отделения коробочек стебли попадают под воздействие щетки 4, которая вычесывает оставшиеся в ленте семена и направляет их на выгрузной транспортер [122].

Таким образом, использование ударно-вытирающего воздействия бичей ротора на обрабатываемую ленту льна при отсутствии грубого прочеса обеспечит качественное отделение семенных коробочек и семян от стеблей при минимальном их повреждении и, соответственно, позволит получить семенной ворох с низким содержанием путанины. Кроме того, утонение обмолачиваемого слоя за счет его веерного распределения будет способствовать увеличению доли обмолачиваемых

стеблей, непосредственно взаимодействующих с рабочими элементами роторно-бильного аппарата.

1.5. Обзор исследований физико-механических и технологических характеристик стеблей и лент льна

Научно обоснованное совершенствование и создание новых технических средств для механизации процессов в льноводстве требует глубокого изучения физико-механических и технологических свойств лент льна, его стеблей и семенных коробочек. Необходимость изучения этих свойств диктуется дополнительно высокой чувствительностью объектов уборки к механическим воздействиям и легкой повреждаемостью при взаимодействии с рабочими органами льноуборочных машин. В связи с этим разработка новых технических средств с рациональными параметрами для механизации технологических процессов в льноводстве тесно связана со свойствами льна-долгунца, которые характеризуются совокупностью показателей, учитывающих строение растения, его сопротивление воздействию на него нагрузкам, поведение его при различных деформациях и разрушении, содержание влаги, трение о рабочие поверхности и др.

М. И. Шлыковым [197] и И. В. Крагельским [53, 54] проведены исследования по определению большого числа показателей стеблестоя льна. Ими были определены усилия выдергивания стеблей и отрыва коробочек, необходимая для этого работа, а также многие другие существенные показатели. А. А. Чернышковым [190], А. А. Балдиным [15] и В. В. Комаровым [49, 50] уточнены и дополнены исследования по определению деформации коробочек и плодоножек при растяжении и сжатии, установлены коэффициенты трения коробочек по различным поверхностям, сопротивление плодоножек сдвиговым усилиям, прочностные характеристики и др. [141].

Исследованием свойств стеблей при растяжении занимались Н. М. Чиликин, И. В. Крагельский [53, 54], Г. А. Хайлис [163, 164], Б. А. Воронюк [162], Н. Н. Быков [18], А. S. Limont [206], К. Charlet [203], С. Baley [202], С. В. Курзенков, В. А. Левчук и М. В. Цайц [69]. М. М. Ибрагим и Г. А. Аверьяновой [1] дополнительно исследовано двухосное сжатие одиночного стебля. Исследованием сжатия и определения упругих свойств массы стеблей занимались Г. А. Хайлис [86, 163, 164], Б. П. Можаров [87], Г. А. Аверьянова [1], В. С. Брик, В. Е. Логинов, А. В. Писарчик. Они определили сопротивление стеблей, расположенных в ряд. Н. Н. Быковым рассмотрено поперечное сжатие слоя стеблей [18].

Сопротивление стеблей льна излому изучали А. В. Писарчик, Г. А. Хайлис [163, 164], Ю. Г. Морозов [88]. Изгиб одиночных стеблей и их слоя в профилированных ремнях исследовал Н. Н. Быков [18].

Закономерности, имеющие место при кручении стебля льна, установлены Г. А. Хайлисом, Г. В. Макаровой [163, 164].

Основополагающие теоретические и экспериментальные исследования трения волокнистых веществ выполнены И. В. Крагельским [53, 54].

Исследованиям конусности стеблей льна посвящена работа М. М. Ковалева [47, 48]. Им получены эмпирические зависимости общей конусности стеблей льна от диаметра комлевой части (рис. 1.11) и технической длины стеблей.

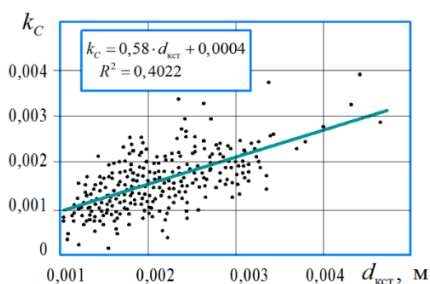


Рис. 1.11. Корреляционные поля общей конусности k_c стеблей льна и линии тренда ее значений в зависимости от диаметра комлевой части стеблей $d_{кст}$

В процессе отделения семенной части от стеблей льна обмолачивающим устройством согласно принятой схеме (см. подраздел 1.4) лента стеблей льна подвержена сжатию под действием рабочего органа. Исследования повторных сжатий стеблей льна с чередующимися ослаблениями проводились Г. А. Хайлисом [163]. Им было установлено, что изменения свойств ленты стеблей после прекращения воздействия на нее необратимы. Это обусловлено тем, что стебли не обладают достаточной упругостью [164].

Уравнение кривой сжатия определено как

$$q_c = q_{вг} \left(e^{a_{г \cdot \varepsilon}} - 1 \right), \quad (1.1)$$

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_Γ – коэффициент, характеризующий свойства стеблей и их начальное состояние;

ε – относительное сжатие стеблей.

А. Н. Зинцов предложил зависимость для определения влияния угла перекося ξ стеблей льна на ленте на плотность $\rho_{\text{ст}}$ стеблевой массы на единице площади ленты, ст./м^2 [34]:

$$\rho_{\text{ст}} = \frac{n_{\text{ст}}}{L_{\text{л}} L \cos \xi}, \quad (1.2)$$

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

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

L – общая длина стебля льна, м ;

ξ – угол перекося стеблей, рад .

Зависимость удельного сопротивления $p_{\text{д}}$ стеблей сжатию от их плотности [48] имеет вид

$$p_{\text{д}} = p_{\text{вг}} \left[e^{a_\Gamma \cdot \left(1 - \frac{\lambda_0}{\lambda}\right)} - 1 \right], \quad (1.3)$$

где $p_{\text{вг}}$ и a_Γ – константы, характеризующие свойства стеблей и их начальное состояние:

– для сухих стеблей $p_{\text{вг}} = 0,012 \text{ кН/м}$, $a_\Gamma = 8,4...8,7$;

– для свежесжатых стеблей $p_{\text{вг}} = 0,015 \text{ кН/м}$, $a_\Gamma = 7,3...7,8$;

λ , λ_0 – коэффициенты заполнения сечения в сжатом и свободном состоянии, определяемые как

$$\lambda = \frac{\pi d_{\text{с}}^2 i_{\text{сн}}}{4l(L_0 - s)}, \quad \lambda_0 = \frac{\pi d_{\text{с}}^2 i_{\text{сн}}}{4lL_0}, \quad (1.4)$$

где $d_{\text{с}}$ – средний диаметр стеблей, м ;

$i_{\text{сн}}$ – число стеблей в снопе, шт. ;

l – ширина камеры сжатия, м ;

L_0 – первоначальная длина камеры сжатия, м ;

s – ход поршня на участке l , м [141].

Кроме того, давление $p_{\text{б}}$ стеблей на боковые стенки камеры при их параллельном сжатии в канале с жесткими стенками можно определить по формуле [48]

$$p_{\text{б}} = p_{\text{б.н}} + \zeta p_{\text{д}}, \quad (1.5)$$

где $p_{\text{б.н}}$ – начальное боковое давление, имеющее место при $p_{\text{д}} = 0$, Па;
 $p_{\text{д}}$ – продольное давление в канале, Па;
 ζ – коэффициент бокового распора, равный у сухих стеблей 0,2–0,4 и у свежесжатых 0,3–0,6, имеющий тенденцию к росту при увеличении относительного сжатия стеблей, их диаметра, влажности и засоренности.

Число $i_{\text{п}}$ стеблей на одном погонном метре ленты льна в поле определяют по формуле

$$i_{\text{п}} = B_{\text{м}} i_0, \quad (1.6)$$

где $B_{\text{м}}$ – ширина захвата машины, м;
 i_0 – густота стеблестоя, шт/м².

Вес $G_{\text{п}}$ одного погонного метра ленты льна находят по зависимости

$$G_{\text{п}} = m_{\text{с}} i_{\text{п}} g, \quad (1.7)$$

где $m_{\text{с}}$ – масса одного стебля, кг;
 g – ускорение свободного падения, м/с².

Число $i_{\text{п}}$ стеблей на одном погонном метре ленты льна в каком-либо транспортере льноуборочной машины при выполнении определенной технологической [141] операции определяют по формуле [45]

$$i_{\text{п}} = B_{\text{м}} i_0 v_{\text{м}} / v_{\text{тр}}, \quad (1.8)$$

где $v_{\text{м}}$ – скорость движения комбайна, м/с;
 $v_{\text{тр}}$ – скорость ремней транспортера, в котором определяется число стеблей на одном погонном метре, м/с.
Толщина ленты льна [86, 141]

$$h_{\text{сл}} = \pi i_{\text{п}} r_{\text{с}}^2 / \lambda_{\text{л0}}, \quad (1.9)$$

где $r_{\text{с}}$ – средний радиус стеблей льна в ленте, м;
 $\lambda_{\text{л0}}$ – коэффициент неплотности укладки стеблей в ленте (согласно [45] равный 0,15–0,20) [39].

В. И. Соснов [150], S. Réquillé [211] исследовали устойчивость стеблей льна при продольном изгибе. Ими установлено, что на величину критической нагрузки, при которой наступает потеря участками стеблей устойчивости, в значительной степени влияет диаметр стебля.

В. О. Шейченко [194] исследовал явление отгиба ленты льна и определил условия, при которых происходит отрыв семенных коробочек от стеблей.

С. Г. Порфирьев, В. Г. Игнатова [121] исследовали динамику созревания льна-долгунца, изменение урожайности, влажности и спелости стеблей и коробочек и др.

Имеются многочисленные исследования по определению значений коэффициента трения стеблей о различные поверхности.

И. В. Крагельским [53, 54] разработана теория упруго-вязкого контакта трения волокнистых веществ, проведена классификация методов и приборов для определения коэффициента трения, определены коэффициенты трения покоя стеблей льна в зависимости от влажности и давления. В дальнейшем исследования по определению коэффициента трения стеблей, проведенные В. Е. Логиновым [74], С. И. Логиновым [75], Н. Н. Быковым [18], В. Г. Черниковым [187, 188], В. М. Луценко [76], И. Г. Усевичем [160], Р. А. Ростовцевым [139], дополнили и подтвердили ранее проведенные исследования И. В. Крагельского.

Закономерности изменения коэффициента трения от скорости скольжения и давления по резине и стали для свежесобраных и сухих стеблей установлены И. В. Крагельским совместно с Н. Н. Быковым [18].

Следует отметить работы Г. А. Хайлиса [163, 165], Н. Г. Ковалева и др. [48], в которых впервые приведены обобщенные результаты как собственных работ, так и работ многих других исследователей, занимавшихся изучением физико-механических свойств льна-долгунца.

К основным свойствам коробочек льна, имеющим прикладное значение, относятся: деформация коробочки и плодоножки при растяжении и сжатии, коэффициенты трения коробочек по различным поверхностям (табл. 1.7), сопротивление плодоножек [141] сдвигу, прочность коробочки и плодоножки и некоторые другие.

Таблица 1.7. Коэффициенты трения семенных коробочек льна по различным поверхностям

Материал	Коэффициент трения f	Угол трения φ°
Сталь листовая	$0,28^{+0,009}$	15–16
Резина	$1,15^{+0,07}$	47–49

Разрушение коробочки начинается при величине деформации сжатия $L_k = 1,5 \dots 1,6$ мм [84].

Зависимость деформации сжатия Δ_k , м, от усилия P_0 описывается эмпирическим уравнением [189]

$$\Delta_k = c_k P_0 + a_k, \quad (1.10)$$

где c_k – жесткость коробочки, м/Н;

a_k – параметр, учитывающий смятие чашелистиков и ворсистого покрова коробочки, м.

В работе автора [174] исследовалось влияние комбинированного воздействия на семенную коробочку. Установлено, что комбинированное воздействие на коробочку льна-долгунца снижает усилие (на 25–40 %), необходимое для ее разрушения, а также уменьшает (на 9–12,5 %) величину деформации.

Следует отметить, что коэффициент вязкости η семенной коробочки зависит от времени воздействия и в среднем составляет для коробочек в полной спелости $(0,104 \pm 0,004) \text{ Па} \cdot \text{с}$.

Значения упругих свойств плодоножки (растяжение плодоножки от нагрузки до ее разрыва), полученные автором, а также отечественными учеными (А. А. Чернышков и др.) и учеными Западной Европы (Я. Крежеменяка и др.), в среднем составляют: для зеленого льна – от 60 до 72 Н; для льна в ранней желтой спелости – от 45 до 55 Н; для льна в желтой спелости – от 25 до 35 Н; для льна, вымоченного в воде в течение двух суток, – 65 Н; для пересушенного льна – 47–49 Н [188].

Д. Г. Фадеевым установлено, что между толщиной стенки δ_c стебля и его диаметром d_c существует сильная связь (коэффициент корреляции $r = 0,896$). С увеличением диаметра d_c стебля толщина δ_c его стенки возрастает в соответствии со степенной регрессионной моделью [160]

$$\delta_c = 0,173 + 0,0506 d_c^{2,59}. \quad (1.11)$$

Таким образом, при разработке роторно-бильного аппарата следует принять во внимание прямую зависимость толщины ленты льна (формула (1.9)) от количества в ней стеблей. В свою очередь, число стеблей на одном погонном метре зажимного транспортера определяется густотой стеблестоя и кинематическим показателем работы агрегата (формула (1.8)). Семенные коробочки льна являются упруго-вязким материалом, и по мере их созревания и высыхания их упругие свойства изменяются в широком диапазоне. При этом усилие отрыва раздавленных коробочек на 0,5–2,5 Н меньше, чем нераздавленных [50].

1.6. Обзор теоретических и экспериментальных исследований устройств для отделения семенной части от стеблей льна

М. И. Шлыковым [197] установлены основополагающие зависимости для расчета параметров и режимов работы однобарабанного гребневого очесывающего аппарата. Ему принадлежат термины «мертвая» зона и «активная» зона очеса, а также «уплотняющая способность» аппарата. Им получена формула для определения числа прочесов $n_{пр}$, характеризующая процесс отделения семенных коробочек:

$$n_{пр} = \frac{n_6 z_{\Gamma} L_{\Gamma} \cos \alpha}{v_{тр}}, \quad (1.12)$$

где n_6 – частота вращения очесывающего барабана, об/с;

z_{Γ} – число гребней, шт.;

L_{Γ} – длина гребня, м;

α – угол установки оси барабана к зажимному транспортеру, рад;

$v_{тр}$ – скорость зажимного транспортера, м/с.

Величину «активной» зоны очесывающего аппарата, которая согласно положению, высказанному М. И. Шлыковым в работе [197], должна быть больше или равна ширине зоны расположения семенных коробочек в ленте льна, и уплотняющую способность гребня η автор рекомендует определять по формулам:

$$a \geq D \cos \alpha + L_r \sin \alpha, \quad (1.13)$$

где D – диаметр барабана, м;

$$\eta = \frac{l_{сл}}{1 - \frac{b}{t_3}}, \quad (1.14)$$

где $l_{сл}$ – коэффициент, учитывающий увеличение толщины пронизываемого зубьями слоя;

b – толщина зуба, м;

t_3 – шаг зуба, м.

Г. А. Хайлис, Б. П. Можаров и В. Н. Бухаркин предложили формулу для определения ширины «активной» зоны очеса [17, 78, 166], обеспечивающей выделение всех семян и коробочек:

$$a \geq a_1 m_{\mu}, \quad (1.15)$$

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

a_1 – ширина зоны расположения семенных коробочек в ленте, м;

m – коэффициент, учитывающий неточность подачи лент в аппарат;

μ – коэффициент, учитывающий растянутость лент льна.

При механизированной уборке агротехническими требованиями растянутость лент льна допускается не более чем в 1,2 раза. Поэтому максимальную растянутость принимали за расчетный коэффициент, т. е. $\mu = 1,2$. Ширина зоны расположения семенных коробочек в ленте a_1 достигает 45 см. Коэффициент неточности подачи лент в очесывающий аппарат при уборке комбайном, определенный экспериментально Б. П. Можаровым, находится в пределах 1,1–1,3. С учетом зависимости этого показателя от навыков механизаторов за расчетную величину принимали его среднее значение, т. е. $m = 1,2$. Исходя из принятых величин ширина «активной» зоны аппарата должна быть не менее 65 см [87].

По результатам экспериментальных исследований оптимальное среднее значение ширины «активной» зоны $a = 35...56$ см. Выявлено, что качество очеса будет зависеть также от того, насколько подача ленты согласована с шириной «активной» зоны очеса, обусловленной диаметром очесывающего барабана. Однако авторы утверждают, что увеличение диаметра нецелесообразно, так как повышается количество путанины в ворохе. Важным резервом повышения чистоты очеса является непрерывный контроль зоны очеса ленты льна и правильный выбор высоты теребления, угла наклона зубьев очесывающего аппарата или его положения относительно ленты льна.

По мнению М. И. Шлыкова, ширина «активной» зоны аппарата, которая определяется расстоянием между точками входа и выхода гребней из слоя стеблей, для гребневого очесывающего аппарата льноуборочного комбайна ЛК-7 определяется по формуле

$$a = \sqrt{(L_{M3} + L_{\Gamma} \sin \alpha + D \cos \alpha)^2 (1 + \sin^2 \alpha) + D^2 \left(\sin \alpha - \frac{\pi v_{\Gamma p}}{2 v_{\Gamma}} \right)^2} - \frac{L_{M3}}{\cos \alpha}, \quad (1.16)$$

где v_{Γ} – наибольшая скорость гребня, м/с.

Представленная зависимость учитывает лишь конструкционные параметры очесывающего аппарата, тогда как вопрос соответствия ширины «активной» зоны и ширины зоны расположения коробочек остался не раскрытым.

П. Ф. Прибытков [123] предложил рассчитывать ширину B_1 зоны

расположения коробочек в ленте, подаваемой в очесывающий аппарат, следующим образом:

$$B_1 = a_1 + \Delta l, \quad (1.17)$$

где Δl – увеличение ширины зоны расположения коробочек после тербления, м.

Величина Δl зависит от высоты установки тербильного аппарата h_c и угла наклона стебля в плоскости тербления θ . Эта зависимость выражается уравнением

$$\Delta l = h_c \left(\frac{1}{\sin \theta} - 1 \right). \quad (1.18)$$

Однако данное уравнение может служить только для приближенного расчета, поскольку оно не учитывает случайного характера высоты стеблестоя и высоты тербления, которые влияют на правильность подачи ленты в очесывающий аппарат.

В. С. Астахов, С. В. Курзенков, О. В. Гордеенко [14] предложили зависимость для определения Δl , учитывающую кинематические характеристики работы уборочного агрегата и агробиологические особенности стеблестоя, при уборке тербильными аппаратами с продольными криволинейными ручьями типа ЛК-4А и «Двина-4М»:

$$\Delta l = l_{ct} \left[\frac{\sqrt{S_m^2 + \frac{b_{тер}^2}{4} + (r_k - L_k \sin(\chi + \alpha_p - \alpha_{рн}))^2}}{r_k - L_k \sin(\chi + \alpha_p - \alpha_{рн})} - 1 \right], \quad (1.19)$$

где S_m – путь, пройденный сельскохозяйственной машиной за время t , м;

$b_{тер}$ – ширина захвата секции тербильного аппарата, м;

r_k – радиус полевого колеса, м;

L_k – расстояние от оси вращения полевого колеса до точки начала затягивания стеблей льна в тербильный ручей, м;

χ – угол, определяющий наклон тербильного аппарата к горизонту в его крайнем нижнем положении, рад;

α_p – угол наклона тербильного ручья, рад;

$\alpha_{рн}$ – угол наклона тербильного аппарата к горизонту в его крайнем нижнем положении, рад.

С. В. Курзенков, В. А. Левчук, М. В. Цайц получили модель де-

формации семенной коробочки льна при сжатии ее рабочими органами обмолачивающего аппарата, а также предложили зависимость для определения минимального молотильного зазора, образуемого между ними [68, 70]:

$$\Delta_{\min} = 2\sqrt[3]{\frac{3V_c n_c}{4\pi}}, \quad (1.20)$$

где V_c – объем семени, м^3 ;

n_c – количество семян в коробочке льна, шт.

Также ими была предложена зависимость для определения объема слоя стеблей льна, находящегося под воздействием бича обмолачивающего устройства [67]:

$$V_{\text{р.з}} = \frac{b_{3,6} L_{\text{ст}} (h_{\text{в}} - h_{\text{к}})}{2}, \quad (1.21)$$

где $b_{3,6}$ – ширина захвата бича, м;

$L_{\text{ст}}$ – длина участка ленты льна, на которой происходит воздействие бича, м;

$h_{\text{в}}$ – толщина ленты стеблей в верхушечной ее части, м;

$h_{\text{к}}$ – толщина ленты стеблей в начале взаимодействия ее с бичом, м.

Б. П. Можаровым [87] впервые была введена новая характеристика процесса очеса – удельное число прочесов Q , характеризующее чистоту очеса гребневым аппаратом независимо от его конструкции:

$$Q = \frac{v_6 z_6 z_{\text{г}} z_3}{200\pi v_{\text{тр}} R_6}, \quad (1.22)$$

где z_6 – число барабанов, шт.;

$z_{\text{г}}$ – число гребней барабана, шт.;

z_3 – число зубьев гребня, шт.

Определены также критические значения удельного числа прочесов для одно- и двухбарабанных гребневых аппаратов, выполнены экспериментальные исследования по определению влияния скорости удельного числа прочесов на чистоту очеса, степень повреждения стеблей и отхода их в путанину.

Работы П. Ф. Прибыткова [123] и П. К. Шрамко [199] посвящены выбору оптимального соотношения скорости зажимного транспортера и очесывающего барабана.

Оптимальное соотношение скорости зажимного транспортера $v_{тр}$ и частоты вращения очесывающего барабана, а также среднюю скорость очеса $v_{оч}$ П. Ф. Прибытков предлагает определять по следующим выражениям [123]:

$$v_{тр} = \sin \alpha (\sin \beta + \cos \beta) \frac{R_6 n_6}{15}, \quad (1.23)$$

где β – угол наклона гребня к плоскости стеблей, рад;

R_6 – радиус очесывающего барабана, м;

n_6 – частота вращения очесывающего барабана, об/мин;

$$v_{оч} = \frac{2\pi R_6 n_6 \sin \beta \cos \beta}{60\beta}. \quad (1.24)$$

А. Ф. Еругиным предложено определять диаметр барабана обмолачивающего аппарата с вальцами, исходя из необходимого количества воздействий и требуемого расстояния между вальцами по формуле [30]

$$D = \frac{2[(p-1)l_v + L_d]v_{тр}}{\omega_6 L_d}, \quad (1.25)$$

где p – количество воздействий;

l_v – расстояние между соседними вальцами, м;

L_d – длина рабочей зоны деки, м;

ω_6 – угловая скорость барабана, об/с.

Полученные разными учеными аналитические зависимости, описывающие процесс отделения семенных коробочек от стеблей льна, применимы в основном для рабочих органов очесывающих устройств, имеющих систему гребней или щелевое пространство. Теоретических исследований взаимодействия рабочих органов роторно-бильного обмолачивающего аппарата при комбайновой уборке недостаточно.

Выводы

1. В результате проведенного анализа существующих механизированных технологий уборки льна, а также анализа обеспеченности льносеющих хозяйств льноуборочной техникой установлено, что для получения семенного материала высоких посевных кондиций наибо-

лее целесообразно применять комбайновую технологию уборки льна или раздельную с реализацией второй фазы уборки в поле. При этом обеспеченность льнозаводов льноуборочной техникой для получения посевного материала имеет уклон в сторону льноуборочных комбайнов, что определяет преимущественное применение комбайновой технологии уборки льна [11, 192].

2. Одним из путей повышения эффективности комбайновой технологии уборки и первичной переработки льна-долгунца является совершенствование существующих и создание новых рабочих органов применяемых машин и оборудования. Анализ существующих способов отделения семенной части льна-долгунца позволяет сделать вывод о том, что наиболее эффективным с учетом агробиологических, морфологических и физико-механических свойств льна является комбинированное воздействие рабочих органов на обрабатываемый материал. Проведенный анализ устройств для отделения семенной части от стеблей выявил общую для всех проблему – большая толщина обрабатываемой ленты льна и перепутанность в ней стеблей. Наиболее полное и качественное отделение семенной части с минимальным повреждением стеблей может быть достигнуто путем сочетания разрушающего и вычесывающего воздействия без грубого прочеса. Такое сочетание возможно при обработке лент льна роторно-бильным аппаратом, обеспечивающим качественное отделение семенных коробочек от стеблей при минимальном их повреждении и позволяющим получить семенной ворох с низким содержанием путанины. Кроме того, утонение обмолачиваемого слоя за счет его веерного распределения будет способствовать увеличению доли обмолачиваемых стеблей, непосредственно взаимодействующих с рабочими элементами роторно-бильного аппарата [8, 13, 56, 61].

3. Анализ теоретических исследований показал, что полученные разными учеными аналитические зависимости, описывающие процесс отделения семенных коробочек от стеблей льна, применимы в основном для рабочих органов очесывающих устройств, имеющих систему гребней или щелевое пространство. Теоретические исследования взаимодействия рабочих органов роторно-бильного обмолачивающего аппарата при комбайновой уборке отсутствуют. Поэтому изучение данного вопроса является актуальным [9, 12, 67, 70, 173].

2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РОТОРНО-БИЛЬНОГО АППАРАТА

Приняв за основу предложенную схему роторно-бильного аппарата (см. рис. 1.8, 1.9), произведем теоретические исследования рабочего процесса.

Рабочий процесс аппарата предполагает, что лента стеблей *11* льна в зажатом зажимным транспортером *1* состоянии перемещается через зону воздействия рабочих органов, которая на первом этапе формируется бичами *3* ротора и поверхностью боковой деки *9*, а на втором – торцами бичей *3* и ротора *2* и поверхностью нижней деки *10*. Бич *3* сначала увлекает порцию стеблей льна в боковое молотильное пространство, а затем в подроторное. При этом порция стеблей льна разреживается (отклоняется веерообразно) в боковом молотильном пространстве и утоняется, что положительно сказывается на процессе обмолота. Обмолот происходит при рабочем ходе бича, который начинается с момента воздействия его на ленту льна и заканчивается при проходе вершин стеблей. Обмолоченная лента попадает под воздействие щетки *4*, которая вычесывает семена и коробочки и транспортирует их на выгрузной транспортер.

Зона взаимодействия рабочего органа со стеблями характеризуется площадью, размер которой зависит от геометрических параметров ротора и установленных на нем бичей, а также взаимного расположения элементов аппарата.

При этом на один участок ленты льна бичи могут производить несколько воздействий, количество которых определяется соотношением скоростей движения ленты стеблей v_d и вращения ротора v_p , количества установленных бичей и ширины их торцевой части. Производительность процесса обмолота и его качество зависят от размеров зоны взаимодействия и числа воздействий бичей на материал.

Число воздействий рабочего органа на стебли льна зависит от времени нахождения единицы объема материала в зоне обмолота. Эффективность обмолота существенно зависит от степени сжатия обмолачиваемых стеблей в пространстве между бичом и декой.

На основании вышеизложенного можно выдвинуть гипотезу о том, что качество отделения семенной части льна зависит от конструктивных и кинематических параметров обмолачивающего аппарата, а также технологических свойств объекта обмолота, поэтому их теоретическое изучение является важной задачей при обосновании конструкции и создании опытного образца.

Необходимо решить следующие задачи:

- установить рациональную схему взаимного расположения зажимного транспортера и ротора;
- определить конструкционные параметры роторно-бильного аппарата;
- определить геометрические параметры бича;
- определить кинематические параметры роторно-бильного аппарата.

2.1. Обоснование рациональной схемы расположения элементов роторно-бильного аппарата

Анализируя расстановку элементов конструкции обмолачивающего аппарата, выделим характерные участки ленты стеблей льна, которые формируются во время его работы.

Лента льна при обмолоте удерживается зажимным транспортером на участке $L_{\text{зт}}$ (рис. 2.1) на расстоянии $L_{\text{кк}}$ от корней.

При обмолоте на участке $L_{\text{ст}}$ происходит периодическое воздействие 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 [23, 49, 210]. На участке ленты льна $L_{\text{ск}}$ располагаются семенные коробочки, которые необходимо отделить от стеблей или разрушить обмолачивающим аппаратом.

Для эффективной работы обмолачивающего аппарата длина бича $L_{\text{б}}$ должна перекрывать участок стеблей $L_{\text{ск}}$ [33]. При этом для исключения пропусков и огрехов в работе «мертвая» зона стебля $L_{\text{мз}}$ должна быть минимальной и не превышать 0,15 м [142, 152]:

$$L_{\text{мз}} \rightarrow \min; \quad (2.1)$$

$$L_{\text{мз}} \leq 0,15 \text{ м.} \quad (2.2)$$

Также следует отметить, что для реализации предлагаемой схемы работы ротор обмолачивающего аппарата не может пересекать зону зажимного транспортера, более того, он должен отстоять от этой зоны на величину технологического зазора δ , равную разности между радиусами вычесывающе-транспортирующей щетки 4 и диска ротора 2 (рис. 2.1).

На этапе проектирования предположим, что длина рабочей поверхности бича должна быть больше или равной участку ленты льна $L_{ск}$ с семенными коробочками:

$$L_6 \geq L_{ск}, \quad (2.3)$$

а его параметрами, определяющими бич как объемную фигуру, пренебрежем.

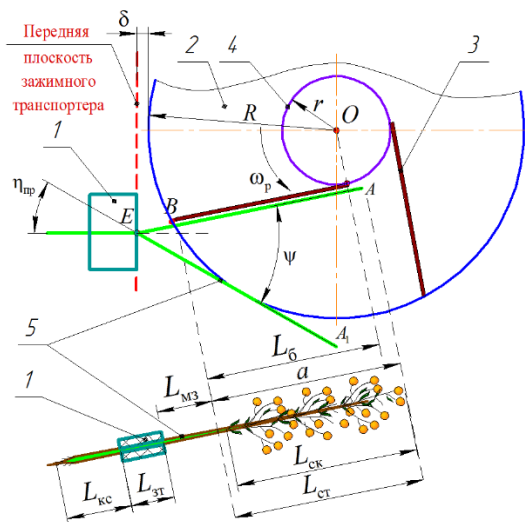


Рис. 2.1. Общая схема обмолота:

1 – зажимной транспортер; 2 – ротор; 3 – бич; 4 – защитное кольцо; 5 – стебли льна;

$L_{кз}$ – длина комлевой части стебля, м; $L_{мз}$ – длина участка стебля льна между участками $L_{зт}$ и $L_{ст}$ («мертвая» зона), м; $L_{ст}$ – длина участка стебля, подверженного воздействию рабочего органа (бича) при обмолоте, м; $L_{ск}$ – ширина зоны расположения семенных коробочек в ленте, м; L_6 – длина образующей бича, м; a – ширина «активной» зоны аппарата, м; R – радиус ротора, м; r – радиус защитного кольца, м;

ω_p – угловая скорость вращения ротора, рад/с; $\eta_{пр}$ – предельный угол изгиба стеблей льна, рад; ψ – угол отгиба стеблей льна бичом ротора, рад;

δ – технологический зазор между ротором и передней плоскостью зажимного транспортера, м

Длина участка ленты льна $L_{ск}$ зависит от равномерности всходов льна, состояния стеблестоя и работы теребильного аппарата, формирующего слой стеблей ($L_{ск} = 0,3 \dots 0,45$ м) [185, 186].

Рассмотрим варианты, когда бич касается ленты льна в начале взаимодействия с ней всей передней поверхностью, этому положению отвечает установка бича параллельно плоскости ленты стеблей льна, зажатой транспортером, а при некоторых допущениях совпадает с ней.

Условиям (2.1) и (2.3) наиболее удовлетворяет схема, когда бичи ротора расположены на диске радиально, при этом радиус ротора $R = L_{ск}$. В таком случае можно обеспечить наименьшее расстояние EB , совместив ось вращения ротора и плоскость зажимного транспортера (рис. 2.2).

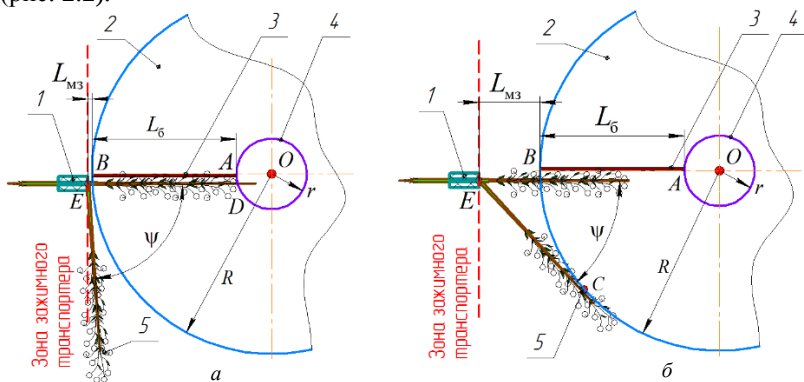


Рис. 2.2. Схема к определению влияния горизонтального смещения зажимного транспортера OE на технологические параметры:

a – расположение, соответствующее $EO = R$; b – расположение, соответствующее $EO > R$; 1 – зажимной транспортер; 2 – диск ротора; 3 – бич;
4 – защитное кольцо; 5 – стебли льна

Тогда наименьшее значение величины $L_{МЗ}$ «мертвой» зоны будет в случае радиального расположения бичей на роторе (рис. 2.2, a), ось вращения ротора с центром в точке O будет лежать в плоскости зажатой транспортером ленты льна, а точка B с некоторыми допущениями совпадет с точкой E .

В таком случае «мертвая» зона близка к нулю, однако лента стеблей льна подвержена максимальному изгибу под углом ψ , близким к 90° . Точное значение угла ψ может быть определено из условия, что стебель льна принимает положение касательной BC к окружности ротора (рис. 2.2, b).

Для приведенной на рис. 2.2 схемы угол ψ не должен превышать значения, при котором происходит излом стебля $\eta_{пр}$ [171]:

$$\psi < \eta_{\text{пр}}. \quad (2.4)$$

Согласно исследованиям М. М. Ковалева [44], для свежесобранного стебля льна влажностью 58–68 % предельный угол изгиба стебля льна $\eta_{\text{пр}}$ находится в пределах 17–29°. Излом стеблей льна влечет за собой потерю качества урожая, поэтому его необходимо исключить.

Проанализируем изменение угла изгиба ψ и «мертвой» зоны $L_{\text{мз}}$ при увеличении расстояния от точки E зажатия стеблей транспортером до оси вращения ротора O в плоскости стеблей (рис. 2.2, б).

Полученная путем моделирования устройства в системе трехмерного проектирования «КОМПАС-3D» графическая зависимость представлена на рис. 2.3.

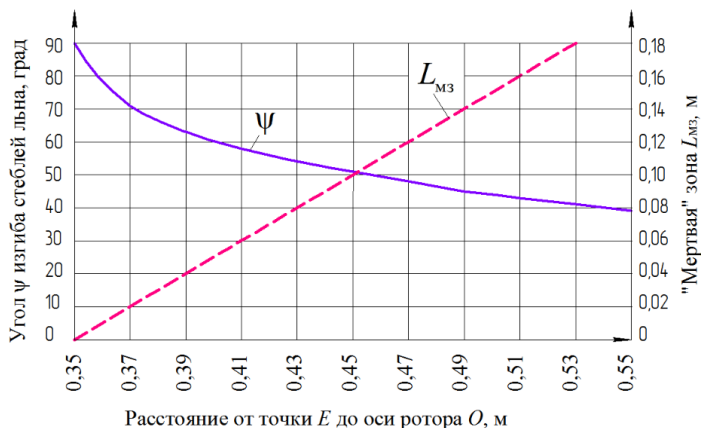


Рис. 2.3. Зависимости угла изгиба ψ и «мертвой» зоны $L_{\text{мз}}$ от расстояния EO

Анализируя графическую зависимость, построенную при фиксированном значении радиуса ротора $R = 0,35$ м (рис. 2.3), следует отметить, что при увеличении расстояния EO значение «мертвой» зоны увеличивается линейно, а угол изгиба уменьшается по показательной кривой (экспоненте). При максимальном допустимом значении «мертвой» зоны $L_{\text{мз}} = 0,15$ м угол изгиба ψ составляет 45°, что значительно превышает значение предельного угла изгиба стебля льна $\eta_{\text{пр}}$, из чего следует, что такая схема установки роторно-бильного устройства не отвечает требованиям качества процесса отделения семенной части от стеблей и не может быть принята за базовую.

Другим подходом к уменьшению угла изгиба стеблей льна является вертикальное смещение вниз точки E зажатия стеблей транспортером на расстояние r (рис. 2.4, *а*), соответствующее радиусу защитного кольца, а для того чтобы бич касался ленты льна в начале взаимодействия с ней всей передней поверхностью, его необходимо сместить вниз на величину r параллельным переносом. В таком положении бич является касательной к окружности защитного кольца 4. Начальное положение устройства при такой схеме расстановки имеет радиус защитного кольца близкий к нулю, $r \rightarrow 0$ (рис. 2.4, *а*). Такое положение устройства мало чем отличается от схемы, приведенной на рис. 2.2, *а*. Однако влияние вертикального смещения точки E на величину «мертвой» зоны и угол изгиба существенно отличается. Смещение зажимного транспортера вертикально вниз (рис. 2.4, *б*) влечет за собой смещение бича, длина которого AB уменьшается.

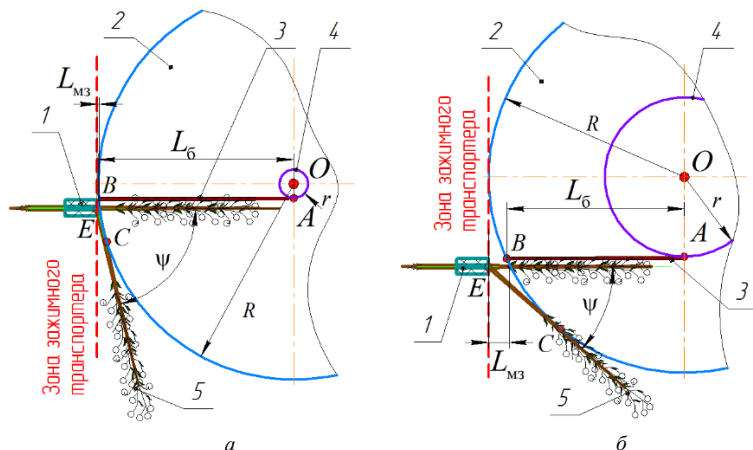


Рис. 2.4. Схема к определению влияния вертикального смещения точки E на технологические параметры:
а – расположение, соответствующее $r \rightarrow 0$; *б* – расположение, соответствующее $r > 0$; 1 – зажимной транспортер; 2 – диск ротора; 3 – бич; 4 – защитное кольцо; 5 – стебли льна

При фиксированных значениях радиусов ротора R и защитного кольца r длина бича будет определяться по формуле

$$L_6 = \sqrt{R^2 - r^2}. \quad (2.5)$$

Графики зависимости угла изгиба стеблей, «мертвой» зоны и длины бича от величины вертикального смещения точки E зажатия стеблей транспортером относительно оси вращения ротора O при фиксированном значении радиуса ротора $R = 0,35$ м, полученные путем моделирования устройства в системе трехмерного проектирования «КОМПАС-3D», приведены на рис. 2.5.

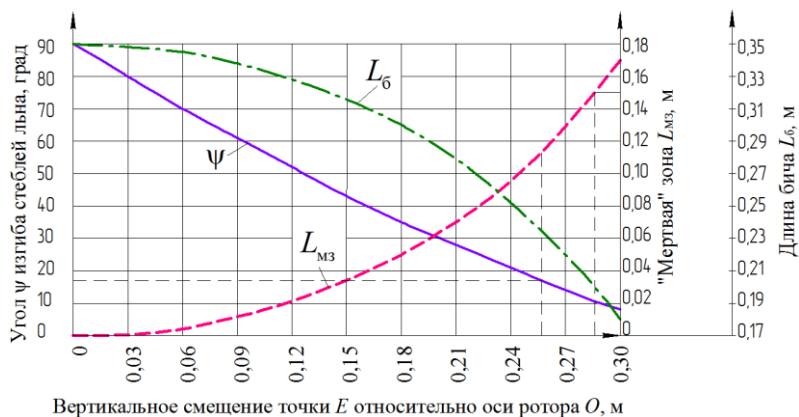


Рис. 2.5. Зависимости угла изгиба ψ , «мертвой» зоны $L_{мз}$ и длины бича L_b от вертикального смещения точки E зажатия стеблей транспортером относительно оси вращения ротора O

Анализ графической зависимости (рис. 2.5) показывает, что при максимальном значении «мертвой» зоны 0,15 м угол изгиба стеблей составит 12° , что удовлетворяет условию (2.2), а значение вертикального смещения точки E при этом составляет 0,285 м, длина бича, соответствующая отрезку AB , $L_b = 0,20$ м. При угле изгиба ψ , соответствующем предельному значению угла изгиба стебля $\eta_{пр} = 17^\circ$, длина бича $L_b = 0,238$ м, «мертвая» зона $L_{мз} = 0,11$ м, а значение вертикального смещения точки E при этом составляет 0,255 м. При такой расстановке длина бича в диапазоне вертикального смещения точки E 0,255–0,285 м не превышает 0,238 м. Поскольку длина бича L_b меньше длины участка $L_{ск}$ ($L_{ск} = 0,3 \dots 0,45$ м) (см. рис. 2.1) стеблей льна, содержащих семенные коробочки, то в зависимости от способа подачи стеблей в зону обмолота будет происходить недомолот или захлест [87] верхушечной части стеблей за элементы ротора и их возможный обрыв. Принимая во внимание условие (2.3), согласно которому длина бича должна быть не меньше длины участка $L_{ск}$ ленты стеблей льна, содер-

жащей семенные коробочки, можно сделать вывод о необходимости подбора соответствующего радиуса ротора R .

Рассмотрим влияние изменения радиуса ротора на величину «мертвой» зоны $L_{МЗ}$, угол изгиба ψ и длину бича L_6 (рис. 2.6).

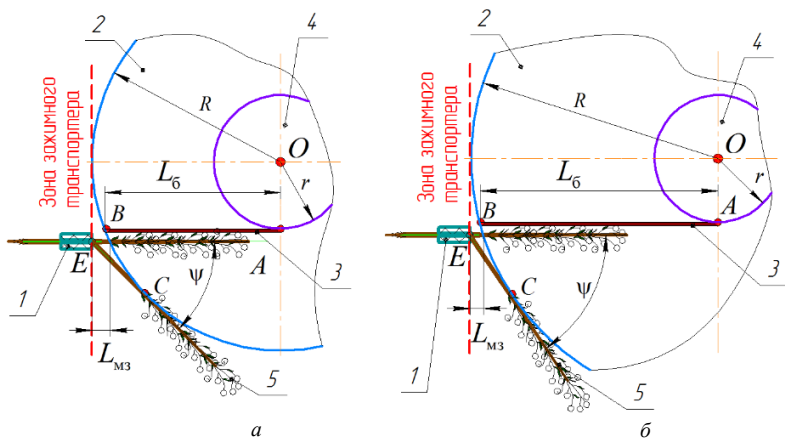


Рис. 2.6. Схема к определению влияния диаметра ротора на технологические параметры:

- a – расположение, соответствующее начальному значению радиуса R ;
- $б$ – расположение, соответствующее увеличению радиуса R ;
- 1 – зажимной транспортер; 2 – диск ротора; 3 – бич;
- 4 – защитное кольцо; 5 – стебли льна

Рассмотрим вариант взаимного расположения ротора и зажимного транспортера, соответствующего горизонтальному смещению оси вращения ротора O на величину R и вертикальному смещению на величину 0,26 м, как в наибольшей степени отвечающему требованиям условий (2.2) и (2.5) (рис. 2.6, a). Очевидно, что при маленьком диаметре ротора не может быть достаточной длина бича, а увеличение диаметра ротора (рис. 2.6, $б$) приводит к увеличению угла изгиба стеблей льна и уменьшению «мертвой» зоны. При значении угла изгиба ψ 17° и максимальном значении величины «мертвой» зоны 0,15 м для обеспечения достаточной длины бича 0,3–0,45 м ротор будет иметь радиус, который пересечет плоскость установки зажимного транспортера.

Графики зависимости угла изгиба стеблей, «мертвой» зоны и длины бича от радиуса ротора, полученные путем моделирования устройства в системе трехмерного проектирования «КОМПАС-3D», приведены на рис. 2.7.

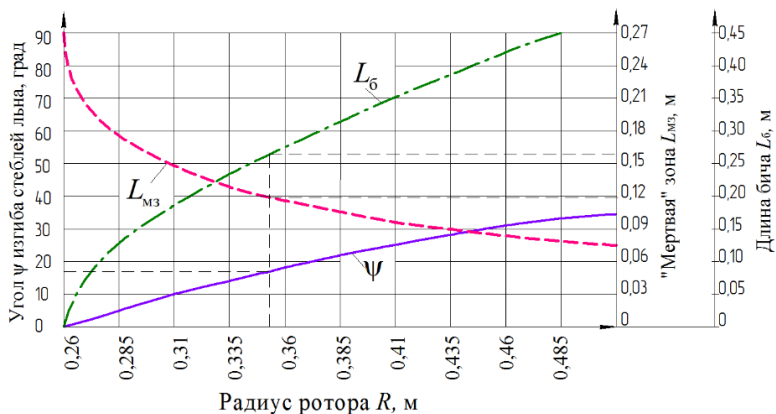


Рис. 2.7. Зависимости угла изгиба ψ , «мертвой» зоны $L_{мз}$ и длины бича $L_б$ от радиуса ротора R

Анализ графической зависимости (рис. 2.7) показывает, что при минимальном допустимом значении длины бича $L_б = 0,3$ м такой расстановке соответствует диаметр ротора $R = 0,375$ м. Величина «мертвой» зоны при этом удовлетворяет требованию условия (2.2) и составляет $0,11$ м, а угол изгиба $\psi = 21^\circ$, что не удовлетворяет требованию условия (2.5). Значению угла $\psi = 17^\circ$ соответствуют значения «мертвой» зоны $L_{мз} = 0,12$ м, радиуса ротора $R = 0,35$ м и длины бича $L_б = 0,27$ м, которая не удовлетворяет условию (2.3). Из этого следует, что увеличение радиуса ротора при такой схеме расстановки роторно-бильного устройства не отвечает всем приведенным выше условиям. Нерешенной проблемой остается обеспечение допустимого угла изгиба стеблей.

Кроме того, размер ротора определяет и размеры других элементов конструкции устройства, поэтому следует стремиться к минимальному значению величины радиуса ротора:

$$R \rightarrow \min. \quad (2.6)$$

Из вышеизложенного можно сделать заключение о том, что горизонтальное смещение точки E нецелесообразно из-за пропорционального увеличения «мертвой» зоны, а вертикальное смещение зажимного транспортера вниз должно быть таким, чтобы удовлетворять требованию условий (2.1), (2.2) и (2.5). Поскольку проектируемый аппарат для отделения семенной части от стеблей льна предполагается использо-

вать в полевых условиях на льноуборочном комбайне, где практически невозможно контролировать влажность стеблестоя, а также оценивать диаметры стеблей, подвергаемых изгибу в зоне обмолота, угол отгиба стеблей от своей оси не должен превышать 17° . Для этого целесообразно обеспечить предварительный подъем стеблей на угол $\psi/2 = \eta_{\text{пр}}$ с последующим отгибанием их от своей оси вниз на такой же угол при затягивании бичами в молотильное пространство. Такая схема позволит обеспечить и еще один положительный эффект – растягивание слоя ленты льна в молотильном пространстве, т. е. уменьшение толщины слоя стеблей при их обмолоте.

Зажатая в транспортере 1 порция стеблей 5 льна увлекается бичом ротора в молотильное пространство, образуемое боковой поверхностью диска ротора и боковой поверхностью деки. Бич передней поверхностью веерообразно распределяет захваченную порцию стеблей льна по боковой поверхности деки. Такому веерному распределению способствует изменение проекции угла установки передней поверхности бича на вертикаль в зоне взаимодействия бича со стеблями приближается к 0° . Кроме того, стебли в ленте льна в верхушечной части сцеплены между собой за счет спутанности семенных коробочек и плодоножек и для полного их разделения, согласно исследованиям Г. А. Хайлиса, необходимый путь отвода составляет 0,48 м [163]. Поскольку в начале взаимодействия бича с лентой льна осевой зазор существенный (больше, чем в нижней части), то не происходит полноценное разделение ленты на отдельные порции стеблей, а сохраняется связь за счет спутанности стеблей, семенных коробочек и плодоножек. Таким образом, порция стеблей льна, зажатая транспортером, сохраняет свою плотность в точке E (см. рис. 2.1), а верхушечная часть распределяется на участке AA_1 , что обеспечивает веерное распределение стеблей в молотильном пространстве. Веерное распределение стеблей позволяет максимально уменьшить плотность слоя стеблей в зоне обмолота.

Для принятой выше схемы параметры ротора (радиус ротора R , радиус защитного кольца r и длина бича L_6) можно определить следующим образом. Сделаем привязку элементов роторно-бильного аппарата к системе координат, поместив ее начало, точку O , в центр вращения ротора (рис. 2.8).

Тогда, согласно принятому порядку ввода стеблей в молотильное пространство роторно-бильного аппарата, первым этапом движения ленты стеблей будет их подъем на угол $\eta_{\text{пр}} = \psi/2$ за счет конфигурации подводящего стола.

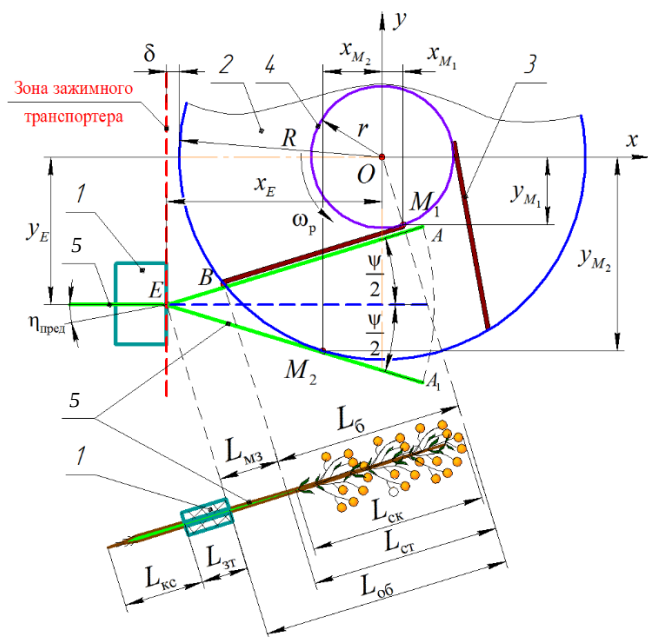


Рис. 2.8. Схема к определению параметров роторно-бильного аппарата:
 1 – зажимной транспортер; 2 – ротор; 3 – бич; 4 – защитное кольцо;
 5 – стебли льна; $L_{об}$ – длина обрабатываемого участка стебля льна, м;
 $L_{ск}$ – ширина зоны расположения семенных коробочек в ленте, м

При этом предельным возможным подъемом стеблей будем считать их положение по касательной прямой к защитному кольцу ротора радиусом r . Такое положение стеблей можно описать уравнением прямой линии

$$y(x) = (x - x_E) \operatorname{tg} \eta_{\text{пр}} + y_E, \quad (2.7)$$

а абсциссу точки касания M_1 можно найти из уравнения

$$(x_{M_1} - x_E) \operatorname{tg} \eta_{\text{пр}} + y_E - x_{M_1} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} + \eta_{\text{пр}} \right) = 0. \quad (2.8)$$

Так как точка $M_1 \left(x_{M_1}; x_{M_1} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} + \eta_{\text{пр}} \right) \right)$ является точкой защитного кольца, то его радиус можно определить по формуле

$$r = \sqrt{x_{M_1}^2 + y_{M_1}^2} = \frac{\left| x_E \operatorname{tg}\left(\frac{\psi}{2}\right) - y_E \right|}{\sqrt{\operatorname{tg}\left(\frac{\psi}{2}\right)^2 + 1}}. \quad (2.9)$$

На следующем этапе движения ленты стебли увлекаются бичами ротора в молотильное пространство. При этом они отгибаются вниз от своей оси на угол $\eta_{\text{пр}} = \psi/2$, стремясь занять предельное положение по касательной к радиусу ротора R . Такое положение стеблей можно описать уравнением прямой линии

$$y(x) = \operatorname{tg}(\pi - \eta_{\text{пр}})(x - x_E) + y_E, \quad (2.10)$$

а абсциссу точки касания M_2 можно найти из уравнения

$$(x_{M_2} - x_E) \operatorname{tg}(\pi - \eta_{\text{пр}}) + y_E - x_{M_2} \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \eta_{\text{пр}}\right) = 0. \quad (2.11)$$

Так как точка $M_2\left(x_{M_2}; x_{M_2} \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \eta_{\text{пр}}\right)\right)$ является точкой окружности с радиусом ротора R , то его можно определить следующим образом:

$$R = \sqrt{x_{M_2}^2 + y_{M_2}^2} = \frac{\left| x_E \operatorname{tg}(\pi - \eta_{\text{пр}}) - y_E \right|}{\sqrt{\operatorname{tg}(\pi - \eta_{\text{пр}})^2 + 1}}. \quad (2.12)$$

Тогда отношение радиуса ротора к радиусу защитного кольца для принятой схемы взаимного расположения элементов аппарата будет иметь вид

$$\frac{R}{r} = \frac{\left| x_E \operatorname{tg} \eta_{\text{пр}} + y_E \right|}{\left| x_E \operatorname{tg} \eta_{\text{пр}} - y_E \right|}. \quad (2.13)$$

Из зависимости (2.13) видно, что отношение радиусов ротора и защитного кольца зависит от расположения точки E зажимного транспортера и предельного угла $\eta_{\text{пр}}$ отгиба, равного $\psi/2$, при условии, что процесс сопровождается в начале подъемом стеблей вверх на угол $\psi/2$, а затем отгибом их вниз на такой же угол. Обозначив отношение радиуса ротора к радиусу защитного кольца как $R/r = i$.

Продemonстрируем пример расчета безразмерного параметра i в математическом пакете MathCad при фиксированных значениях параметров установки зажимного транспортера ($x_E = -0,36$ м и $y_E = -0,225$ м, полученных для условия компоновки в прицепной льноуборочный комбайн) и предельном значении угла изгиба стеблей льна $\eta_{\text{лр}} = \psi/2 = 17^\circ$ (рис. 2.9).

Mathcad - [Связь констр пар с углом без перевода]

Файл Правка Вид Добавить Формат Инструменты Символика Окно Справка

Normal Arial 10 B I U

Мой сайт Go

$x_E := -0.36$ $y_E := -0.225$ координаты точки зажимного транспортера E, м

$\psi_{\text{лр}} := 17$ угол, град. $\psi := 2 \cdot \psi_{\text{лр}} \cdot \frac{\pi}{180} = 0.593$ угол, рад $x := 0$

$f(x) := \tan\left(\frac{\psi}{2}\right) \cdot (x - x_E) + y_E - \tan\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\psi}{2}\right) \cdot x$ функция, необходимая для нахождения точки касания стеблей с защитным кольцом

$x_{M1} := \text{root}(f(x), x) = 0.032$ $y_{M1} := \tan\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\psi}{2}\right) \cdot x_{M1} = -0.105$ координаты точки касания стеблей с защитного кольцом, м

$r_{\text{кв}} := \sqrt{x_{M1}^2 + y_{M1}^2} = 0.1099$ $r := \frac{|x_E \cdot \tan\left(\frac{\psi}{2}\right) - y_E|}{\sqrt{\tan^2\left(\frac{\psi}{2}\right) + 1}} = 0.11$ радиус кольца, м

$g(x) := \tan\left(\pi - \frac{\psi}{2}\right) \cdot (x - x_E) + y_E - \tan\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\psi}{2}\right) \cdot x$ функция, необходимая для нахождения точки касания стеблей с ротором

$x_{M2} := \text{root}(g(x), x) = -0.094$ $y_{M2} := \tan\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\psi}{2}\right) \cdot x_{M2} = -0.306$ координаты точки касания стеблей с ротором, м

$R_{\text{кв}} := \sqrt{x_{M2}^2 + y_{M2}^2} = 0.3204$ $R := \frac{|x_E \cdot \tan\left(\pi - \frac{\psi}{2}\right) - y_E|}{\sqrt{\tan^2\left(\pi - \frac{\psi}{2}\right) + 1}} = 0.3204$ радиус ротора, м

$\frac{|x_E \cdot \tan\left(\frac{\psi}{2}\right) + y_E|}{|x_E \cdot \tan\left(\frac{\psi}{2}\right) - y_E|} = 2.915$ $\frac{R}{r} = 2.915$ безразмерный параметр, равный отношению радиусаротора к радиусу защитного кольца

Рис. 2.9. Исходные данные и расчетная часть определения безразмерного параметра R/r

По изложенной методике расчета были определены значения параметра i для предельных углов изгиба стеблей льна 15° , 18° , 21° , 24° и 27° .

Графическая интерпретация полученных результатов приведена на рис. 2.10. При этом рассматривались случаи, удовлетворяющие требованию условия (2.6).

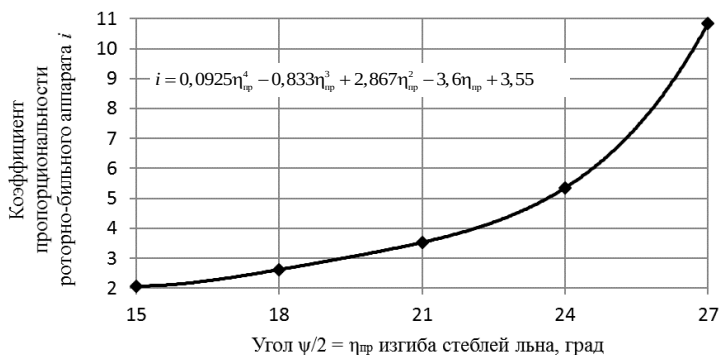


Рис. 2.10. График зависимости коэффициента i от угла $\eta_{\text{пр}}$ изгиба стеблей

Анализ графической зависимости (рис. 2.10) показывает, что зависимость параметра i от угла изгиба в диапазоне $15\text{--}24^\circ$ близка к линейной, а при увеличении угла $\eta_{\text{пр}}$ более 24° резко возрастает. Из этого следует, что решение задачи по установлению значения параметра i требует уточнения предельного значения угла изгиба стеблей льна с учетом характера их деформации при взаимодействии с разрабатываемым устройством.

Для установления зависимости длины бича L_6 от радиуса ротора R при различных углах $\eta_{\text{пр}}$ изгиба стеблей длина бича определялась по формуле (2.5). По результатам расчетов построены графические зависимости (рис. 2.11).

Как видно из рис. 2.11, полученная зависимость для всех значений угла изгиба стеблей имеет линейный характер. Таким образом, для принятой схемы (см. рис. 2.8) с учетом условий (2.3) и (2.4) из зависимости (2.9) следует, что углу изгиба $\eta_{\text{пр}} = 15^\circ$ и длине бича $L_6 = 0,3 \dots 0,35$ м соответствует радиус ротора $R = 0,34 \dots 0,4$ м, а углу изгиба $\eta_{\text{пр}} = 27^\circ$ и длине бича $L_6 = 0,3 \dots 0,35$ м – радиус ротора $R = 0,3 \dots 0,35$ м, что также подчеркивает необходимость уточнения

значения угла изгиба $\eta_{\text{пр}}$. При этом изменению угла изгиба в диапазоне $\eta_{\text{пр}} = 15 \dots 27^\circ$ соответствует радиус ротора, удовлетворяющий требованию условия (2.6), отличается в 1,13–1,14 раза.

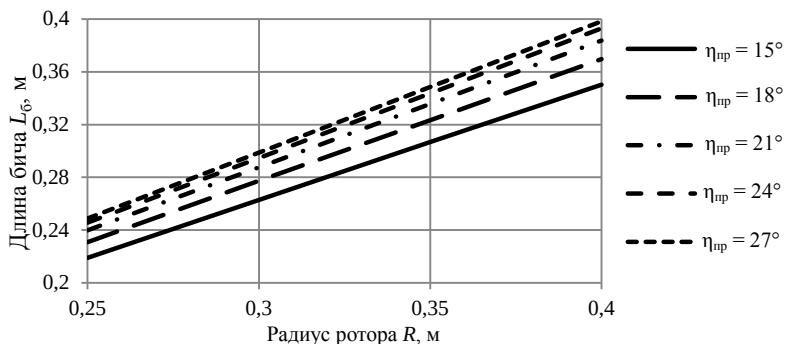


Рис. 2.11. Зависимость длины бича $L_б$ от радиуса ротора R при различных углах $\eta_{\text{пр}}$ изгиба стеблей

Из вышеизложенного следует, что наиболее рациональной схемой расположения элементов роторно-бильного аппарата, обеспечивающей эффективное воздействие их на обмолачиваемый материал с минимальным повреждением стеблей, является вариант со смещением бича вниз на величину r относительно оси ротора параллельным переносом, при котором бич касается ленты льна в начале взаимодействия всей передней поверхностью, не допуская обрыва стеблей. Для уменьшения отгиба стебля горизонтальное смещение зажимного транспортера нецелесообразно из-за существенного увеличения «мертвой» зоны, а его некоторое вертикальное смещение вниз возможно в пределах, обеспечивающих допустимое значение «мертвой» зоны.

Для обеспечения условий минимальных размеров ротора и допустимого значения угла изгиба стебля льна целесообразно обеспечить предварительный подъем стеблей на угол $\eta_{\text{пр}} = \psi/2$ с последующим отгибанием их вниз на такой же угол при затягивании бичами в молотильное пространство. В этом случае отношение радиуса ротора к радиусу защитного кольца зависит от расположения зажимного транспортера и принятого предельного угла изгиба стеблей.

Введенный безразмерный параметр $R/r = i$ является постоянной величиной для принятой схемы компоновки аппарата при фиксированном значении угле $\eta_{\text{пр}}$ изгиба стебля льна.

2.2. Определение конструктивных параметров роторно-бильного аппарата

В результате проведенного обоснования рациональной схемы расположения элементов роторно-бильного аппарата (см. подраздел 2.1) для отделения семенной части от стеблей льна была принята схема, обеспечивающая подъем верхушечной части ленты стеблей перед вводом их в зону обмола [70, 29]. Подъем на величину предельного угла изгиба стеблей льна (в фазу желтой спелости наименьший $\eta_{\text{пр}} = 17^\circ$) обеспечивается за счет изгиба ленты относительно плоскости зажимного транспортера конфигурацией стола. Далее, при обмолае, ротор, воздействуя на стебли льна бичами, изгибает их вниз. Величина этого изгиба относительно плоскости транспортера также не должна превышать $\eta_{\text{пр}}$.

При такой схеме взаимного расположения рабочих органов устройства положение точки E зажимного транспортера (см. рис. 2.8) определяется координатам x_E и y_E .

Абсциссу точки E , т. е. x_E , можно определить по формуле

$$x_E = -R - \delta, \quad (2.14)$$

где R – радиус ротора, м;

δ – технологический зазор между ротором и передней плоскостью зажимного транспортера, м.

С другой стороны, координаты точки $E(x_E; y_E)$ должны удовлетворять уравнениям двух прямых EM_1 и EM_2 , а значит, определяться их пересечением. При этом EM_1 описывается уравнением

$$y = (x - x_{M_1}) \operatorname{tg} \eta_{\text{пр}} + y_{M_1}, \quad (2.15)$$

а EM_2 соответственно –

$$y = -(x - x_{M_2}) \operatorname{tg} \eta_{\text{пр}} + y_{M_2}, \quad (2.16)$$

$$\text{где } x_{M_1} = r \sin \eta_{\text{пр}}; \quad (2.17)$$

$$y_{M_1} = -r \cos \eta_{\text{пр}}; \quad (2.18)$$

$$x_{M_2} = R \sin \eta_{\text{пр}}; \quad (2.19)$$

$$y_{M_2} = -R \cos \eta_{\text{пр}}; \quad (2.20)$$

r, R – радиусы соответственно защитного кольца и ротора, м.

Тогда, приравняв правые части равенств (2.15) и (2.16), получим уравнение

$$(x - x_{M_1}) \operatorname{tg} \eta_{\text{np}} + y_{M_1} = -(x - x_{M_2}) \operatorname{tg} \eta_{\text{np}} + y_{M_2}, \quad (2.21)$$

из которого могут быть определены координаты точки E зажимного транспортера:

$$x_E = \frac{(r - R) \cos \eta_{\text{np}} + (R + r) \sin \eta_{\text{np}} \operatorname{tg} \eta_{\text{np}}}{2 \operatorname{tg} \eta_{\text{np}}}, \quad (2.22)$$

а y_E – путем подстановки результата вычисления x_E вместо x в формулу (2.15) или (2.16).

Проанализировав формулы (2.14) и (2.22), можно сделать вывод о том, что технологический зазор между ротором и передней плоскостью зажимного транспортера δ может быть определен по формуле

$$\delta = -(x_E + R) = -\left(\frac{(r - R) \cos \eta_{\text{np}} + (R + r) \sin \eta_{\text{np}} \operatorname{tg} \eta_{\text{np}}}{2 \operatorname{tg} \eta_{\text{np}}} + R \right). \quad (2.23)$$

Как видно, он зависит от радиусов защитного кольца и ротора и значения предельного угла изгиба стеблей.

С другой стороны, в подразделе 2.1 нами было показано, что отношение радиуса ротора к радиусу защитного кольца для принятой схемы взаимного расположения элементов устройства определяется формулой

$$i = \frac{R}{r} = \frac{|x_E \operatorname{tg} \eta_{\text{np}} + y_E|}{|x_E \operatorname{tg} \eta_{\text{np}} - y_E|}. \quad (2.24)$$

Это позволяет сделать вывод о том, что безразмерный параметр i будет являться параметром подобия обмолачивающих устройств, сконструированных по предлагаемой схеме компоновки оборудования. Если учесть в формуле (2.24) соотношения (2.17), (2.18), (2.19), (2.20) и (2.22), то она примет вид

$$i = \frac{r \cos \eta_{\text{np}} + \operatorname{tg} \eta_{\text{np}} (R + \delta + r \sin \eta_{\text{np}}) + \operatorname{tg} \eta_{\text{np}} (R + \delta)}{r \cos \eta_{\text{np}} + \operatorname{tg} \eta_{\text{np}} (R + \delta + r \sin \eta_{\text{np}}) - \operatorname{tg} \eta_{\text{np}} (R + \delta)}. \quad (2.25)$$

Выразим из формулы (2.25) радиус ротора:

$$R = - \frac{2\delta \operatorname{tg} \eta_{\text{пр}} + r \cos \eta_{\text{пр}} + r \sin \eta_{\text{пр}} \operatorname{tg} \eta_{\text{пр}} - r \cos \eta_{\text{пр}} - ir \sin \eta_{\text{пр}} \operatorname{tg} \eta_{\text{пр}}}{2 \operatorname{tg} \eta_{\text{пр}}}. \quad (2.26)$$

Поступающая на обмолот лента содержит в верхушечной части растений семенные коробочки (см. рис. 2.8). Величина зоны $L_{\text{ск}}$ их расположения в стеблестое на корню составляет 0,25–0,35 м, а в обмолачиваемой ленте льна из-за растянутости и неодинаковой длины растений она составляет 0,30–0,40 м, а при работе на полеглом стеблестое достигает 0,56 м [164].

Отделение семенной части от стеблей осуществляется на участке AB , длина которого равна a . Ширина «мертвой» зоны $L_{\text{мз}}$ равна расстоянию от переднего края зажимного транспортера (точка E) до точки B ротора, наиболее удаленной от оси вращения O . Чем больше a и меньше $L_{\text{мз}}$, тем полнее будет обмолот, особенно короткостебельного льна. Ширина активной зоны аппарата a должна быть больше или равна ширине зоны расположения семенных коробочек в ленте $L_{\text{ск}}$, т. е.

$$a \geq L_{\text{ск}}. \quad (2.27)$$

Поскольку ротор 2 с бичами 3 в процессе работы осуществляет вращательное движение вокруг оси O , то при большом значении величины EA , соответствующей длине $L_{\text{об}}$ стебля льна от места зажима до вершины, стебель может наматываться на защитное кольцо 4, что приводит к нарушению технологического процесса. Условие ненаматывания можно записать как

$$\frac{(\delta + R + r \sin \eta_{\text{пр}})}{\cos \eta_{\text{пр}}} + 2\pi r \geq L_{\text{об}} \kappa, \quad (2.28)$$

где δ – технологический зазор между ротором и передней плоскостью зажимного транспортера, м;

$L_{\text{об}}$ – длина стебля льна от места зажима до вершины, м;

κ – коэффициент удлинения стеблей в ленте льна, обусловленного выравниванием стеблей при прочесе ленты и растяжением под воздействием бича.

Неравенство (2.28) с учетом выражения (2.26) примет вид

$$\frac{\left(\delta - \frac{\left(\frac{2\delta \operatorname{tg} \eta_{\text{np}} + r \cos \eta_{\text{np}} + r \sin \eta_{\text{np}} \operatorname{tg} \eta_{\text{np}}}{2 \operatorname{tg} \eta_{\text{np}}} - \frac{ir \cos \eta_{\text{np}} - ir \sin \eta_{\text{np}} \operatorname{tg} \eta_{\text{np}}}{2 \operatorname{tg} \eta_{\text{np}}} \right)}{\cos \eta_{\text{np}}} + r \sin \eta_{\text{np}} \right)}{\cos \eta_{\text{np}}} + 2\pi r \geq L_{\text{об}} \kappa. \quad (2.29)$$

Для некоторого граничного значения длины $L_{\text{об}}$ стебля льна от места зажима (точка E) до вершины неравенство (2.29) запишем в виде

$$\frac{\left(\delta - \frac{\left(\frac{2\delta \operatorname{tg} \eta_{\text{np}} + r \cos \eta_{\text{np}} + r \sin \eta_{\text{np}} \operatorname{tg} \eta_{\text{np}}}{2 \operatorname{tg} \eta_{\text{np}}} - \frac{ir \cos \eta_{\text{np}} - ir \sin \eta_{\text{np}} \operatorname{tg} \eta_{\text{np}}}{2 \operatorname{tg} \eta_{\text{np}}} \right)}{\cos \eta_{\text{np}}} + r \sin \eta_{\text{np}} \right)}{\cos \eta_{\text{np}}} + 2\pi r = L_{\text{об}} \kappa \quad (2.30)$$

и решим относительно радиуса r защитного кольца:

$$r = \frac{2L_{\text{об}} \kappa \cos \eta_{\text{np}} \operatorname{tg} \eta_{\text{np}}}{\sin \eta_{\text{np}} \operatorname{tg} \eta_{\text{np}} - \cos \eta_{\text{np}} + i \cos \eta_{\text{np}} + i \sin \eta_{\text{np}} \operatorname{tg} \eta_{\text{np}} + 4\pi \cos \eta_{\text{np}} \operatorname{tg} \eta_{\text{np}}}. \quad (2.31)$$

Выражение (2.31) позволяет определить наименьшее значение радиуса защитного кольца. Для его определения при принятой схеме взаимного расположения элементов устройства, обеспечивающей деление угла ψ пополам ($\eta_{\text{np}} = \psi/2$), необходимо установить значение эмпирического коэффициента κ и уточнить значение параметра i .

Приведем пример моделирования конструктивных параметров предлагаемого роторно-бильного аппарата в математическом пакете MathCad (рис. 2.12). Для этого примем $i = 0,0925 \eta_{\text{np}}^4 - 0,8333 \eta_{\text{np}}^3 + 2,8675 \eta_{\text{np}}^2 - 3,6067 \eta_{\text{np}} + 3,55$ (соответствующее наименьшему предельному углу изгиба стеблей льна), $\eta_{\text{np}} = 17^\circ$ (значение согласно [44], исключающее повреждение стеблей льна при комбайновом способе уборки), $L_{\text{об}} = 1,09$ м (принята с учетом максимально возможной зоны расположения коробочек в стеблестое и растянутости ленты льна).

Mathcad - [Расчет радиусов ротора и защитного кольца РЕД]

File Edit View Insert Format Tools Symbolics Window Help

Normal Arial 10 B I U

$L_{об} := 1.09$ длина стебля льна от места зажима до верхушки, м;

$\eta_{пр} := 17 \cdot \frac{\pi}{180} = 0.297$ предельный угол изгиба стебля льна, рад.

Коэффициент пропорциональности роторно-бильного аппарата по формуле

$i := 0.0925 \cdot \eta_{пр}^4 - 0.8333 \cdot \eta_{пр}^3 + 2.8675 \cdot \eta_{пр}^2 - 3.6067 \cdot \eta_{пр} + 3.55 = 2.711$

$\delta := 0.04$ технологический зазор между ротором и передней плоскостью зажимного транспортера

$k := -0.002 \cdot L_{об}^2 + 0.0162 \cdot L_{об} + 1.0385$ коэффициент учитывающий удлинение стеблей в ленте льна

Радиус защитного кольца роторно-бильного аппарата определим по выражению

$$\frac{2 \cdot L_{об} \cdot k \cdot \cos(\eta_{пр}) \cdot \tan(\eta_{пр})}{\sin(\eta_{пр}) \cdot \tan(\eta_{пр}) - \cos(\eta_{пр}) + i \cdot \cos(\eta_{пр}) + i \cdot \sin(\eta_{пр}) \cdot \tan(\eta_{пр}) + 4 \cdot \pi \cdot \cos(\eta_{пр}) \cdot \tan(\eta_{пр})} = 0.119$$

В дальнейших расчетах принимаем $r := 0.12$ м

Радиус ротор роторно-бильного аппарата определим по выражению

$$\frac{r \cdot \cos(\eta_{пр}) \cdot \tan(\eta_{пр})^2 + 2 \cdot \delta \cdot \tan(\eta_{пр}) + r \cdot \cos(\eta_{пр})}{\cos(\eta_{пр}) \cdot \tan(\eta_{пр})^2 - 2 \cdot \tan(\eta_{пр}) + \cos(\eta_{пр})} = 0.345$$

Рис. 2.12. Исходные данные и расчетная часть определения конструктивных параметров предлагаемого роторно-бильного аппарата

Расчеты показывают, что при фиксированных параметрах i , $\eta_{пр}$ и $L_{об}$ радиус защитного кольца может быть принят $r = 0,120$ м, а радиус ротора – $R = 0,345$ м.

2.3. Определение геометрических параметров бича

При работе роторно-бильного аппарата захваченная бичом порция стеблей льна протаскивается в молотильное пространство, сформированное бичами ротора и боковой декой. Форма и размер бича определяют объем захватываемой порции стеблей льна, а также характер взаимодействия бича со стеблями.

Бич ротора имеет сложную форму и несколько рабочих поверхностей, выполняющих разные функции. Он представляет собой объемную многогранную фигуру. Выделим основные (рабочие) поверхности (грани) бича. К ним следует отнести переднюю, боковую и торцевую поверхности (рис. 2.12). Передняя поверхность бича наклонена по отношению к плоскости диска на некоторый угол α_n , что позволит обеспечить гарантированный захват стеблей в начале взаимодействия с лентой льна, а по мере продвижения в подроторное пространство – их скольжение по поверхности. Боковая поверхность бича наклонена по отношению к плоскости вращения ротора на некоторый угол α_b , что обеспечивает вытирание семенных коробочек льна о боковую часть деки.

Поместим предполагаемую фигуру бича, установленного на роторе согласно принятой схеме (см. рис. 2.8) [70], в систему координат таким образом, чтобы центр координат находился в центре вращения ротора O (рис. 2.13).

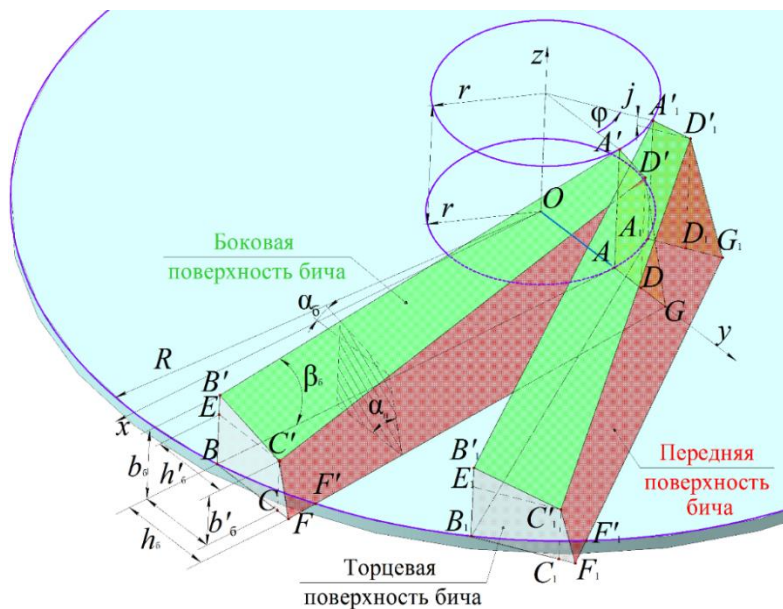


Рис. 2.13. Схема к определению основных параметров бича

При описании поверхностей и ребер бича использовались сведения из аналитической геометрии.

Плоскость, проходящую через три заданные точки $M_1(x_1; y_1; z_1)$, $M_2(x_2; y_2; z_2)$, $M_3(x_3; y_3; z_3)$, можно описать уравнением

$$\begin{pmatrix} x-x_1 & y-y_1 & z-z_1 \\ x_2-x_1 & y_2-y_1 & z_2-z_1 \\ x_3-x_1 & y_3-y_1 & z_3-z_1 \end{pmatrix} = 0, \quad (2.32)$$

где x, y, z – произвольные координаты текущей точки $M(x; y; z)$ этой плоскости.

$$\frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{z-z_1}{z_2-z_1}. \quad (2.33)$$

Координаты характерных точек бича можно определить как

$$A = (0; r; 0); \quad (2.34)$$

$$A' = \left(0; r; \left(b_6 + \sqrt{R^2 - r^2} \operatorname{tg} \beta_6 \right) \right); \quad (2.35)$$

$$B = \left(\sqrt{R^2 - r^2}; r; 0 \right); \quad (2.36)$$

$$B' = \left(\sqrt{R^2 - r^2}; r; b_6' \right); \quad (2.37)$$

$$C = \left(\sqrt{R^2 - r^2}; r + h_6'; 0 \right); \quad (2.38)$$

$$C' = \left(\sqrt{R^2 - r^2}; r + h_6'; b_6' \right); \quad (2.39)$$

$$D = \left(0; \left(r + \frac{j}{\operatorname{tg} \alpha_6} \right); 0 \right); \quad (2.40)$$

$$D' = \left(0; \left(r + \frac{j}{\operatorname{tg} \alpha_6} \right); \left(b_6 + \sqrt{R^2 - r^2} \operatorname{tg} \beta_6 - j \right) \right); \quad (2.41)$$

$$F = \left(\sqrt{R^2 - r^2}; r + h_6; 0 \right); \quad (2.42)$$

$$G = (0; r + h_6; 0), \quad (2.43)$$

где r – радиус защитного кольца, м;

b_6 – ширина торцевой поверхности бича, м;

R – радиус ротора, м;

β_6 – угол между ребрами задней поверхности бича (продольный угол наклона боковой поверхности к плоскости диска), рад;

h'_6 – высота прямоугольной части торцевой поверхности бича на пересечении передней и боковой поверхностей, м;

b'_6 – ширина прямоугольной части торцевой поверхности бича на пересечении передней и боковой поверхностей, м;

j – разность высот концов ребер боковой поверхности возле защитного кольца, м;

α_6 – угол между боковой поверхностью бича и плоскостью вращения ротора (поперечный угол наклона боковой поверхности бича к плоскости диска), рад;

h_6 – высота торцевой поверхности бича, м.

Математическая модель передней грани $D'C'FG$ с учетом уравнений (2.32), (2.41), (2.42) и (2.43) будет иметь вид

$$\begin{aligned} & (r^3 \operatorname{tg} \beta_6 - R^2 r \operatorname{tg} \beta_6 - R^2 h_6 \operatorname{tg} \beta_6 + r^2 h_6 \operatorname{tg} \beta_6 + jr \sqrt{R^2 - r^2} + jh_6 \sqrt{R^2 - r^2} - \\ & - rb_6 \sqrt{R^2 - r^2} - b_6 h_6 \sqrt{R^2 - r^2} + h_6 z \sqrt{R^2 - r^2} - jz \operatorname{ctg} \alpha_6 \sqrt{R^2 - r^2}) / \\ & / \left(R^2 \operatorname{tg} \beta_6 - r^2 \operatorname{tg} \beta_6 - j \sqrt{R^2 - r^2} + b_6 \sqrt{R^2 - r^2} \right) = 0. \end{aligned} \quad (2.44)$$

Математическая модель нижней грани $DGF'C$ с учетом уравнений (2.32), (2.38), (2.40) и (2.43) будет иметь вид

$$-z \sqrt{R^2 - r^2} (h_6 - h'_6) = 0. \quad (2.45)$$

Математическая модель боковой грани $A'B'C'D'$ с учетом выражений (2.32), (2.35), (2.37) и (2.39) будет иметь вид

$$\begin{aligned} & r^2 h'_6 \operatorname{tg} \beta_6 - R^2 h'_6 \operatorname{tg} \beta_6 - rb'_6 \sqrt{R^2 - r^2} + rb'_6 \sqrt{R^2 - r^2} - b_6 h'_6 \sqrt{R^2 - r^2} + \\ & + b_6 y \sqrt{R^2 - r^2} - b'_6 y \sqrt{R^2 - r^2} + h'_6 z \sqrt{R^2 - r^2} + h'_6 x \operatorname{tg} \beta_6 \sqrt{R^2 - r^2} = 0, \end{aligned} \quad (2.46)$$

а с учетом выражений (2.32), (2.35), (2.37) и (2.41) уравнение грани $A'B'C'D'$ будет иметь вид

$$(jr^2 \operatorname{tg} \beta_6 - R^2 j \operatorname{tg} \beta_6 - jb_6 \sqrt{R^2 - r^2} + jz \sqrt{R^2 - r^2} - jr \operatorname{tg} \alpha_6 \sqrt{R^2 - r^2} + jx \operatorname{tg} \beta_6 \sqrt{R^2 - r^2} + jy \operatorname{tg} \alpha_6 \sqrt{R^2 - r^2}) \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_6} = 0. \quad (2.47)$$

Математическая модель задней грани $AA'B'B$ с учетом уравнений (2.32), (2.34), (2.35) и (2.36) будет иметь вид

$$r^3 \operatorname{tg} \beta_6 - R^2 r \operatorname{tg} \beta_6 + R^2 y \operatorname{tg} \beta_6 - r^2 y \operatorname{tg} \beta_6 - rb_6 \sqrt{R^2 - r^2} + b_6 y \sqrt{R^2 - r^2} = 0. \quad (2.48)$$

Математическая модель внешней торцевой грани $B'BFC'$ с учетом уравнений (2.32), (2.36), (2.37) и (2.42) будет иметь вид

$$b_6 h_6 x - b_6 h_6 \sqrt{R^2 - r^2} = 0. \quad (2.49)$$

Торцевая грань, по сути, не является рабочей поверхностью, она в данном случае выполняет вспомогательную функцию. Она параллельна плоскости zOy и проходит через точку B (точка пересечения нижнего ребра задней поверхности бича и наружной окружности диска ротора). Формирование действительной торцевой поверхности выполним перемещением высоты BB' по кривой BF' .

Математическая модель внутренней торцевой грани $AA'D'G$ с учетом уравнений (2.32), (2.34), (2.35) и (2.43) будет иметь вид

$$b_6 h_6 x + h_6 x \operatorname{tg} \beta_6 \sqrt{R^2 - r^2} = 0. \quad (2.50)$$

Пересечение граней бича формирует его ребра. Уравнения ребер бича определим как прямые, проходящие через две заданные точки.

Уравнение ребра GD' будет иметь вид

$$z = \frac{\operatorname{tg} \alpha_6 (b_6 - j + \operatorname{tg} \beta_6 \sqrt{R^2 - r^2})}{j - h_6 \operatorname{tg} \alpha_6} y - \frac{(r + h_6) \operatorname{tg} \alpha_6 (b_6 - j + \operatorname{tg} \beta_6 \sqrt{R^2 - r^2})}{j - h_6 \operatorname{tg} \alpha_6}. \quad (2.51)$$

Уравнения ребер AG, AA', BF, BB' соответственно:

$$\begin{aligned} z &= 0; x = 0; y \text{ от } r \text{ до } r + h_6; \\ y &= r; x = 0; z \text{ от } 0 \text{ до } b_6 + \sqrt{R^2 - r^2} \operatorname{tg} \beta_6; \\ x &= \sqrt{R^2 - r^2}; y \text{ от } 0 \text{ до } h_6; z = 0; \\ x &= \sqrt{R^2 - r^2}; z \text{ от } 0 \text{ до } b_6; y = r. \end{aligned}$$

Уравнение ребра $A'B'$

$$z = b_6 - \operatorname{tg} \beta_6 x + \sqrt{R^2 - r^2} \operatorname{tg} \beta_6. \quad (2.52)$$

Уравнение ребра $B'C'$

$$z = \frac{(b_6 - b'_6)}{h'_6} (y - r) + b_6 \quad (2.53)$$

при $x = \sqrt{R^2 - r^2}$.

Уравнение ребра FC'

$$z = - \left(\frac{b'_6}{h_6 - h'_6} \right) [y - (r + h_6)] \quad (2.54)$$

при $x = \sqrt{R^2 - r^2}$.

Уравнение ребра AB $y = r; z = 0; x$ от 0 до $\sqrt{R^2 - r^2}$.

Уравнение ребра $C'D'$

$$\frac{x}{\sqrt{R^2 - r^2}} = \frac{r - y + \frac{j}{\operatorname{tg} \alpha_6}}{h'_6 - \frac{j}{\operatorname{tg} \alpha_6}} = \frac{j - b_6 + z - \operatorname{tg} \beta_6 \sqrt{R^2 - r^2}}{j - b_6 + b'_6 - \operatorname{tg} \beta_6 \sqrt{R^2 - r^2}}. \quad (2.55)$$

Уравнение ребра FG

$$y - h_6 - r = 1 - \frac{x}{\sqrt{R^2 - r^2}}. \quad (2.56)$$

Для определения координат характерных точек второго (смежного) бича введем дополнительные параметры (рис. 2.14):

– угол χ_2 между радиус-вектором точки F_1 и осью Ox , определяемый как

$$\cos \chi_2 = \frac{\sqrt{R^2 - r^2}}{\sqrt{(R^2 - r^2) + (r + h_6)^2}}$$

или

$$\chi_1 = \arccos \left[\frac{\sqrt{R^2 - r^2}}{\sqrt{(R^2 - r^2) + (r + h_6)^2}} \right]; \quad (2.59)$$

– угол φ , определяемый как

$$\varphi = \frac{2\pi}{k_6}, \quad (2.60)$$

где k_6 – количество бичей ротора, шт.

В таком случае координаты характерных точек второго бича можно записать как

$$A_1 = (-r \sin \varphi; r \cos \varphi; 0); \quad (2.61)$$

$$A'_1 = \left(-r \sin \varphi; r \cos \varphi; \left(b_6 + \sqrt{R^2 - r^2} \operatorname{tg} \beta_6 \right) \right); \quad (2.62)$$

$$B_1 = (R \sin(\chi + \varphi); R \cos(\chi + \varphi); 0); \quad (2.63)$$

$$B'_1 = (R \sin(\chi + \varphi); R \cos(\chi + \varphi); b_6); \quad (2.64)$$

$$C_1 = \begin{pmatrix} \sqrt{(R^2 - r^2) + (r + h'_6)^2} \sin(\chi + \varphi); \\ \sqrt{(R^2 - r^2) + (r + h'_6)^2} \cos(\chi + \varphi); \\ 0 \end{pmatrix}; \quad (2.65)$$

$$C'_1 = \begin{pmatrix} \sqrt{(R^2 - r^2) + (r + h'_6)^2} \sin(\chi + \varphi); \\ \sqrt{(R^2 - r^2) + (r + h'_6)^2} \cos(\chi + \varphi); \\ b'_6 \end{pmatrix}; \quad (2.66)$$

$$D = \left(\left(r + \frac{j}{\operatorname{tg} \alpha_6} \right) \sin \varphi; \left(r + \frac{j}{\operatorname{tg} \alpha_6} \right) \cos \varphi; 0 \right); \quad (2.67)$$

$$D' = \begin{pmatrix} \left(r + \frac{j}{\operatorname{tg} \alpha_6} \right) \sin \varphi; \\ \left(r + \frac{j}{\operatorname{tg} \alpha_6} \right) \cos \varphi; \\ \left(b_6 + \sqrt{R^2 - r^2} \operatorname{tg} \beta_6 - j \right) \end{pmatrix}; \quad (2.68)$$

$$F_1 = \begin{pmatrix} \sqrt{(R^2 - r^2) + (r + h_6)} \sin \varphi; \\ \sqrt{(R^2 - r^2) + (r + h_6)} \cos \varphi; \\ 0 \end{pmatrix}; \quad (2.69)$$

$$G_1 = ((r + h_6) \sin \varphi; (r + h_6) \cos \varphi; 0). \quad (2.70)$$

Математическая модель боковой грани $A_1B_1C_1D_1$ с учетом уравнений (2.32), (2.62), (2.64) и (2.68) будет иметь вид

$$\begin{aligned} & Rjy \cos \left(\frac{2\pi + \chi k_6}{k_6} \right) - Rjx \sin \left(\frac{2\pi + \chi k_6}{k_6} \right) - Rjr \cos \chi + jrx \cos \left(\frac{2\pi}{k_6} \right) + \\ & + jry \sin \left(\frac{2\pi}{k_6} \right) - Rjb_6 \cos \chi \operatorname{ctg} \alpha_6 + Rjz \cos \chi \operatorname{ctg} \alpha_6 - \\ & - Rj \cos \chi \operatorname{ctg} \alpha_6 \operatorname{tg} \beta_6 \sqrt{R^2 - r^2} + jx \cos \left(\frac{2\pi}{k_6} \right) \operatorname{ctg} \alpha_6 \operatorname{tg} \beta_6 \sqrt{R^2 - r^2} + \\ & + jy \sin \left(\frac{2\pi}{k_6} \right) \operatorname{ctg} \alpha_6 \operatorname{tg} \beta_6 \sqrt{R^2 - r^2} = 0. \end{aligned} \quad (2.71)$$

Поскольку символьное выражение получаемых уравнений граней бича громоздкое и данными формулами в приведенном виде пользоваться довольно проблематично, для определения параметров бичей

была разработана программа расчета в системе компьютерной алгебры MathCAD-15 (рис. 2.15–2.20), в которой в качестве исходных данных выступают радиусы ротора и защитного кольца, ширина b_6 торцевой поверхности бича, поперечный угол α_6 наклона боковой поверхности бича, поперечный угол α_n наклона передней поверхности бича, продольный угол β_6 наклона боковой поверхности к плоскости диска.

БЛОК ИСХОДНЫХ ДАННЫХ (задаются)

$r := 0.12$ радиус защитного кольца, м

$\psi_{\text{град}} := 34$ $\psi := \psi_{\text{град}} \cdot \frac{\pi}{180} = 0.593$ суммарный угол изгиба стеблей пня

$\delta := 0.04$ технологический зазор между ротором и передней плоскостью зажимного транспортера, м

$R := \frac{r \cdot \cos\left(\frac{\psi}{2}\right) \cdot \tan\left(\frac{\psi}{2}\right)^2 + 2 \cdot \delta \cdot \tan\left(\frac{\psi}{2}\right) + r \cdot \cos\left(\frac{\psi}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\psi}{2}\right) \cdot \tan\left(\frac{\psi}{2}\right)^2 - 2 \cdot \tan\left(\frac{\psi}{2}\right) + \cos\left(\frac{\psi}{2}\right)} = 0.3453$ радиус ротора, м

$\beta_{\text{град}} := 12$ $\beta := \frac{\beta_{\text{град}} \cdot \pi}{180} = 0.209$ продольный угол наклона боковой поверхности бича к плоскости диска

$\alpha_{n\text{град}} := 80$ $\alpha_n := \frac{\alpha_{n\text{град}} \cdot \pi}{180} = 1.396$ поперечный угол наклона передней поверхности бича

$\alpha_{6\text{град}} := 27.31$ $\alpha_6 := \frac{\alpha_{6\text{град}} \cdot \pi}{180} = 0.477$ поперечный угол наклона боковой поверхности бича

$b_6 := 0.055$ ширина торцевой поверхности бича, м

$k_6 := 12$ количество установленных на роторе бичей, шт

$h_6 := 0.04$ высота торцевой поверхности бича, м

Рис. 2.15. Исходные данные к расчету параметров бичей ротора

Mathcad - [максим расположение двух лопастей (для печати)]

File Edit View Insert Format Tools Symbolics Window Help

Normal Arial 10 B I U

My Site Go

БЛОК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАННЫХ НА ОСНОВАНИИ ИСХОДНЫХ

$$b'_6 := \frac{b_6 \tan(\alpha_n) - h_6 \tan(\alpha_6) \cdot \tan(\alpha_n)}{\tan(\alpha_6) - \tan(\alpha_n)} = 0.03779 \quad h'_6 := h_6 - \frac{b'_6}{\tan(\alpha_n)} = 0.033$$

$$\frac{b'_6}{h_6 - h'_6} = \frac{b_6 + \sqrt{R^2 - r^2} \cdot \tan(\beta_6) - j}{h_6 - \frac{j}{\tan(\alpha_6)}} \quad j := \frac{b_6 + \tan(\beta_6) \cdot \sqrt{R^2 - r^2} - \frac{h_6 \cdot b'_6}{h_6 - h'_6}}{\frac{b'_6}{\tan(\alpha_6) \cdot (h_6 - h'_6)} - 1} = 0.0103$$

$$j_v := \frac{\tan(\alpha_6) \cdot (b_6 \cdot h'_6 - b'_6 \cdot h_6 + h_6 \cdot b'_6 - h_6 \tan(\beta_6) \cdot \sqrt{R^2 - r^2} + h'_6 \tan(\beta_6) \cdot \sqrt{R^2 - r^2})}{b'_6 - h_6 \tan(\alpha_6) + h'_6 \tan(\alpha_6)} = 0.0103$$

$$k_6 := \frac{b'_6}{b_6} = 0.687 \quad \text{коэффициент захвата бича}$$

углы характерных точек бича

$$\varphi := \frac{2 \cdot \pi}{k_6} = 0.524 \quad \text{угол в радианах между бичами}$$

$$X := \arccos\left(\frac{\sqrt{R^2 - r^2}}{R}\right) = 0.355 \quad \text{угол между радиус-вектором точки В и его проекцией на ось Ох}$$

$$X_1 := \arccos\left[\frac{\sqrt{R^2 - r^2}}{\sqrt{(R^2 - r^2) + (r + h'_6)^2}}\right] = 0.442 \quad \text{угол между радиус-вектором точки С и его проекцией на ось Ох}$$

$$X_2 := \arccos\left[\frac{\sqrt{R^2 - r^2}}{\sqrt{(R^2 - r^2) + (r + h_6)^2}}\right] = 0.459 \quad \text{угол между радиус-вектором точки F и его проекцией на ось Ох}$$

$$b_6 + \sqrt{R^2 - r^2} \cdot \tan(\beta_6) = 0.124 \quad \text{высота защитного копытца защиты}$$

Рис. 2.16. Блок определения данных на основании исходных

Mathcad - [максим расположение двух лопастей (для печати)]

File Edit View Insert Format Tools Symbolics Window Help

Normal Arial 10 B I U

Проверка расчетов параметров бича 1

$$A'A := A' - A = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.124 \end{pmatrix} \quad |A'A| = 0.1238 \quad \sqrt{R^2 - r^2} \cdot \tan(\beta_6) + b_6 = 0.1238$$

$$AB := B - A = \begin{pmatrix} 0.324 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad |AB| = 0.3238 \quad \sqrt{R^2 - r^2} = 0.3238$$

$$A'B' := B' - A' = \begin{pmatrix} 0.324 \\ 0 \\ -0.069 \end{pmatrix} \quad |A'B'| = 0.331 \quad BB' := B' - B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.055 \end{pmatrix} \quad |BB'| = 0.055$$

$$B'C' := C' - B' = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.033 \\ -0.017 \end{pmatrix} \quad |B'C'| = 0.03752 \quad BC := C - B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.033 \\ 0 \end{pmatrix} \quad |BC| = 0.03334$$

$$CF := F - C = \begin{pmatrix} 0 \\ 6.663 \times 10^{-3} \\ 0 \end{pmatrix} \quad |CF| = 6.663 \times 10^{-3} \quad h_6 - h'_6 = 6.663 \times 10^{-3}$$

$$CF := F - C' = \begin{pmatrix} 0 \\ 6.663 \times 10^{-3} \\ -0.038 \end{pmatrix} \quad |CF| = 0.03837 \quad \sqrt{b'_6{}^2 + (h_6 - h'_6)^2} = 0.03837$$

$$FG := F - G = \begin{pmatrix} 0.324 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad |FG| = 0.324 \quad \sqrt{R^2 - r^2} = 0.3238$$

$$CD' := D' - C' = \begin{pmatrix} -0.324 \\ -0.013 \\ 0.076 \end{pmatrix} \quad |CD'| = 0.333 \quad D'G := G - D' = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.02 \\ -0.114 \end{pmatrix} \quad |D'G| = 0.115$$

$$DD' := D - D' = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -0.114 \end{pmatrix} \quad |A'A| - |DD'| = 0.0103 \quad j = 0.0103$$

$$D'A := A - D' = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.02 \\ -0.114 \end{pmatrix} \quad |D'A| = 0.115 \quad |F - B| = 0.04 \quad AG := G - A = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.04 \\ 0 \end{pmatrix} \quad |AG| = 0.04$$

Рис. 2.17. Блок проверки расчета параметров бича 1



Проверка расчетов параметров бича 2

$$A1'A1 := A1' - A1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.124 \end{pmatrix} \quad |A1'A1| = 0.1238 \quad \sqrt{R^2 - r^2 \cdot \tan(\beta_6)} + b_6 = 0.1238$$

$$A1B1 := B1 - A1 = \begin{pmatrix} 0.28 \\ 0.162 \\ 0 \end{pmatrix} \quad |A1B1| = 0.3238 \quad \sqrt{R^2 - r^2} = 0.3238$$

$$A1'B1' := B1' - A1' = \begin{pmatrix} 0.28 \\ 0.162 \\ -0.069 \end{pmatrix} \quad |A1'B1'| = 0.331 \quad |A'B'| = 0.331$$

$$B1B1' := B1' - B1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.055 \end{pmatrix} \quad |B1B1'| = 0.055 \quad |B'B'| = 0.055$$

$$B1C1 := C1 - B1 = \begin{pmatrix} -0.017 \\ 0.029 \\ 0 \end{pmatrix} \quad |B1C1| = 0.03334 \quad h'_6 = 0.03334$$

$$B1'C1' := C1' - B1' = \begin{pmatrix} -0.017 \\ 0.029 \\ -0.017 \end{pmatrix} \quad |B1'C1'| = 0.03752 \quad |B'C'| = 0.03752$$

$$C'C := C - C' = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -0.038 \end{pmatrix} \quad |C'C| = 0.03779 \quad b'_6 = 0.03779$$

$$D1'D1 := D1 - D1' = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -0.114 \end{pmatrix} \quad |A1'A1| - |D1'D1| = 0.0103 \quad j = 0.01032 \quad |D1'D1| = 0.114$$

$$D1'A1 := A1 - D1' = \begin{pmatrix} 9.993 \times 10^{-3} \\ -0.017 \\ -0.114 \end{pmatrix} \quad |D1'A1| = 0.115 \quad |D'A| = 0.115$$

$$C1'F1 := F1 - C1' = \begin{pmatrix} -3.331 \times 10^{-3} \\ 5.77 \times 10^{-3} \\ -0.038 \end{pmatrix} \quad |C1'F1| = 0.03837 \quad |CF| = 0.03837$$

$$C1F1 := F1 - C1 = \begin{pmatrix} -3.331 \times 10^{-3} \\ 5.77 \times 10^{-3} \\ 0 \end{pmatrix} \quad |C1F1| = 0.00666 \quad h_6 - h'_6 = 0.00666 \quad |CF| = 0.00666$$

$$\sqrt{b'_6{}^2 + (h_6 - h'_6)^2} = 0.03837$$

Рис. 2.19. Блок проверки расчета параметров бича 2

Mathcad - [maksim расположение двух лопастей (для печати)]

File Edit View Insert Format Tools Symbolics Window Help

Normal Arial 10 B I U

$|F1 - B1| = 0.04$
 $A1G1 := G1 - A1 = \begin{pmatrix} -0.02 \\ 0.035 \\ 0 \end{pmatrix}$
 $|A1G1| = 0.04$
 $h_6 = 0.04$

$F1G1 := F1 - G1 = \begin{pmatrix} 0.28 \\ 0.162 \\ 0 \end{pmatrix}$
 $|F1G1| = 0.324$
 $\sqrt{R^2 - r^2} = 0.3238$

$C1'D1' := D1' - C1' = \begin{pmatrix} -0.274 \\ -0.173 \\ 0.076 \end{pmatrix}$
 $|C1'D1'| = 0.333$
 $D1'G1 := G1 - D1' = \begin{pmatrix} -0.01 \\ 0.017 \\ -0.114 \end{pmatrix}$

$|D1'G1| = 0.115$

$R \cdot \cos(\chi) = 0.324$
 $R \cdot \sin(\chi) = 0.12$

$\sqrt{(R^2 - r^2) + (r + h_6')^2} \cdot \cos(\chi_1) = 0.324$
 $\sqrt{(R^2 - r^2) + (r + h_6')^2} \cdot \sin(\chi_1) = 0.153$

$\sqrt{(R^2 - r^2) + (r + h_6)^2} \cdot \cos(\chi_2) = 0.324$
 $\sqrt{(R^2 - r^2) + (r + h_6)^2} \cdot \sin(\chi_2) = 0.16$

Рис. 2.20. Блок проверки расчета параметров бича 2

Для определения параметров бича как объемной фигуры необходимо определить параметры исходных данных.

2.4. Обоснование углов рабочих поверхностей бича

При комбайновом способе уборки льна-долгунца обмолоту подвергается лента стеблей льна, сформированная рабочими органами ком-

байна. На параметры формируемой ленты оказывают влияние агро-биологические свойства стеблестоя, конструкционные особенности теребивильного аппарата, параметры и режим работы уборочного агрегата. Формируемая лента стеблей льна (рис. 2.21) характеризуется растянутостью μ , относительным сдвигом стеблей в ленте ζ , а также относительным перекосом стеблей в ленте ξ .



Рис. 2.21. Основные параметры ленты стеблей льна

При работе роторно-бильного аппарата (рис. 2.22) лента стеблей льна подводится к ротору с бичами. Ротор совместно с боковой декой образует молотильное пространство, в которое протаскивается захваченная бичом порция стеблей льна. Поскольку стебли в ленте льна расположены с относительным перекосом ξ , то воздействие на них рабочими органами обмолачивающего аппарата происходит поразному.

Из схемы (рис. 2.22) видно, что стебель льна c_1 , который сориентирован верхней частью вперед по ходу движения, будет подвержен последовательному воздействию бичей по мере поступления в молотильное пространство – сначала бичи воздействуют на верхушечную часть, а затем на среднюю.

Прямой, не перекошенный в ленте стебель c_2 попадет под воздействие бичей всей длиной, и его изгиб произойдет у периферийной части ротора. Стебель льна c_3 , сориентированный верхней частью назад по ходу движения, в первую очередь попадет под воздействие бича своей средней частью и будет подвержен излому. Комлевая часть стебля жестко зажата и удерживается зажимным транспортером, в то

время как верхушечная его часть лежит на подводящем столе, а бич, воздействуя на стебель в средней его части, изгибает стебель вниз.

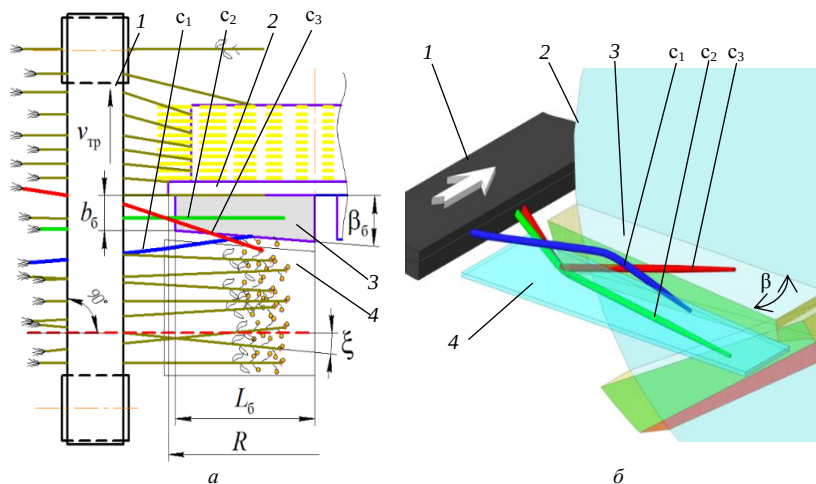


Рис. 2.22. Схема к обоснованию угла наклона боковой поверхности бича к плоскости диска:

a – схема взаимодействия бича со стеблями льна; *б* – пространственная схема взаимодействия стеблей льна с бичом; 1 – зажимной транспортер; 2 – ротор; 3 – бич; 4 – подающий стол

Для исключения изламывающего воздействия рабочих органов обмолачивающего аппарата на стебли льна необходимо уменьшить высоту бича к периферии ротора, т. е. обеспечить продольный угол наклона боковой поверхности бича к плоскости вращения (плоскости диска).

$$\beta_6 \geq \xi, \quad (2.72)$$

где ξ – угол перекося стеблей в ленте льна, рад.

Для определения продольного угла β_6 наклона боковой поверхности к плоскости диска необходимо исследовать угол перекося стеблей в ленте льна в зажимном транспортере льноуборочного комбайна.

Угол α_n наклона передней поверхности бича должен быть таким, чтобы в начале взаимодействия бича со стеблями льна последний гарантированно захватывал порцию и увлекал в пространство между ротором и боковой декой (рис. 2.23).

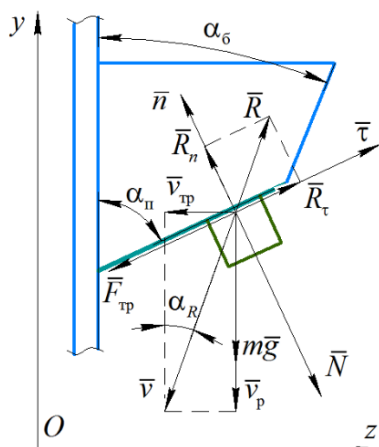


Рис. 2.23. Схема сил, действующих на бич:
1 – ротор; 2 – бич; 3 – элемент стеблевой массы

Уравнение движения элемента стеблевой массы m вверх по передней поверхности бича имеет вид (см. рис. 2.17)

$$m \frac{d\bar{v}}{dt} = m\bar{g} + \bar{F}_{\text{тр}} + \bar{N} + \bar{R}, \quad (2.73)$$

где m – стеблевая масса, кг;

$\bar{v}$ – вектор скорости элемента стеблевой массы;

t – время, с;

$\bar{g}$ – ускорение свободного падения, м/с^2 ;

$\bar{F}_{\text{тр}}$ – сила трения стеблевой массы о наклонную поверхность бича, Н;

$\bar{N}$ – сила нормальной реакции бича, Н;

$\bar{R}$ – результирующая сила, Н.

В проекции на направление движения стеблевой массы, задаваемое единичным вектором $\bar{\tau}$, векторное уравнение (2.73) принимает вид

$$m \frac{dv}{dt} = -mg \cos \alpha_n - F_{\text{тр}} + R, \quad (2.74)$$

где v – скорость движения стеблевой массы, м/с ;

g – ускорение свободного падения, м/с^2 ;

α_n – угол наклона передней поверхности бича, рад.

В проекции на направление внешней нормали к бичу, задаваемой единичным вектором $\vec{n}$ (см. рис. 2.17), уравнение (2.73) дает:

$$0 = mg \sin \alpha_n - N - |R_n|; \quad (2.75)$$

$$N = mg \sin \alpha_n - |R_n| = mg \sin \alpha_n + m \frac{dv_n}{dt}, \quad (2.76)$$

где v_n – проекция абсолютной скорости стеблевой массы на внешнюю нормаль к бичу, м/с.

$$v_n = v_a \sin(\alpha_n - \alpha_R), \quad (2.77)$$

где v_a – абсолютная скорость взаимодействия стеблевой массы с бичом, м/с;

α_R – направления вектора абсолютной скорости, рад.

Поскольку скорость бича и ленты стеблей льна взаимно перпендикулярны, то абсолютную скорость можно определить по формуле

$$v_a = \sqrt{v_p^2 + v_{tp}^2}, \quad (2.78)$$

где v_p – окружная скорость ротора, м/с;

v_{tp} – скорость зажимного транспортера, м/с.

Угол α_R направления вектора абсолютной скорости зависит от отношения скорости ленты льна v_l (в установившемся режиме работы аппарата скорость ленты льна соответствует скорости v_{tp} зажимного транспортера) к окружной скорости бича v_6 :

$$\alpha_R = \arctg\left(\frac{v_{tp}}{v_p}\right). \quad (2.79)$$

Следовательно, силу трения с учетом уравнений (2.76), (2.77) и (2.78) можно определить по формуле

$$F_{tp} = f_{tp} \left(mg \sin \alpha_n + m \frac{d\left(\sqrt{v_p^2 + v_{tp}^2} \sin(\alpha_n - \alpha_R)\right)}{dt} \right), \quad (2.80)$$

где f_{tp} – коэффициент трения стеблевой массы о поверхность бича.

Тангенциальную составляющую силы R_τ определим как

$$R_\tau = m \frac{dv_\tau}{dt}, \quad (2.81)$$

где v_τ – проекция абсолютной скорости на направление движения стеблевой массы, м/с.

$$v_\tau = v_a \cos(\alpha_n - \alpha_R); \quad (2.82)$$

$$R_\tau = m \frac{d\left(\sqrt{v_p^2 + v_{tp}^2} \cos(\alpha_n - \alpha_R)\right)}{dt}. \quad (2.83)$$

Уравнение (2.74) с учетом зависимостей (2.80) и (2.83) примет вид

$$\begin{aligned} m \frac{dv}{dt} = & -mg \cos \alpha_n + m \frac{d\left(\sqrt{v_p^2 + v_{tp}^2} \cos(\alpha_n - \alpha_R)\right)}{dt} - \\ & - f_{tp} \left(mg \sin \alpha_n + m \frac{d\left(\sqrt{v_p^2 + v_{tp}^2} \sin(\alpha_n - \alpha_R)\right)}{dt} \right). \end{aligned} \quad (2.84)$$

Для исключения движения стеблевой массы по боковой поверхности бича необходимо выполнение условия

$$m \frac{dv}{dt} \leq 0. \quad (2.85)$$

Уравнение (2.84) преобразуем и запишем в виде неравенства

$$\begin{aligned} 0 \geq & -g \cos \alpha_n - f_{tp} g \sin \alpha_n + f_{tp} \frac{d\left(\sqrt{v_p^2 + v_{tp}^2} \sin(\alpha_n - \alpha_R)\right)}{dt} + \\ & + \frac{d\left(\sqrt{v_p^2 + v_{tp}^2} \cos(\alpha_n - \alpha_R)\right)}{dt}. \end{aligned} \quad (2.86)$$

Из уравнения (2.86) получим

$$\operatorname{arctg}\left(\frac{1}{f_{tp}}\right) \leq \alpha_n. \quad (2.87)$$

Неравенство (2.87) представим в виде графической зависимости (рис. 2.24).

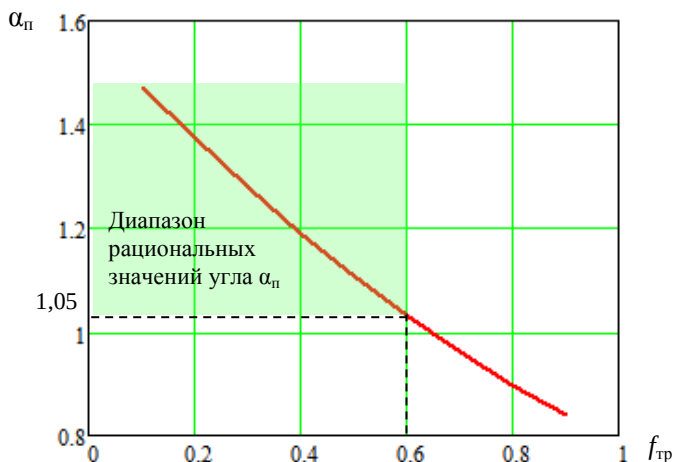


Рис. 2.24. Зависимость поперечного угла α_n наклона передней поверхности бича от коэффициента трения $f_{тр}$

Анализ зависимости (рис. 2.24) показал, что для обеспечения захвата стеблей льна (влажностью 50–60 % и коэффициентом трения $f_{тр} = 0,6$) бичом минимальное значение угла α_n составляет 1,05 рад (60°). Рациональное значение угла α_n наклона передней поверхности бича необходимо уточнить экспериментально.

2.5. Определение кинематических параметров роторно-бильного аппарата

Большое значение при отделении семенной части от стеблей льна роторно-бильным обмолачивающим аппаратом имеют: скорость подачи стеблей $v_{тр}$, интенсивность обмолота и ширина зоны обмолота роторно-бильного аппарата, частота вращения ротора и тип рабочего органа. Эти параметры в основном определяют степень травмирования семян и стеблей при обмолоте [142, 182, 57].

При работе роторно-бильного аппарата в установившемся режиме его рабочие органы (бичи) равномерно вращаются вокруг оси O ротора

с угловой скоростью ω_p и одновременно к ним подается зажатая в зажимном транспортере лента льна со скоростью v_{tp} [141]. Траектория любой точки бича относительно зажатых в транспортере стеблей льна представляет собой спираль, форма которой зависит от соотношения окружной скорости v_p ротора и поступательной скорости v_{tp} транспортера [141] (рис. 2.25). Путь s_{tp} , пройденный лентой льна, определяется по формуле

$$s_{tp} = v_{tp} t. \quad (2.88)$$

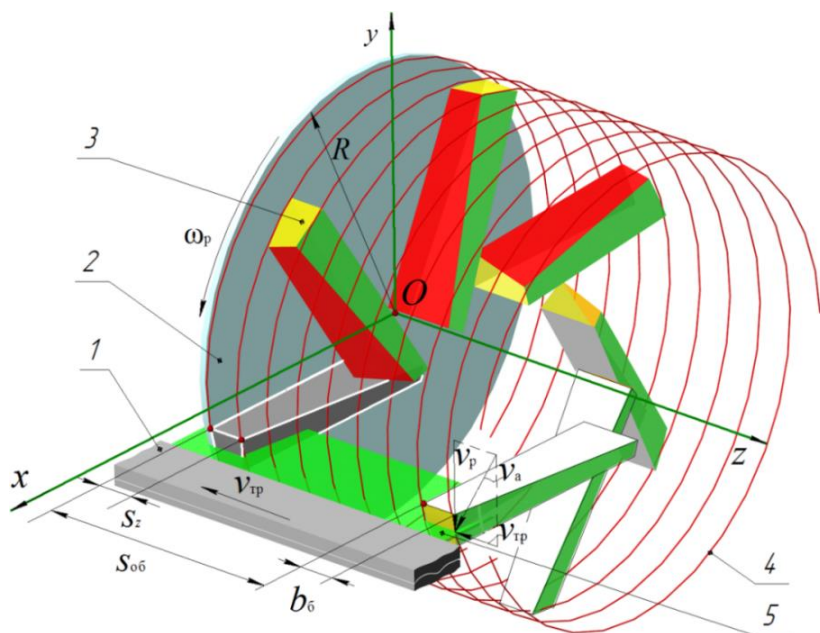


Рис. 2.25. Схема к определению кинематических параметров роторно-бильного аппарата: 1 – зажимной транспортер; 2 – ротор; 3 – бич; 4 – траектория движения бича; 5 – лента стеблей льна

Для определения пути, пройденного зажимным транспортером за один оборот ротора, определим время одного оборота. Угол поворота ротора φ_p , соответствующий одному обороту ротора, равен 2π . Так как при установившемся режиме работы ротор вращается с постоянной

угловой скоростью, то угол поворота $\varphi_p = \omega_p t_{об}$. Приравняв левые части, получим:

$$\omega_p t_{об} = 2\pi, \quad (2.89)$$

где ω_p – угловая скорость вращения ротора, рад/с;

$t_{об}$ – время одного оборота ротора, с.

Окружная скорость ротора имеет вид $v_p = \omega_p R$, откуда выразим угловую скорость вращения ротора:

$$\omega_p = \frac{v_p}{R}, \quad (2.90)$$

где v_p – окружная скорость ротора, м/с.

Из выражения (2.89) с учетом зависимости (2.90) найдем время одного оборота ротора:

$$t_{об} = \frac{2\pi R}{v_p}. \quad (2.91)$$

Тогда из уравнения (2.88) с учетом выражения (2.91) путь, пройденный зажимным транспортером за один оборот ротора, определим как

$$s_{тр} = v_{тр} \frac{2\pi R}{v_p}. \quad (2.92)$$

Число воздействий бичей на стебли оказывает большое влияние на процесс обмолота [141]. Чтобы обеспечить качественный обмолот и избежать травмирования семян и стеблей льна, необходимо подобрать оптимальное число воздействий.

Для обеспечения процесса обмолота бичи ротора должны воздействовать на все стебли в ленте без пропусков. Учитывая положения, изложенные в подразделе 2.3, согласно которым захват стеблей осуществляет передняя поверхность бича, длину участка $s_{об}$ ленты льна, на котором за один оборот ротора каждый бич воздействует на стебли однократно, но без огрехов (без пропусков), можно представить в виде

$$s_{об} = k_b b_b \kappa_b, \quad (2.93)$$

где k_b – количество установленных бичей на роторе, шт.;

b_6 – ширина торцевой поверхности бича, м;

κ_6 – коэффициент захвата бича, определяемый как b'_6/b_6 .

Для обеспечения качественного обмолаота роторно-бильным аппаратом необходимо соблюдать условие $q \geq 1$.

$$q = \frac{S_{об}}{S_{тр}}, \quad (2.94)$$

где q – кратность воздействий бичами на фрагмент ленты льна.

Данный показатель характеризует среднее количество воздействий бичами роторно-бильного аппарата на стебли обрабатываемой ленты льна.

С учетом выражений (2.91) и (2.92) кратность воздействий будет иметь вид

$$q = \frac{v_p k_6 b_6 \kappa_6}{v_{тр} 2\pi R}, \quad (2.95)$$

где $v_p/v_{тр} = \lambda_p$ – кинематический показатель режима работы роторно-бильного аппарата.

Чтобы предотвратить повреждение стеблей и обеспечить более полное выделение семян, должно быть выдержано соотношение скорости подачи и частоты вращения ротора.

Представим выражение (2.94) в виде равенства

$$q = \frac{\lambda_p k_6 b_6 \kappa_6}{2\pi R} \quad (2.96)$$

и проведем его анализ при фиксированных значениях ширины торцевой поверхности бича $b_6 = 0,05$ м, коэффициента захвата бича $\kappa_6 = 0,687$ (рис. 2.26) и радиуса ротора $R = 0,35$ м.

Из графической зависимости видно, что по мере уменьшения количества бичей интенсивность роста q при увеличении λ_p снижается. Достаточно для полного воздействия на стебли значению $q = 1$ соответствуют $\lambda_p = 3$ при $k_6 = 15$, $\lambda_p = 3,5$ при $k_6 = 12$, $\lambda_p = 4,8$ при $k_6 = 9$ и $\lambda_p = 7,5$ при $k_6 = 6$.

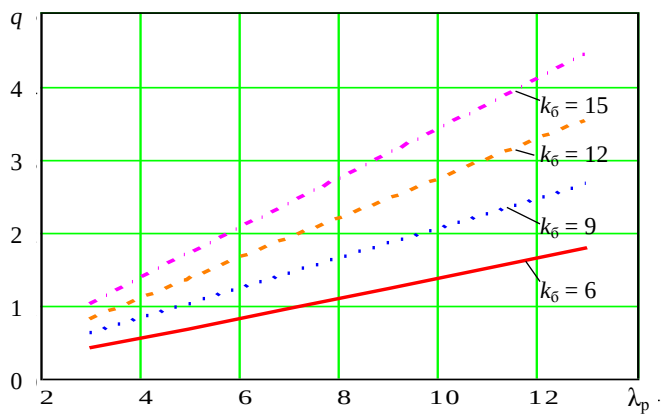


Рис. 2.26. Зависимость кратности воздействия от кинематического показателя режима работы роторно-бильного аппарата

На рис. 2.27 представлены зависимости кинематического показателя режима работы от количества бичей при обеспечении воздействия их на все стебли обрабатываемой ленты ($q = 1$).

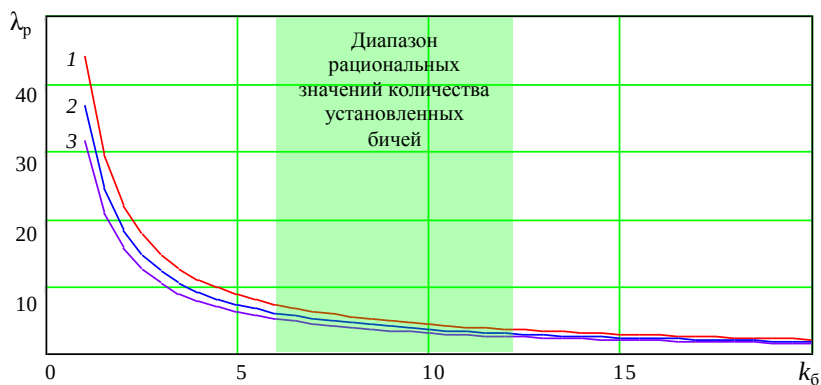


Рис. 2.27. Зависимости кинематического показателя режима работы от количества бичей ($q = 1$):
1 – $b_6 = 0,05$ м; 2 – $b_6 = 0,06$ м; 3 – $b_6 = 0,07$ м

Как видно, для диапазона $k_6 \in [1; 5]$ требуется большое (от 37 до 7) значение λ_p , в 2–5 раз большее, чем в диапазоне $k_6 \in [6; 18]$. Для последнего диапазона достаточно небольшого значения кинематического показателя режима работы роторно-бильного аппарата. Следует отметить, что большое количество бичей усложняет конструкцию. С учетом этого при проведении экспериментальных исследований и проектировании роторно-бильного аппарата было принято решение, что установка менее 6 бичей неэффективна, поскольку качественный обмолот требует более высокой частоты вращения ротора, сопровождаемой повышенным повреждением стеблей и семян льна, а более 12 нецелесообразна из-за усложнения конструкции.

Прицепной льноуборочный комбайн «Двина-4М» работает в составе агрегатов на базе тракторов «Беларус» тягового класса 1,4. Частота вращения вала отбора мощности, соответствующая номинальным оборотам двигателя, находится в диапазоне 535–565 об/мин, а скорость зажимного транспортера льноуборочного комбайна – 1,5 м/с.

Согласно принятой схеме (см. рис. 2.1) взаимного расположения рабочих органов роторно-бильного аппарата [70] в начале взаимодействия бича с лентой касание его стеблей происходит всей передней поверхностью, а направления движения ленты льна и бича ротора взаимоперпендикулярны. В таком случае наибольшей скоростью движения обладают точки ротора, удаленные на расстояние R , – $v_p = \omega_p R$. Абсолютная скорость точки бича, наиболее удаленной от оси O вращения, в начале его взаимодействия со стеблями определяется выражением (2.78)

Эта скорость не должна превышать критической скорости удара по ленте:

$$v_a < v_{кр}, \quad (2.97)$$

где $v_{кр}$ – критическая скорость удара, при которой начинается разрушение семян (находится в пределах 17–28 м/с [126, 139]), м/с.

Уравнение (2.96) с учетом выражения (2.78) будет иметь вид

$$q = \frac{\sqrt{v_a^2 - v_{тр}^2} k_6 b_6 \kappa_6}{2\pi R v_{тр}}. \quad (2.98)$$

Проведем анализ полученной зависимости (2.98) при фиксированных параметрах: радиусе ротора $R = 0,35$ м, скорости движения точки бича, наиболее удаленной от оси вращения, $v_a = 17$ м/с (соответствует

наименьшему значению критической скорости $v_{кр}$), средней скорости зажимного транспортера льноуборочного комбайна «Двина-4М» $v_{тр} = 1,5$ м/с. Зависимости кратности воздействий бичей ротора на ленту стеблей льна от числа бичей и ширины торцевой поверхности представлены на рис. 2.28.

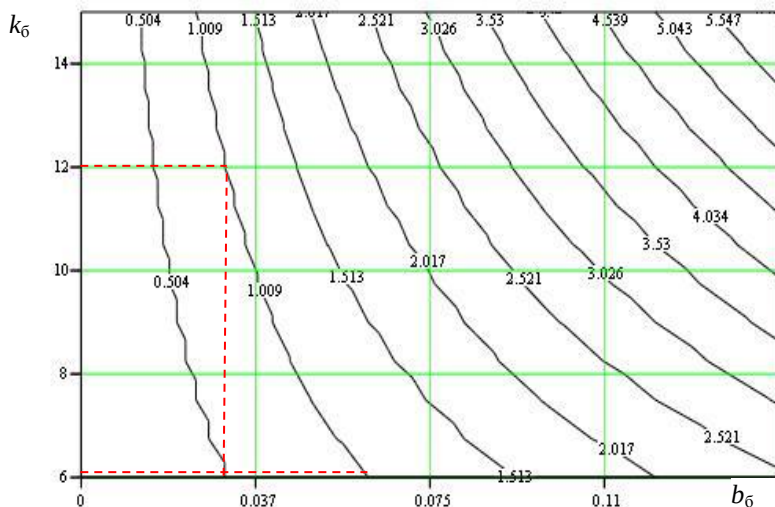


Рис. 2.28. Зависимости кратности q воздействия от количества k_6 бичей и ширины b_6 торцевой поверхности бича

Анализ зависимостей (рис. 2.28) показывает, что при критической скорости $v_{кр} = v_a = 17$ м/с для качественной работы роторно-бильного аппарата, удовлетворяющей минимальному требованию $q = 1$, ширина k_6 торцевой поверхности бича должна находиться в пределах от 0,03 м (при установке 12 бичей) до 0,06 м (при установке 6 бичей).

Проанализируем изменение абсолютной скорости v_a движения точки бича, наиболее удаленной от оси вращения, в пределах рабочего диапазона скоростей зажимного транспортера $v_{тр} = 1,3 \dots 2,5$ м/с [139] при установке 12 бичей с шириной торцевой поверхности 0,03 и 0,06 м (рис. 2.29).

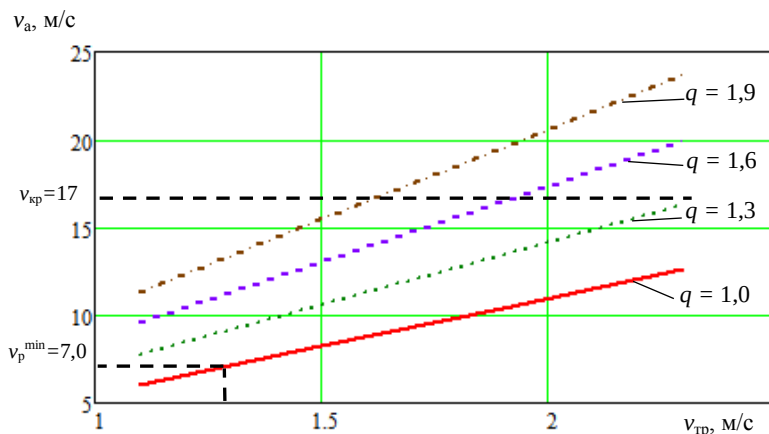


Рис. 2.29. Зависимости изменения абсолютной скорости v_a движения бича с лентой льна от скорости $v_{тр}$ зажимного транспортера при ширине торцевой поверхности бича $b_6 = 0,03$ м

Анализ графической зависимости (рис. 2.29) показывает, что наименьшее значение скорости, удовлетворяющее условию $q = 1$, составляет $v_a = 7,13$ м/с. Такому значению абсолютной скорости v_a и минимальной скорости зажимного транспортера $v_{тр} = 1,3$ м/с соответствует окружная скорость ротора (определяемая из выражения (2.78)) $v_p = 7$, м/с.

Выводы

1. В результате теоретических исследований проанализированы различные схемы взаимного расположения элементов конструкции роторно-бильного аппарата и обоснована наиболее рациональная схема, учитывающая ширину зоны расположения семенных коробочек в ленте, предельный угол изгиба стеблей льна и технологического зазора между ротором и передней плоскостью зажимного транспортера [70].

Проведен теоретический анализ взаимосвязи радиуса ротора и радиуса защитного кольца с учетом зазора между ротором и передней плоскостью зажимного транспортера, а также предельного угла изгиба стеблей льна. Установлено, что соотношение радиуса ротора к радиусу защитного кольца является постоянной величиной для принятого значения предельного угла изгиба стеблей льна. Таким образом, получен-

ный безразмерный показатель $i = R/r$ (выражения (2.13) и (2.25)) является параметром подобия обмолачивающих устройств, сконструированных по предлагаемой схеме взаимного расположения рабочих органов. Установлены зависимости для определения радиуса ротора (2.26) и радиуса защитного кольца (2.31) из условия ненаматывания стеблей льна на защитное кольцо с учетом возможного удлинения стеблей в ленте, обусловленного выравниванием стеблей при прочесе ленты и растяжением под воздействием продольных сил, действующих на стебли при работе аппарата. Это позволило установить минимальное значение радиуса ротора $R = 0,345$ м и радиуса защитного кольца $r = 0,120$ м [70, 173].

2. Получены аналитические зависимости для определения параметров бича как объемной фигуры (2.44), (2.45), (2.46), (2.47), (2.48), (2.49), (2.50) с учетом ширины торцевой части бича, диаметра ротора, поперечного угла наклона боковой поверхности бича, продольного угла наклона боковой поверхности бича, угла наклона передней поверхности бича к плоскости диска и количества установленных на роторе бичей. Предложена методика расчета параметров бича, реализованная в системе компьютерной алгебры MathCAD-15 [98, 99, 173].

3. Получена аналитическая зависимость (2.95), устанавливающая связь кратности воздействий бичей на фрагмент ленты льна с конструктивными параметрами роторно-бильного аппарата (радиусом ротора, шириной торцевой поверхности бича, количеством установленных на роторе бичей) и его кинематическими параметрами (окружной скоростью ротора и скоростью движения зажимного транспортера), что позволило установить минимальную окружную скорость вращения ротора $v_p = 7,0$ м/с, рациональное значение количества бичей $k_6 = 6 \dots 12$ шт. и минимальное значение ширины торцевой поверхности бича $b_6 = 0,03$ м [102, 173, 175].

3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Программа исследований

Проведенные теоретические исследования процесса обмолота лент льна позволяют сделать вывод о том, что качественные показатели процесса зависят от физико-механических свойств льна, геометрических и кинематических параметров рабочих органов и технологических параметров [52] ленты льна.

При проведении теоретических исследований процесса отделения семенной части льна от стеблей были приняты некоторые допущения, упрощающие обоснование параметров процесса обмолота. Поэтому на втором этапе исследований ставилась задача в результате проведения лабораторных исследований получить математическую модель процесса отделения семенной части от стеблей и определить его оптимальные параметры. Основными критериями при проведении исследований являлись чистота обмолота и степень повреждения стеблей льна, влияющего на выход длинного волокна.

В соответствии с вышеизложенным программа лабораторных исследований включала [52]:

- изучение технологических параметров стеблей и ленты льна, формируемой льноуборочным комбайном;
- обоснование интервалов и уровней варьирования основных факторов для проведения лабораторных исследований процесса отделения семенной части от стеблей;
- определение рациональных параметров предлагаемой конструкции роторно-бильного аппарата по результатам лабораторных исследований и получение математической модели процесса обмолота;
- проведение производственных испытаний для подтверждения результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Производственные испытания включали [52]:

- проверку результатов теоретических и экспериментальных исследований в производственных условиях;
- проведение сравнительных исследований существующего льноуборочного комбайна «Двина-4М», оснащенного гребневым очесывающим аппаратом, и «Двина-4М», оборудованного разработанным нами роторно-бильным аппаратом для отделения семенной части от стеблей льна.

3.2. Методика определения параметров подаваемой на обмолот ленты льна

Лента льна, поступающая на обмолот в льноуборочном комбайне, формируется делителями, терebильным аппаратом и поперечным транспортером. При этом лента льна неодинакова по толщине и имеет перекосы стеблей льна и растянутость.

С целью изучения свойств ленты льна, формируемой рабочими органами льноуборочного комбайна, были проведены измерения ее параметров.

При этом определялись:

- количество стеблей в ленте льна на одном погонном метре, шт.;
- количество семенных коробочек на стебле, шт.;
- количество семян в коробочке, шт.;
- длина стеблей, м;
- средняя ширина ленты льна, м;
- конусность стеблей льна;
- растянутость ленты льна;
- перекося стеблей в ленте льна, рад;
- влажность льна, %.

Для сокращения объема экспериментальной работы и получения достоверных результатов исследований необходимый объем выборки из неограниченной совокупности определяли по зависимости [22, 52]

$$n_B = \frac{t_c^2 \sigma_{cp}^2}{m_0^2}, \quad (3.1)$$

где t_c – критерий Стьюдента;

σ_{cp} – среднее квадратическое отклонение, %;

m_0 – возможная ошибка среднего арифметического значения, %.

Значение критерия Стьюдента t_c зависит от выбранного уровня значимости. В расчетах принимаем $t_c = 2,447$ [24]. При этом вероятность охвата генеральной средней в численных пределах равна 0,95. Значение относительной величины предельной ошибки при исследовании сельскохозяйственных сред, материалов и растений рекомендуется выбирать в пределах 3–5 % [52, 89].

Количество стеблей в ленте льна на одном погонном метре, количество семян в коробочке и количество семенных коробочек на стебле определяли путем подсчета.

Для определения толщины ленты льна построили график зависимости (рис. 3.1) для среднего диаметра стебля льна 0,002 м с учетом формул (1.8) и (1.9).

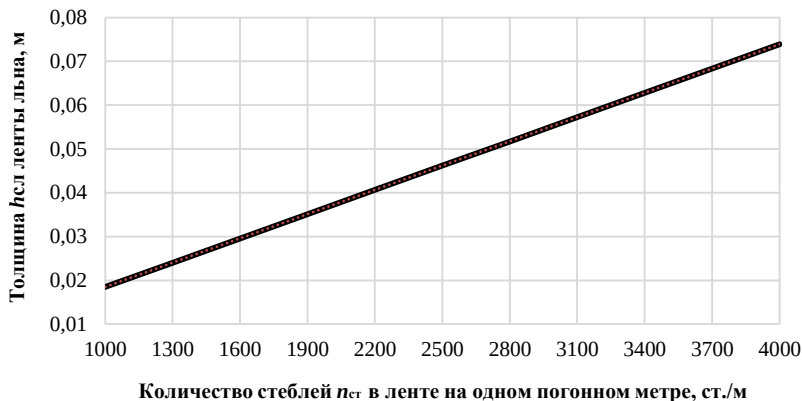


Рис. 3.1. Зависимость толщины ленты льна от количества стеблей на одном погонном метре

Конусность стеблей льна определялась по зависимости

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

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

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

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

Растянutosть ленты льна определялась согласно ГОСТ 33734–2016 [153, 183] по следующей зависимости:

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

где $B_{л.ср}$ – средняя ширина ленты льна, м;

$L_{ср}$ – средняя длина стеблей, м.

Определение угла ξ перекося стеблей в ленте льна осуществлялось следующим образом. На льноуборочном комбайне «Двина-4М» был отключен привод очесывающего аппарата, а очесывающий модуль выдвинут максимально вперед. Таким образом исключалось воздей-

ствии очесывающего аппарата на формируемую рабочими органами льноуборочного комбайна ленту. Определение угла ξ перекоса стеблей производили в ленте льна, зажатой зажимным транспортером льноуборочного комбайна, с помощью оптического угломера УО-2 ГОСТ 11197–73 1-го класса точности (рис. 3.2, *а*). Для этого был выбран участок льна со средней густотой стеблестоя 1630 шт/м² и средней высотой 0,97 м. Для более точного определения угла ξ перекоса ленты льна агрегат останавливали при установившемся режиме работы и производили измерения на ленте, находящейся в зажимном транспортере.

На основании анализа исследований параметров ленты льна [14, 15, 48, 164] установлено, что на перекоос стеблей оказывают влияние кинематический показатель режима работы льноуборочного комбайна, а также высота установки теребильного аппарата. Для определения влияния кинематического показателя режима работы агрегата на угол ξ исследовалась лента льна, полученная при различных режимах работы льноуборочного комбайна: $v_m = 6,03$ км/ч, $v_m = 7,14$ км/ч, $v_m = 8,11$ км/ч, $v_m = 9,44$ км/ч. Для определения влияния высоты теребления льна на параметр ξ теребление выполняли на высоте 0,2, 0,3 и 0,4 м.

Измерение диаметра стеблей льна проводили с помощью электронного штангенциркуля ШЦЦ-I ГОСТ 166–89 1-го класса точности (рис. 3.2, *б*), а длины участка – с помощью рулетки Р5УЗП ГОСТ 7502–98 3-го класса точности (рис. 3.2, *в*).



Рис. 3.2. Измерительные инструменты для определения угла перекоса и диаметра стеблей в ленте льна:

а – оптический угломер; *б* – штангенциркуль; *в* – рулетка

Повторность опытов трехкратная, каждый опыт выполняли по вышеизложенным методикам.

3.3. Методика определения удлинения стеблей льна в ленте под действием рабочих органов обмолачивающего аппарата

С целью определения удлинения $\Delta_{\text{л}}$ стеблей льна в ленте под действием рабочих органов обмолачивающего аппарата была изготовлена лабораторная установка, схема и общий вид которой представлены на рис. 3.3.

Установка представляла собой сплошную плиту 1. На плите 1 жестко закреплено имитирующее зажимной транспортер зажимное устройство 3, в которое укладывалась лента льна 2. В нижней части плиты имелась линейная шкала 4 (ГОСТ 5094–74 с точностью до 1 мм). Плита устанавливалась в раму вертикальной конструкции шарнирно, с возможностью поворота на 90° . В качестве растягивающей силы использовался груз 5 массой, исключающей обрыв стебля.

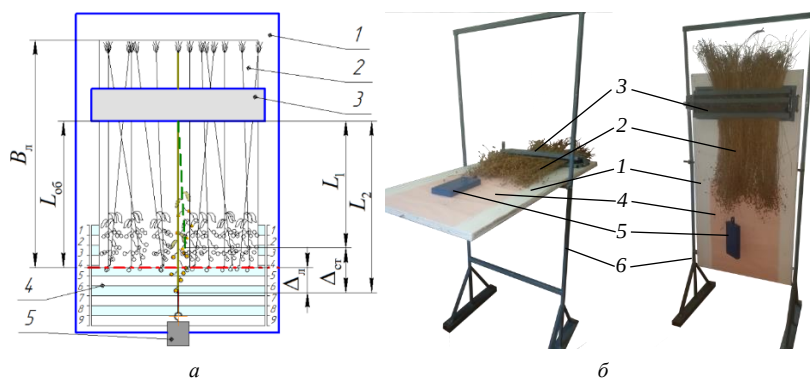


Рис. 3.3. Схема (а) и общий вид (б) лабораторной установки для определения параметров $\Delta_{\text{л}}$ и к:

1 – плита; 2 – лента стеблей льна; 3 – зажимное устройство;

4 – линейная шкала; 5 – груз; 6 – рама; $B_{\text{л}}$ – ширина ленты льна, м;

L_1 – длина участка стебля льна до воздействия на него груза, м;

L_2 – длина участка стебля льна после воздействия на него груза, м;

$\Delta_{\text{л}}$ – величина, на которую вытянулся стебель льна под действием груза, м;

$\Delta_{\text{ст}}$ – общая величина, на которую вытянулся стебель льна под действием груза, м

Опыты проводили следующим образом. В зажимное устройство при горизонтальном положении плиты укладывался и фиксировался фрагмент ленты льна 2 длиной 0,5 м, полученный после прохода комбайна «Двина-4М» с отключенным очесывающим аппаратом. Фиксирование фрагмента ленты льна в зажимное устройство осуществлялось

на расстоянии $1/3$ от комлевой части стеблей. За верхнюю часть стебля, ниже соцветия, закрепляли с помощью зажима груз таким образом, чтобы зажатие было надежным, но без существенного повреждения стебля. С помощью шкалы 4 фиксировалось начальное положение верхушки стебля, а затем плита плавно переводилась в вертикальное положение. Стебель под действием груза вытягивался, после чего фиксировалось значение длины стебля в вытянутом состоянии. На основании исследований М. М. Ковалева [47] масса груза для стеблей диаметром $(0,7...1,0) \cdot 10^{-3}$ м принималась 4,5 кг, а для стеблей диаметром более $1,0 \cdot 10^{-3}$ – 6,5 кг. Таким образом, для стеблей разного диаметра использовалось усилие на растяжение, близкое к усилию разрыва, но не превышающее его. Разница между положениями верхушки вытянутого стебля и верхушек стеблей в ленте соответствовала удлинению $\Delta_{\text{л}}$. Испытанию подвергалась лента стеблей льна шириной $B_{\text{л}}$ 0,69, 0,82, 0,96 и 1,09 м.

Коэффициент κ к удлинению стеблей в ленте льна определяли по выражению

$$\kappa = \frac{L_{\text{об}} + \Delta_{\text{л}}}{L_{\text{об}}}, \quad (3.4)$$

где $L_{\text{об}}$ – длина стебля льна от места зажима до вершины, м;

$\Delta_{\text{л}}$ – удлинение стеблей льна, м.

Для определения коэффициента κ были изготовлены опытные образцы свежесобранного льна в фазу желтой спелости на полях льнозавода ОАО «Горкилен». Исследуемые образцы стеблей льна имели влажность 43–55 %, значения диаметров стеблей находились в пределах $(0,7...2,37) \cdot 10^{-3}$ м.

3.4. Методика определения деформации семенной коробочки льна при различных схемах нагружения

В процессе обмолота роторно-бильным аппаратом коробочки льна на стеблях ориентированы по оси стебля и их разрушение в молотильном зазоре, между ротором и боковой декой, происходит радиально (сжатие коробочки с боков), а затем при протаскивании коробочки в подроторное пространство ориентацию коробочки определить сложно и схема нагружения ее может быть различной.

Для обоснования молотильного зазора между бичом и боковой частью деки усилие и величину предельного смятия семенных коробочек

льна определяли с помощью изготовленной лабораторной установки, представленной на рис. 3.4.

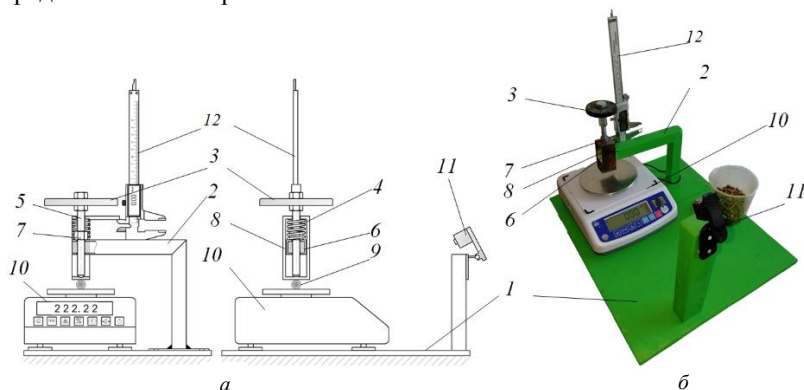


Рис. 3.4. Устройство для определения усилия разрушения коробочек льна:
1 – плита; 2 – стойка; 3 – рукоятка; 4 – пружина; 5 – винт; 6 – резьбовая упругая вставка; 7 – гайка; 8 – ползун; 9 – коробочка льна; 10 – весы; 11 – видеокамера; 12 – металлический корпус

Лабораторная установка представляет собой плиту 1, на которой жестко смонтированы стойка 2 с механизмом разрушения коробочек и стойка с камерой 11. Механизм разрушения состоит из рукоятки 3, винта 5 и подпружиненного пружиной 4 ползуна 8, имеющего отполированную рабочую поверхность. Для плавности хода винта 5 установлена упругая резьбовая вставка 6. На плиту 1 под раздавливающий механизм устанавливались весы лабораторные ВК-600 и весы SF-400 таким образом, чтобы приложение силы разрушения коробочки льна приходилось в центр тарелки весов. Для определения предельной величины смятия коробочки льна на стойке 2 жестко закреплена неподвижная губка цифрового штангенциркуля ШЦЦ-I в металлическом корпусе 12 с ценой деления 0,01 мм, подвижная губка которого упирается в верхнюю часть ползуна 8.

При линейном воздействии на коробочки льна, как указано на рис. 3.5, а, опыты проводили следующим образом. Коробочка льна укладывалась посередине тарелки весов 10, а раздавливающий механизм относительно коробочки располагался так, чтобы ось вращения винта 5 находилась в центре коробочки. При вращении рукоятки 3 винт 5 совершает перемещение по оси вниз и воздействует на ползун 8, который преодолевая усилие пружины 4, движется в направле-

нии коробочки льна 9. В момент касания рабочей поверхностью ползуна 8 коробочки 9 индикаторная шкала весов отображает усилие, действующее на коробочку льна 9, в этот момент производили обнуление цифрового штангенциркуля с целью определения величины смятия коробочки до разрушения. Воздействие на коробочки производили в статическом режиме, медленно вращая рукоятку, не допуская толчков и резких движений. В момент разрушения коробочки льна, усилие, отражаемое на индикаторной шкале весов, резко снижается, этот момент принимался как момент разрушения. При этом показания цифрового штангенциркуля отражали предельную величину смятия коробочки льна, а максимальное значение, отображаемое индикаторной шкалой весов, определяли путем анализа видеозаписи с камеры 11. Линейное воздействие на коробочки льна производили по схемам (рис. 3.5, *в*, *з*). В качестве поверхностей сжатия коробочки использовали: поверхность тарелки весов и металлическая поверхность ползуна 8 [174].

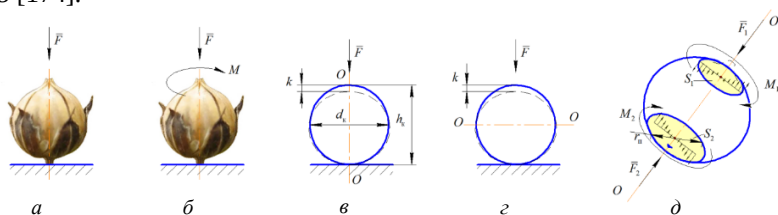


Рис. 3.5. Схемы воздействия на коробочки льна:

а – линейное воздействие по оси коробочки; *б* – линейное воздействие и момент скручивания; *в* – осевое воздействие; *з* – радиальное воздействие на коробочки

При линейном воздействии на коробочки и приложенном моменте скручивания коробочки льна, как указано на рис. 3.5, *б*, опыты проводили аналогично, за исключением того, что воздействие на коробочку раздавливающего механизма производилось не посредством ползуна 8, а самим винтом 5. При увеличении смятия коробочки льна увеличивалось пятно контакта рабочей поверхности винта с коробочкой и возникал момент скручивания. Данный опыт разрушения коробочки льна производили также по схемам (рис. 3.5, *в*, *з*). Сжатие коробочки льна приводит к увеличению пятна контакта винта с коробочкой с одной стороны и пятна контакта коробочки с тарелкой весов. При этом образуется пятно контакта, близкое по форме к окружности (рис. 3.5, *д*). Предполагая, что поверхность трения имеет площадь круга, сопротив-

ление, оказываемое силами трения моменту, вращения винта относительно коробочки льна, будет иметь равнодействующий момент силы трения, приложенной на окружности с радиусом R_p .

Момент полной силы трения

$$M_{\text{кр}} = F_{\text{тр}} \cdot R_p, \quad (3.5)$$

где $F_{\text{тр}}$ – полная сила трения скольжения, Н;

R_p – радиус окружности, на которой приложена равнодействующая элементарных сил трения, м.

Поскольку в расчетах поверхности трения принимается площадь круга пятна смятия семенной коробочки, то радиус окружности, на которой приложена равнодействующая элементарных сил трения,

$$R_p = \frac{2}{3} \cdot r_n. \quad (3.6)$$

Полную силу трения скольжения можно определить по формуле

$$F_{\text{тр}} = p \cdot \pi \cdot f \cdot r_n^2, \quad (3.7)$$

где p – давление на поверхности трения, т. е. сила, приходящаяся на единицу поверхности трения, Н/м²;

f – коэффициент трения скольжения.

Для определения усилия разрушения были заготовлены опытные образцы льна на поле ОАО «Горкилен» (урочище Волковщина, в период 6–13 августа, сорт Грант). Были выделены три пучка льна разной спелости: зеленой, желтой и бурой. Для этого подбирали участок поля, где можно выделить определенную фазу спелости. Затем формировали пучки, содержащие 500–600 растений, в которых были оставлены коробочки одной спелости, а остальные удаляли. Таким образом, были получены пучки с зеленой, желтой и бурой спелостью.

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

Подготовка к опытам включала в себя следующие операции:

- наладка опытной установки;
- подбор опытных образцов коробочек, заключающийся в отделении коробочек с плодоножкой от стеблей, по 200 шт. разной спелости.

После отбора образцов производилось их разделение в зависимости от стадии спелости и влажности.

Определение статистических характеристик вариационного ряда производилось по классическому способу [90]. Основными характеристиками вариационного ряда являются:

– среднее арифметическое

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3.8)$$

где n – число выборки;

– среднее квадратическое отклонение

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}; \quad (3.9)$$

– ошибка средней арифметической

$$m_M = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \quad (3.10)$$

– показатель точности опыта

$$C_V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100; \quad (3.11)$$

– коэффициент вариации по среднему квадратическому отклонению

$$p = \frac{C_V}{\sqrt{n}}. \quad (3.12)$$

Размеры коробочек льна, используемых в опытах, находились в следующих пределах:

– зеленые коробочки: длина – 7,1–8 мм (среднее значение – 7,8 мм); диаметр – 6,2–6,8 мм (среднее значение – 6,5 мм);

– желтые коробочки: длина – 7,0–7,9 мм (среднее значение – 7,7 мм); диаметр – 6,3–6,8 мм (среднее значение – 6,6 мм);

– бурые коробочки: длина – 7,0–0,9 мм (среднее значение – 7,7 мм); диаметр – 6,4–6,9 мм (среднее значение – 6,6 мм).

3.5. Методика проведения лабораторных исследований

Факторные исследования, дисперсионный анализ их результатов и экстремальное планирование эксперимента являются современными методами экспериментальных 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 и их взаимодействий на исследуемый параметр, а также найти оптимальное сочетание факторов [91, 32, 72, 73, 80, 81].

В процессе решения экстремальной задачи предусматривается ряд последовательных этапов [52]. Вначале производим серию отсеивающих экспериментов и после обработки результатов получаем представление о степени влияния отдельных факторов на параметр оптимизации. При этом для сокращения объема дальнейших исследований малозначащие факторы исключаем. На следующем этапе ведем поиск области оптимума, где вначале с помощью небольшого числа опытов находим правильное направление, в котором нужно проводить дальнейшие эксперименты. Двигаясь наискратчайшим путем, находим область оптимума. На этих этапах результаты опытов представляются уравнениями регрессии первого порядка. На последнем этапе ставится серия опытов для описания поверхности отклика полиномом второго порядка. После получения математической модели процесса проводим ее анализ на экстремум с целью отыскания оптимального сочетания факторов в исследуемом объекте [91, 32, 80, 39].

3.5.1. Обоснование и выбор основных факторов и интервалов их варьирования

Главным условием, определяющим наиболее полное соответствие изучаемого процесса его математическому описанию, является правильный выбор основных факторов, влияющих на процесс, а также областей их варьирования, соответствующих условиям работы с учетом работоспособности конструкции и возможности конструкционно-го исполнения рабочего органа [81]. При определении границ интервалов изменения факторов необходимо также учитывать априорную информацию о влиянии факторов на значения параметров оптимизации.

Для изучения процесса отделения семенной части от стеблей льна роторно-бильным аппаратом на основании теоретических исследова-

ний и априорной информации [23, 31, 34, 49, 66, 79, 88, 128, 142, 143, 146, 200 и др.] нами были выделены следующие факторы: окружная скорость ротора (v_p , м/с); радиальный зазор (Δ , м); осевой зазор (Δ_o , м); ширина торцевой поверхности бича (b_b , м); поперечный угол боковой поверхности бича (α_b , рад); поперечный угол передней поверхности бича (α_n , рад); скорость подачи ленты льна ($v_{л}$, м/с); толщина ленты льна ($h_{сл}$, м); угол установки боковой деки (τ , рад); влажность стеблей льна (W , %); ширина зоны расположения семенных коробочек в ленте ($L_{ск}$, м).

Эффективность процесса отделения семенной части от стеблей льна во многом зависит от геометрических параметров бича: ширины торцевой части бича b_b , поперечного угла боковой поверхности бича α_b и поперечного угла передней поверхности бича α_n .

Пределы варьирования поперечного угла боковой поверхности бича α_b принимались исходя из обеспечения скольжения обрабатываемого материала по поверхности бича и прижатия стеблей к боковой деке. Верхняя граница устанавливалась на уровне 0,785 рад (45°) исходя из значения динамического коэффициента трения [64]. Значение нижней границы интервала варьирования определялось в ходе эксперимента по значениям критериев оптимизации – чистоты обмолота $\chi_{об}$ и степени повреждения стеблей Π_c . Шаг изменения угла был принят равным 0,087 рад (5°).

На захват бичом порции льна и дальнейшее протаскивание ее в молотильное пространство существенное влияние оказывает поперечный угол передней поверхности бича α_n . Границы варьирования угла устанавливались с учетом влажности обрабатываемого материала и динамического коэффициента трения. Нижний предел был установлен на уровне 1,05 рад (60°), а верхний – 1,48 рад (85°). Шаг изменения был принят равным 0,087 рад (5°).

Ширина торцевой поверхности бича, соответствующая нижней границе, была выбрана равной 0,03 м (см. подраздел 2.5). Шаг изменения принимался равным 0,01 м. Верхняя граница определялась в ходе проведения эксперимента по значениям чистоты обмолота $\chi_{об}$ и степени повреждения стеблей Π_c .

Пределы варьирования толщины ленты льна $h_{сл}$ принимались на основании возможной минимальной и максимальной урожайности, а также ширины захвата льнотеребилки с учетом зависимостей (1.8) и (1.9): нижний предел – 0,02 м, верхний – 0,07 м. Шаг изменения принимали равным 0,01 м.

Значения границ радиального зазора Δ устанавливали исходя из обеспечения отделения и (или) разрушения семенных коробочек льна с учетом уравнения (1.10), а также толщины ленты льна, подаваемой на обмолот. Исходя из этих условий нижняя граница была принята равной 0,005 м, верхняя граница определялась в ходе проведения эксперимента по значениям параметров оптимизации. Шаг изменения принимали равным 0,003 м.

При установлении значений границ осевого зазора Δ_0 нижнюю границу принимали равной 0,001 м исходя из обеспечения свободного вращения ротора, верхнюю границу определяли в ходе проведения эксперимента по значениям параметров оптимизации процесса обмолота. Шаг изменения принимали равным 0,002 м.

Большое влияние на процесс обмолота оказывает такой фактор, как скорость подачи ленты льна $v_{\text{л}}$. Поскольку при установившемся режиме работы обмолачивающего аппарата скорость подачи ленты льна $v_{\text{л}}$ соответствует скорости зажимного транспортера $v_{\text{тр}}$, то в процессе исследований изменяли скорость зажимного транспортера. Нижнюю границу определяли из условия обеспечения минимальной необходимой производительности и принимали равной 1,32 м/с. Значение верхней границы интервала варьирования определяли в ходе эксперимента по значениям параметров оптимизации. Шаг изменения скорости принимали равным 0,3 м/с.

Существенное влияние на параметры оптимизации процесса обмолота оказывает окружная скорость ротора $v_{\text{р}}$. Значение нижней границы окружной скорости ротора устанавливали равным 7 м/с (см. подраздел 2.5). Шаг изменения принимали равным 3 м/с. Значение верхней границы скорости ротора устанавливали в ходе проведения эксперимента по значениям параметров оптимизации.

От угла установки боковой деки τ зависит способность бича протаскивать обрабатываемую ленту льна в молотильное пространство и уплотнять ее в пространстве между ротором и боковой декой. Значение нижней границы угла установки боковой деки принимали равным 0,174 рад (10°) исходя из значения продольного угла бича. Значение верхней границы определяли в ходе эксперимента по значениям чистоты обмолота $\text{Ч}_{\text{об}}$ и степени повреждения стеблей льна $\text{П}_{\text{ст}}$. Шаг изменения угла установки боковой деки принимали равным 0,035 рад (2°).

Влияние ширины зоны расположения семенных коробочек $L_{\text{ск}}$ в обмолачиваемой ленте льна на качество обмолота отмечено в работах

А. Н. Зинцова [33, 34] и В. В. Комарова [50]. Нами этот фактор исследовался в диапазоне от 0,2 до 0,6 м с учетом его минимально и максимально возможных значений, обусловленных морфологическими свойствами льна и режимом работы комбайна. Шаг изменения ширины зоны расположения семенных коробочек в ленте принимали равным 0,1 м.

Диапазон изменения влажности льна принимался на основании априорной информации [79, 128], а также физиологических свойств убираемого льна – $W = 10 \dots 60 \%$. Шаг изменения влажности принимали равным 5 %. Определение относительной влажности стеблей и коробочек льна производили путем высушивания с предварительным и последующим взвешиванием и расчетом по формулам.

Основным показателем, по которому оценивался процесс обмолота, являлась чистота обмолота $\text{Ч}_{\text{об}}$ [38], которая определялась по формуле

$$\text{Ч}_{\text{об}} = 1 - \frac{q_{\text{с.н}}}{M_{\text{с}}}, \quad (3.13)$$

где $q_{\text{с.н}}$ – масса семян из неотделенных коробочек, кг;

$M_{\text{с}}$ – масса семян, прошедшая через обмолочивающий аппарат за опыт, кг.

Степень повреждения стеблей $\text{П}_{\text{с}}$ [38] (влияющая на выход длинного волокна) определялась по формуле

$$\text{П}_{\text{с}} = \frac{n_{\text{п.ст}}}{n_{\text{о}}}, \quad (3.14)$$

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

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

При проведении опытов взвешенная порция льна, подготовленная к обмолоту, вручную равномерно распределялась в подающем транспорте. Порция обмолоченных стеблей взвешивалась, неотделенные коробочки обрывались, а после сушки из них выделялись и взвешивались семена. Все значения приводились к стандартной влажности и записывались в журнал наблюдений. Чистота обмолота $\text{Ч}_{\text{с}}$ [141] и степень повреждения стеблей $\text{П}_{\text{с}}$, влияющие на выход длинного волокна, определялись по зависимостям (3.13) и (3.14) соответственно согласно ГОСТ 33734–2016.

3.5.2. Устройство лабораторной установки и методика проведения исследований

С целью проверки работоспособности и уточнения основных параметров и режимов работы роторно-бильного аппарата, определенных в результате теоретических изысканий, были проведены лабораторные исследования. Для этого была изготовлена специальная установка, позволяющая моделировать процесс отделения семенной части от стеблей льна разрабатываемым аппаратом (рис. 3.6).

Экспериментальная установка включала подающий транспортер 1, передвижной модуль стола-деки 2, зажимной транспортер 3, нижнюю деку 4, передвижной модуль ротора 5, смонтированные на единой раме, и емкость для сбора вороха 6. Подающий транспортер 1 приводился в движение с помощью цепной передачи от вала ведомого ролика зажимного транспортера таким образом, что линейная скорость ленты подающего транспортера была равна линейной скорости ленты зажимного транспортера.

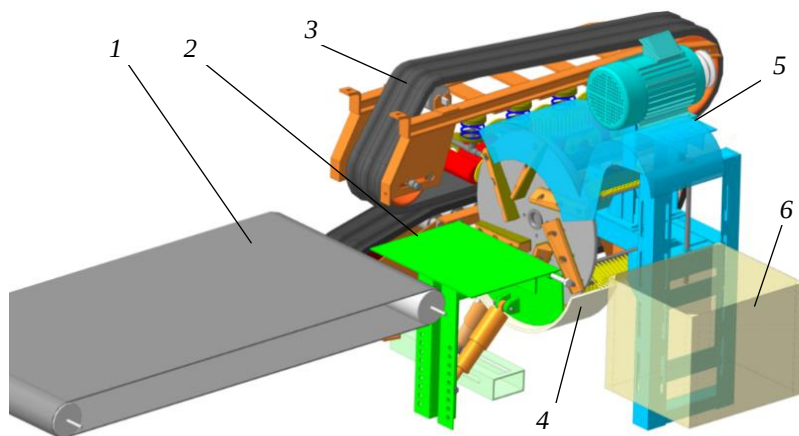


Рис. 3.6. Общий вид лабораторной установки:

- 1 – подающий транспортер; 2 – модуль стола-деки; 3 – зажимной транспортер;
4 – нижняя дека; 5 – модуль ротора; 6 – емкость для сбора вороха

Зажимной транспортер приводился в движение мотор-редуктором марки ZG 2 KMR 90 L4 мощностью 2,2 кВт. Привод зажимного транс-

портера был снабжен индивидуальным преобразователем частоты OMRON VS mini J7. Привод ротора состоял из электромотора KMR 100 L4 мощностью 3,0 кВт и клиноременной передачи. Привод ротора был снабжен индивидуальным преобразователем частоты Danfoss VLT Micro Drive FC 51 132F0026, позволяющим бесступенчато изменять частоту вращения ротора.

Молотильное пространство (зона обмолота) было образовано боковой поверхностью модуля стола-деки со стороны ввода обмолачиваемой ленты, поверхностью нижней деки и диском ротора.

Модуль стола-деки (рис. 3.7) имел раму 1, в верхней части которой был установлен стол 2. Боковая дека 3 верхней частью была шарнирно присоединена к столу, а нижней частью посредством демпфера 5 – к раме. Изменение положения модуля стола-деки относительно других рабочих органов лабораторной установки осуществлялось путем перестановки крепежных болтов в отверстиях рамы, изменение угла установки боковой деки – путем поднятия или опускания крепления демпфера по раме, что обеспечивало изменение угла в диапазоне 0–25°.

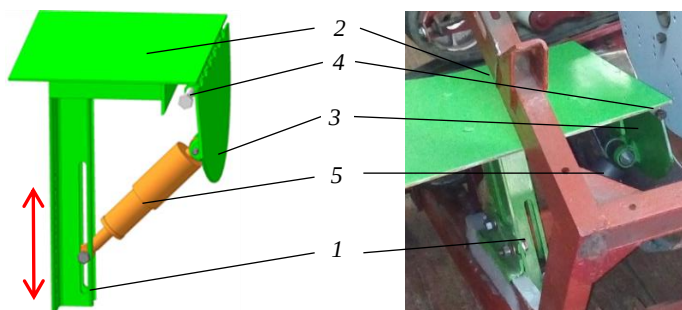


Рис. 3.7. Модуль стола-деки:
1 – рама; 2 – стол; 3 – боковая дека; 4 – ось; 5 – демпфер

Конструкция крепления нижней деки 1 (рис. 3.8) позволяла изменять ее положение относительно ротора. Задняя часть деки была шарнирно закреплена на стойке с возможностью вертикального перемещения в пределах 0–0,12 м. Положение передней части регулировали смещением демпфера 2 в корпусе регулировочного устройства 3.

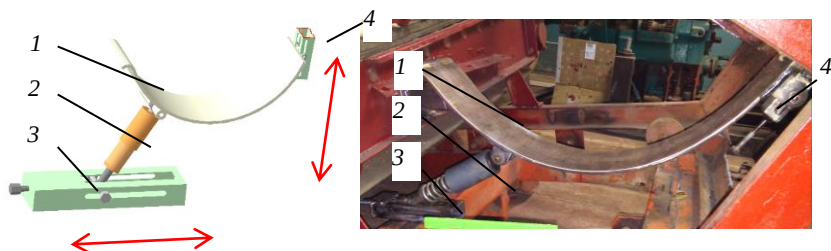


Рис. 3.8. Схема крепления нижней деки:

1 – нижняя дека; 2 – демпфер; 3 – регулировочное устройство; 4 – стойка

Модуль ротора (рис. 3.9) представлял собой лифтовое устройство, выполненное в виде двух соединенных между собой болтами полурам: вертикальной опорной 1 и Г-образной 2, с возможностью вертикального перемещения последней с помощью винта 4. На Г-образной полураме была установлена стойка 3 электродвигателя, на верхней платформе которой был расположен электродвигатель 5, а на нижней ее платформе – приводной вал 8 ротора таким образом, чтобы обеспечивалась жесткая конструкция ротора 9 с приводным механизмом и электродвигателем.

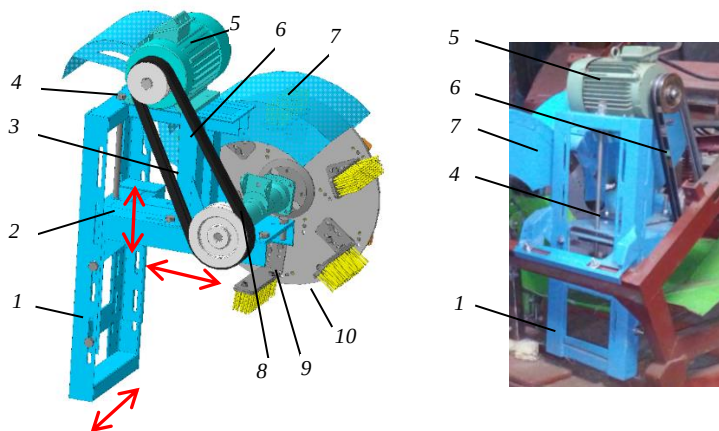


Рис. 3.9. Модуль ротора:

1 – опорная рама; 2 – подвижная рама; 3 – стойка электродвигателя;
4 – винт поднятия и опускания подвижной рамы; 5 – электродвигатель;
6 – ременная передача; 7 – кожух; 8 – приводной вал; 9 – ротор; 10 – щетка

Стойка электродвигателя с ротором имела возможность продольного (вдоль оси ротора) перемещения в пазах подвижной Г-образной полурамы. Со стороны подаваемой на обмолот ленты льна на роторе были установлены бичи, а с другой его стороны – вычесывающе-транспортирующие щетки 10. Для изменения положения бичей на роторе были выполнены резьбовые отверстия, обеспечивающие установку бичей на различном расстоянии от их задних граней до оси вращения ротора – 0,052, 0,069, 0,086, 0,103 и 0,12 м. Также было предусмотрено радиальное смещение щеток путем перестановки их крепления в отверстиях. Разработанная конструкция модуля ротора позволяла изменять положение ротора в следующих диапазонах: продольное перемещение – до 0,14 м; поперечное перемещение – до 0,062 м; вертикальное перемещение – до 0,2 м.

Ротор с бичами приведен на рис. 3.8. При проведении исследований изменение частоты вращения ротора осуществляли при помощи частотного преобразователя.

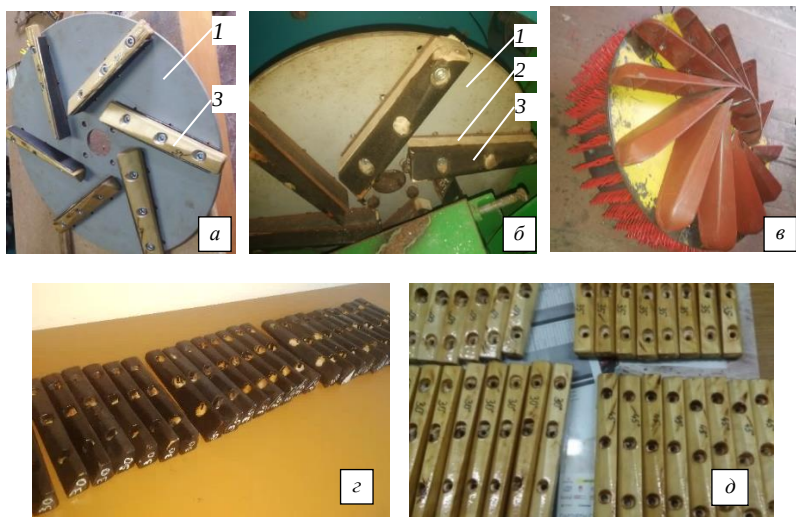


Рис. 3.10. Ротор с бичами:

а – вид ротора спереди; *б* – ротор с бичами и проставкой; *в* – ротор с 12 бичами; *г* – бичи с поперечным углом наклона боковой поверхности 20°, 25°, 30°, 35°, 40° и 45°; *д* – бичи с поперечным углом наклона передней поверхности 60°, 65°, 70°, 75°, 80° и 85°; 1 – ротор; 2 – проставка; 3 – бич

На рис. 3.11 представлен общий вид лабораторной установки.

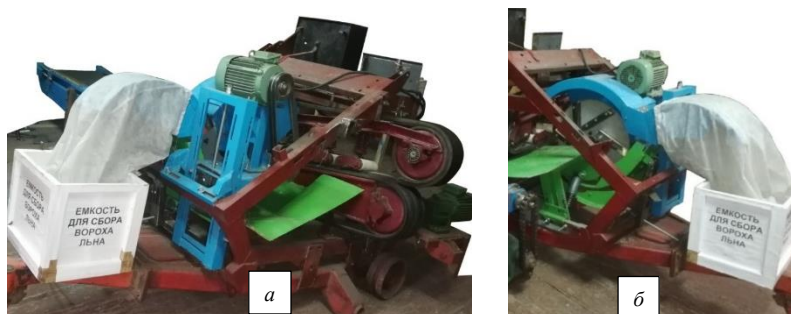


Рис. 3.11. Общий вид лабораторной установки:
a – вид со стороны выхода ленты льна; *б* – вид со стороны подачи ленты льна

Таким образом, конструкция лабораторной установки позволяла в необходимых пределах изменять [52] выбранные параметры (табл. 3.1).

Таблица 3.1. Факторы, диапазон их изменения и значения опорных точек

Наименование фактора	Условное обозначение	Опорная точка	Диапазон изменения фактора
Ширина торцевой поверхности бича, м	b_6	0,05	0,03–0,08
Толщина ленты льна, м	$h_{сл}$	0,04	0,02–0,07
Радиальный зазор, м	Δ	0,01	0,005–0,02
Осевой зазор, м	Δ_0	0,005	0,001–0,011
Скорость подачи ленты льна, м/с	v_n	1,7	1,32–2,82
Окружная скорость ротора, м/с	v_p	12	7–17
Угол установки боковой деки, рад (°)	τ	0,174 (12)	0,174–0,349 (10–20)
Ширина зоны расположения семенных коробочек в ленте, м	$L_{ск}$	0,3	0,2–0,6
Поперечный угол наклона передней поверхности бича, рад (°)	α_n	1,22 (70)	1,05–1,48 (60–85)
Поперечный угол наклона боковой поверхности бича, рад (°)	α_6	0,524 (30)	0,35–0,785 (20–45)
Влажность стеблей льна, %	W	50	10–60

Лабораторная установка работала следующим образом. Фрагмент обмолачиваемой ленты льна вручную равномерным слоем необходимой толщины укладывали на подающий транспортер. Включали при-

вод ротора, а затем привод зажимного и подающего транспортеров. Жажимной транспортер перемещал ленту через зону обмолота, где в молотильном пространстве стебли подвергались воздействию на них бичей, а затем вычесывающе-транспортирующих щеток. Далее обмолоченный фрагмент ленты льна укладывался на пол, а полученный льноворох, направляемый улиткообразным кожухом, транспортировался в отдельную емкость для сбора вороха льна.

Опыты по исследованию параметров роторно-бильного аппарата выполнялись по приведенной ниже методике.

На первом этапе исследований были проведены однофакторные эксперименты по уточнению рациональных значений: поперечного угла наклона боковой поверхности бича α_b , поперечного угла наклона передней поверхности бича α_n , ширины торцевой части бича b_b . Для этого было изготовлено шесть комплектов бичей с поперечным углом наклона боковой поверхности 20° , 25° , 30° , 35° , 40° и 45° и шесть комплектов бичей с поперечным углом наклона передней поверхности 60° , 65° , 70° , 75° , 80° и 85° (см. рис. 3.10, *з* и *д*). Ширину торцевой части бича изменяли путем установки проставок бича (см. рис. 3.10, *б*).

Бичи на ротор устанавливали со смещением на величину r от его оси, а ротор относительно стола с декой устанавливали таким образом, чтобы бич в начале взаимодействия с подаваемой на обмолот лентой льна воздействовал на нее всей передней поверхностью. Вычесывающе-транспортирующие щетки при этом с ротора снимали. Оценку производили по чистоте обмолота (формула (3.13)) и степени повреждения стеблей (формула (3.14)).

Схема проведения поисковых экспериментов подразумевала поэтапное варьирование одного из факторов при фиксированных значениях остальных на уровнях опорных точек [156, 38].

На втором этапе исследований обмолачивающего аппарата были проведены однофакторные эксперименты с целью уточнения рациональных интервалов варьирования окружной скорости ротора, радиального зазора, осевого зазора, скорости подачи ленты льна, толщины ленты льна, угла установки боковой деки, влажности стеблей льна, ширины зоны расположения семенных коробочек в ленте.

Подготовленные фрагменты лент льна длиной 1,5 м в виде слоя равной толщины (рис. 3.12) укладывали на подающий транспортер (рис. 3.13) и затем производили обмолот при соответствующих значениях исследуемых параметров (рис. 3.14) [175, 177].



Рис. 3.12. Подготовленные фрагменты лент льна



Рис. 3.13. Уложенный на транспортер фрагмент ленты льна

Ворох собирали в емкость, а стебли – в снопики, которые нумеровали (рис. 3.15).



Рис. 3.14. Обмолот фрагмента ленты льна



Рис. 3.15. Обмолоченные стебли льна

Каждый опыт проводился в трехкратной повторности для обеспечения доверительной вероятности 0,95, как наиболее распространенной при технических исследованиях в области сельскохозяйственного машиностроения [72, 80]. Полученные после обмолота льноворох и стебли льна подвергались обработке.

Исследования проводились со стеблями льна влажностью 58–66 %, средней длиной 0,72 м и растянутостью 1,1.

3.6. Методика проведения производственных испытаний предлагаемого роторно-бильного аппарата

Для подтверждения установленных при проведении лабораторных исследований интервалов варьирования параметров роторно-бильного аппарата, разработанного с учетом результатов лабораторных исследований, были проведены его производственные испытания. Для этого был переоборудован льноуборочный комбайн «Двина-4М» – вместо серийного гребневого очесывающего аппарата установлен разработанный в Белорусской государственной сельскохозяйственной академии роторно-бильный аппарат (рис. 3.16), конструкционные параметры которого приведены в табл. 3.2.

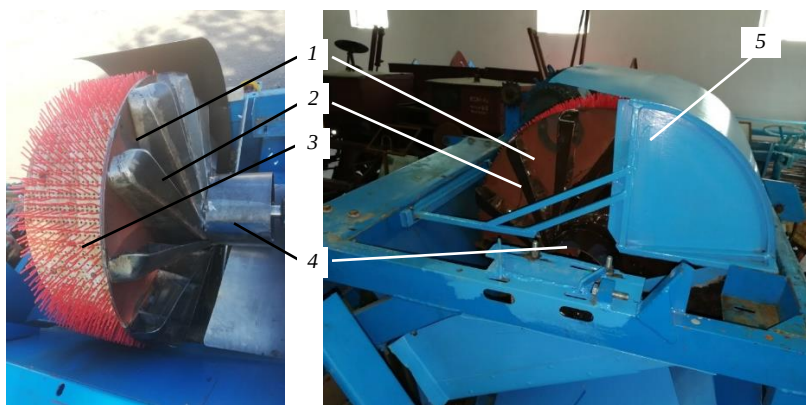


Рис. 3.16. Роторно-бильный аппарат на льноуборочном комбайне «Двина-4М»: 1 – диск ротора; 2 – бич; 3 – вычесывающе-транспортирующая щетка; 4 – защитное кольцо; 5 – кожух

Таблица 3.2. Параметры роторно-бильного аппарата

Наименование параметра	Условное обозначение	Значение
Радиус ротора, м	R	0,35
Радиус защитного кольца, м	r	0,12
Количество бичей, шт.	k_6	12
Ширина торцевой поверхности бича, м	b_6	0,055
Продольный угол наклона боковой поверхности бича, рад ($^{\circ}$)	β_6	0,21 (12°)
Поперечный угол наклона передней поверхности бича, рад ($^{\circ}$)	α_n	1,39 (80°)
Поперечный угол наклона боковой поверхности бича, рад ($^{\circ}$)	α_6	0,47 (27°)

Схема переоборудованного льноуборочного комбайна приведена на рис. 3.17.

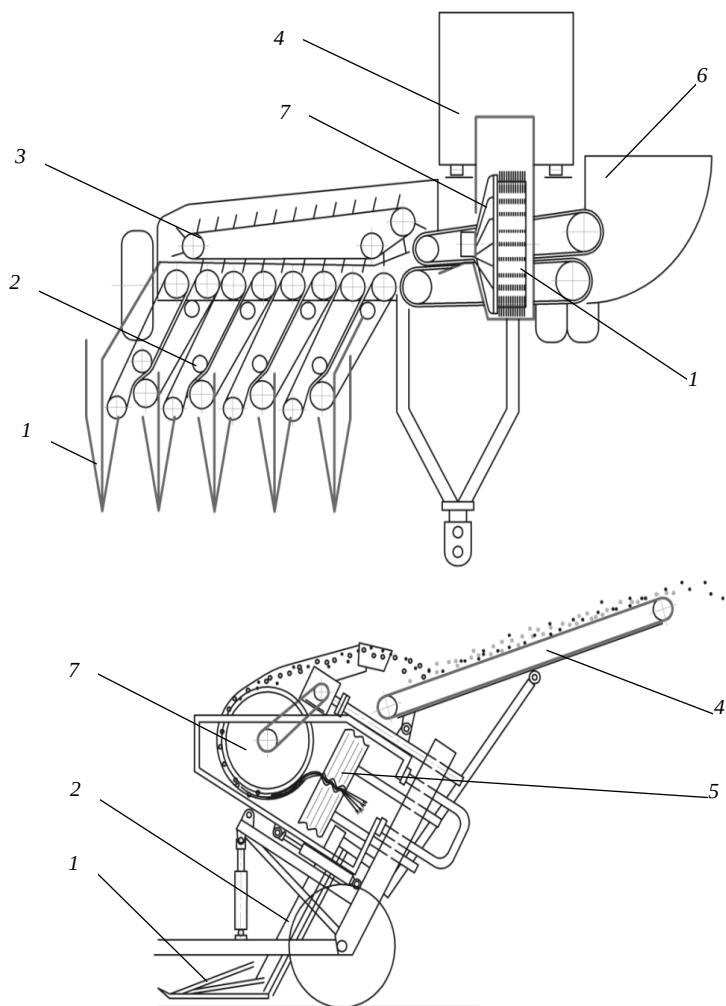


Рис. 3.17. Схема переоборудованного льноуборочного комбайна с роторно-бильным аппаратом: 1 – делители; 2 – тербильный аппарат; 3 – поперечный транспортер; 4 – выгрузной транспортер; 5 – зажимной транспортер; 6 – расстильное устройство; 7 – роторно-бильный аппарат

Выполняемый переоборудованным комбайном технологический процесс аналогичен процессу, выполняемому серийным льноуборочным комбайном «Двина-4М». Исключение составляют процессы отделения семенной части от стеблей льна и транспортирования вороха.

Общий вид льноуборочного комбайна «Двина-4М» с роторно-бильным аппаратом представлен на рис. 3.18.



Рис. 3.18. Общий вид льноуборочного комбайна «Двина-4М» с роторно-бильным аппаратом

Перед началом испытаний на основании типовой программы была составлена рабочая программа-методика испытаний, в которой с учетом особенностей исследуемого образца были указаны: перечень видов оценок и определяемых показателей по каждому виду оценки; режимы; условия; место испытаний; наименования применяемых при испытаниях средств измерений и оборудования, фактические показания которых записывали в рабочие формы испытаний.

Характеристику культуры на корню определяли на участке, отведенном для испытаний льнокомбайна. До начала испытаний по диагонали участка через равные интервалы выделяли 10 площадок размером $0,25 \text{ м}^2$, на которых учитывали естественные потери семян (свободные семена и коробочки с поверхности поля собирали в емкость, выделяли из коробочек семена и взвешивали на лабораторных весах (рис. 3.19)).

Для определения спелости и влажности льна рядом с каждой учетной площадкой отбирали порцию стеблей льна, из которой формировали общую пробу. Затем эту пробу делили на две части. Из одной отбирали стебли и коробочки для определения влажности (не менее

пяти порций) по ГОСТ 20915, ГОСТ 12041. Из второй части отсчитывали 300 стеблей, из коробочек которых выделяли семена и по их цвету определяли спелость льна [91].



Рис. 3.19. Весы лабораторные ВК-600

Полеглость стеблестоя льна оценивали визуально по пятибалльной шкале:

- 5 баллов – полегания нет (стебли стоят вертикально);
- 4 балла – слабое полегание (стебли слегка наклонены);
- 3 балла – среднее полегание (стебли наклонены примерно на 45°);
- 2 балла – сильное полегание (затрудняющее машинную уборку);
- 1 балл – очень сильное полегание (машинная уборка значительно затруднена).

Оценку полегания стеблестоя проводили путем осмотра пятиметровых отрезков, расположенных подряд по всей длине участка в трехкратной повторности. Полегание стеблестоя выражали средним баллом.

Зону расположения семенных коробочек в стеблестое и ее высоту над поверхностью поля определяли на каждой учетной площадке. По длине всего учетного участка через равные интервалы проводили 40 измерений. Зона расположения коробочек – расстояние от их нижней границы (положения нижних коробочек в стеблестое) до верхней (верхушек стеблей). Высота расположения зоны коробочек – расстояние от поверхности почвы до их нижней границы. Погрешность измерения – ± 1 см. По результатам измерений вычисляли среднее арифметическое значение с округлением до целого числа.

Линейные параметры измеряли при помощи рулетки Р5УЗП ГОСТ 7502–98 3-го класса точности. Диаметр d_c стеблей замеряли на

1/3 высоты стебля при помощи [141] электронного штангенциркуля ШЦЦ-I ГОСТ 166–89 1-го класса точности. Число $n_{\text{кс}}$ семенных коробочек определяли путем подсчета, причем плохо сформированные коробочки в расчет не принимали [141].

Массу 1000 шт. семян определяли по ГОСТ 12042.

Биологическую урожайность семян и льносоломы Y (кг/га) вычисляли по усредненным данным по формуле

$$Y = \frac{10\bar{q}}{S}, \quad (3.15)$$

где $\bar{q}$ – средняя масса семян (льносоломы) с учетной площадки, г;

S – площадь учетной площадки, равная $0,25 \text{ м}^2$.

Естественные потери в коробочках и свободными семенами $E_{\text{п}}$ (кг/га) вычисляли по формуле

$$E_{\text{п}} = \frac{nM}{100S}, \quad (3.16)$$

где n – число семян с учетной площадки, кг/га;

M – масса 1000 семян, г.

Урожайность семян и льносоломы Y_1 (кг/га) приводили к стандартной влажности (семян – 12 %, соломы – 19 %) по формуле

$$Y_1 = \frac{Y(100 - w_1)}{100 - w_{\text{ст}}}, \quad (3.17)$$

где w_1 – фактическая влажность при разборе (семян, соломы), %;

$w_{\text{ст}}$ – стандартная влажность (семян, соломы), %.

Засоренность культуры сорняками Z (%) вычисляли по формуле

$$Z = \frac{q_c}{q_r} 100, \quad (3.18)$$

где q_c – масса сорняков в снопе, г;

q_r – масса снопа, г.

Густоту стеблестоя i_0 (шт/м) вычисляли по формуле

$$i_0 = 4n_{\text{с.п}}, \quad (3.19)$$

где $n_{\text{с.п}}$ – среднее арифметическое число стеблей льна на площадках размером $0,25 \text{ м}^2$, шт/м².

Пробы для определения влажности стеблей и коробочек брали из снопов непосредственно перед их обмолом (пять порций). Влажность определяли по ГОСТ 20915.

Для характеристики ленты льна на поле в двух местах каждой повторности через равные интервалы отмечали трехметровые участки ленты. Посередине ленты натягивали шнур, размеченный на отрезки длиной 0,5 м. Измерение показателей (ширины ленты, угла перегиба стеблей в ленте, длины стеблей льна) проводили у отметок шнура. Случайно выдвинутые комли и верхушки стеблей при измерениях не учитывали.

Ширину ленты льна определяли по сумме измерений в обе стороны (к комлю и верхушке стебля) от шнура на всех участках ленты. Число измерений – не менее 30. Погрешность измерения – ± 1 см. По результатам измерений вычисляли среднее арифметическое значение с округлением до целого числа.

Угол отклонения стеблей в ленте льна измеряли между перпендикуляром к направлению движения машины и направлением положения основной массы стеблей в ленте. Число измерений – не менее 30. Погрешность измерения – $\pm 1^\circ$. По результатам измерений вычисляли среднее арифметическое значение с округлением до целого числа.

Для характеристики растянутости ленты на каждом трехметровом участке отбирали две порции ленты массой около 200 г каждая и определяли ширину ленты и длину каждого стебля в порции в соответствии с ГОСТ 24383. Число измерений – не менее 10.

Растянность μ стеблей в ленте вычисляли по формуле

$$\mu = \frac{b_{\pi}}{l_{\Gamma}}, \quad (3.20)$$

где b_{π} – ширина ленты в порции, м;

l_{Γ} – среднее арифметическое значение длины стеблей в порции, м.

Вычисления проводили с округлением до первого десятичного знака.

Скорость агрегата определяли по формуле

$$v = \frac{L_{\pi}}{t_{\text{м}}}, \quad (3.21)$$

где L_{π} – длина пройденного пути, м;

$t_{\text{м}}$ – время движения машины, с.

Ширину захвата льнокомбайна определяли на каждой учетной делянке. Для этого на расстоянии не менее 3 м от стеблестоя через каждые 10 м ставили колышки. Расстояние от колышка до кромки стеблестоя измеряли до и после прохода машины. Фактическую ширину захвата определяли как разность измерений до и после прохода машины. Погрешность измерения – ± 1 см.

Для учета потерь семян под теребильным аппаратом на каждой повторности накладывали по три рамки длиной 1 м и шириной, равной рабочей ширине захвата. Рамки располагали на всю ширину захвата. Внутри рамки собирали свободные семена и семена, выделенные после подсушивания из оторванных коробочек и коробочек с оставленных (вытеребленными и невытеребленными) стеблей. В лаборатории все семена взвешивали отдельно по видам потерь. Погрешность взвешивания – ± 20 мг.

Потери семян в виде просыпания определяли как сумму потерь под очесывающим аппаратом и под лентой. Семенной материал собирали с помощью пологов (рис. 3.20), размещенных до прохода агрегата в двух местах на каждой учетной делянке. Ширина полога обеспечивала сбор материала от края убираемого стеблестоя льна до левого края ленты. После прохода агрегата ленту осторожно снимали с полога, связывали в сноп, а все потери собирали в пакеты. Расчет потерь проводили на площади, равной произведению длины полога на фактическую ширину захвата агрегата. В лаборатории сноп развязывали и осторожными движениями вытряхивали свободные семена и коробочки. Затем отделяли неотторванные коробочки. После выделения семян из коробочек все семена взвешивали. Погрешность взвешивания – ± 20 мг.

Все виды потерь семян приводили к стандартной влажности и рассчитывали в процентах к биологической урожайности.

Общие потери α_o (%) за теребильным аппаратом и от просыпания вычисляли по формуле

$$\alpha_o = (\alpha_{с.с} + \alpha_{с.к}) - E_n, \quad (3.22)$$

где $\alpha_{с.с}$ – потери свободными семенами, %;

$\alpha_{с.к}$ – потери семенами в коробочках, %.



Рис. 3.20. Общий вид поля и участка ленты при определении потерь семян

Чистоту обмолота $\text{Ч}_{\text{об}}$ роторно-бильным аппаратом вычисляли по формуле (3.13).

Для определения повреждения стеблей в каждой из трех повторностей в двух местах отбирали пробы стеблей на всю толщину ленты. От каждой пробы отбирали метровые порции срединных участков ленты льна, из которых извлекались и подсчитывались поврежденные стебли. При анализе учитывали на стебле только один вид повреждений (обрыв стебля, излом стебля с разрывом волокна, повреждения наружного слоя стебля до волокна) исходя из степени его значимости. Расчет степени повреждения стеблей осуществляли по формуле (3.14).

Стебли, имеющие надлом древесины, расплющивание и скручивание без разрыва волокна, относили к целым.

Повреждение и дробление семян аппаратом определяли путем учета всех поврежденных и дробленых семян, выделенных при анализе навесок всех проходов.

Определение рациональных значений основных параметров обмолачивающего аппарата производили по качественным показателям процесса: чистоте обмолота, степени повреждения стеблей.

3.7. Изучение размерно-массовых характеристик вороха

Определение состава вороха осуществляли следующим образом. Всю площадь тракторного прицепа с семенным ворохом льна разбивали на 10 равных участков. Затем из этих 10 участков случайным образом выбирали 5 [20, 91, 39], из которых на глубину всей насыпи отбирали навески вороха массой не менее 5 кг и производили их разборку.

Отдельно выбирали стебли, сорняки, коробочки и свободные семена. Фракции, полученные таким образом, взвешивали по отдельности и определяли процентное массовое содержание их в общем объеме вороха [52]. При разборке образца определяли также содержание в ворохе солоmistых частиц определенной длины и массы, диаметр этих частиц и диаметр коробочек льна. Для этого образец разделяли на фракционные группы с интервалом 10 мм, затем взвешивали каждую группу отдельно и определяли ее процентное содержание в данной пробе. Длину обрывков стеблей и других солоmistых частиц измеряли линейкой ГОСТ 5094–74 с точностью до 1 мм, диаметр солоmistых частиц и диаметр коробочек – с помощью штангенциркуля с точностью до 0,1 мм. Массу стеблей, коробочек и свободных семян определяли путем взвешивания на электронных весах ВК-600 с точностью 0,01 г. Повторность опытов трехкратная. При этом вероятность охвата генеральной средней в исчисленных пределах была равна 0,95. Значение относительной величины предельной ошибки [100] при исследовании сельскохозяйственных сред, материалов и растений рекомендуется выбирать в пределах 3–5 % [91, 80, 39].

Классическим способом [20, 91, 52, 39] определяли статистические характеристики вариационного ряда, основными из которых являются:

- среднее арифметическое $\bar{x}$;
- среднее квадратическое отклонение σ ;
- ошибка среднего арифметического значения m_M ;
- показатель точности опыта C_v , %;
- коэффициент вариации по среднему квадратическому отклонению p , %.

Выводы

1. Разработана программа экспериментальных исследований и изготовлены лабораторные установки и опытные образцы бичей с различной конфигурацией рабочих поверхностей [42, 174, 175, 177, 180].

2. Для изучения параметров ленты стеблей льна, проведения исследований роторно-бильного аппарата, получения математической модели процесса обмолота и определения рациональных параметров аппарата были разработаны:

- методика определения параметров подаваемой на обмолот ленты льна;
- методика определения удлинения стеблей в ленте льна под дей-

ствием рабочих органов обмолачивающего аппарата [155];

- методика проведения лабораторных исследований процесса обмолота [175, 177].

3. Обоснованы интервалы и уровни варьирования основных факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на параметры оптимизации процесса обмолота. При этом границы и (или) интервалы их варьирования установлены в следующих пределах [67, 69, 70, 155, 172, 173, 177, 181, 182]:

- ширина торцевой поверхности бича – от 0,03 м;
- толщина ленты льна – 0,02–0,07 м;
- радиальный зазор – от 0,005 м;
- осевой зазор – от 0,001 м;
- скорость подачи ленты льна – от 1,32 м/с;
- окружная скорость ротора – 7–17 м/с;
- ширина зоны расположения семенных коробочек в ленте – 0,2–0,6 м;
- угол установки боковой деки – от 0,174 рад (10°);
- поперечный угол наклона боковой поверхности бича – до 0,785 рад (45°);
- поперечный угол наклона передней поверхности бича – от 1,05 рад (60°);
- влажность стеблей льна – 10–60 %.

Продольный угол наклона боковой поверхности к плоскости диска фиксировался на уровне 0,21 рад (12°).

4. Разработана методика проведения производственных испытаний льноуборочного комбайна с роторно-бильным аппаратом, позволяющая определять качественные показатели (чистота обмолота, степень повреждения стеблей и потери семян) его работы при изменении параметров в пределах [116, 132, 180]:

- радиальный зазор – 0,007–0,012 м;
- кратность воздействий бичами на фрагмент ленты льна – 1,27, 1,36 и 1,49.

5. Разработана методика определения размерно-массовых характеристик и объемной массы семенного вороха льна, получаемого льноуборочным комбайном [116, 132, 180].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Результаты определения параметров подаваемой на обмолот ленты льна

При проведении лабораторных исследований толщина слоя стеблей льна, количество семенных коробочек на стебле, количество семян в коробочке, длина стеблей, средняя ширина ленты льна, растянутость ленты льна и влажность стеблей льна изменялись и контролировались в зависимости от требуемых условий эксперимента.

Предварительно определяли угол перегиба стеблей в ленте льна. Установлено, что стебли отклоняются как в сторону по ходу движения (–), так и в сторону против движения (+) ленты льна. С целью определения однородности полученных значений была выполнена нормировка опытных данных, состоящая в вычислении стандартного отклонения от их среднего арифметического значения и в пересчете данных в этой шкале. В результате такого преобразования была получена шкала стандартных отклонений, на которой некоторые значения выделялись как по знаку, так и по абсолютной величине (интервал значений был от –17 до +14). Но эти значения не превышали двух стандартных отклонений, поэтому их можно считать принадлежащими одной общей совокупности. Далее была произведена проверка на подчинение опытных данных нормальному закону распределения для выяснения применимости к ним параметрических методов исследования.

Проверка производилась по критерию хи-квадрат. В результате этого было установлено, что обобщенные данные не подчиняются нормальному закону распределения и носят случайный характер [141] (рис. 4.1–4.4).

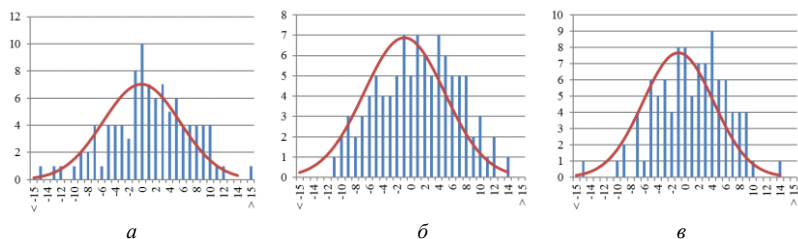


Рис. 4.1. Гистограммы распределения частот угла перегиба стеблей льна в ленте при скорости МТА 6,03 км/ч на высоте тербления: а – 0,2 м; б – 0,3 м; в – 0,4 м

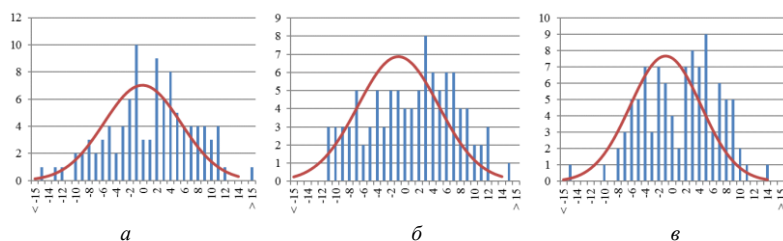


Рис. 4.2. Гистограммы распределения частот угла перегиба стеблей льна в ленте при скорости МТА 7,14 км/ч на высоте тербления: $a - 0,2$ м; $б - 0,3$ м; $в - 0,4$ м

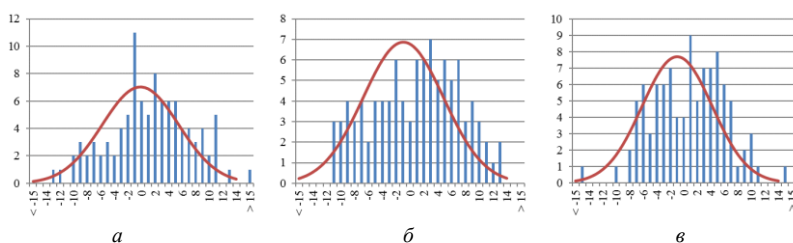


Рис. 4.3. Гистограммы распределения частот угла перегиба стеблей льна в ленте при скорости МТА 8,11 км/ч на высоте тербления: $a - 0,2$ м; $б - 0,3$ м; $в - 0,4$ м

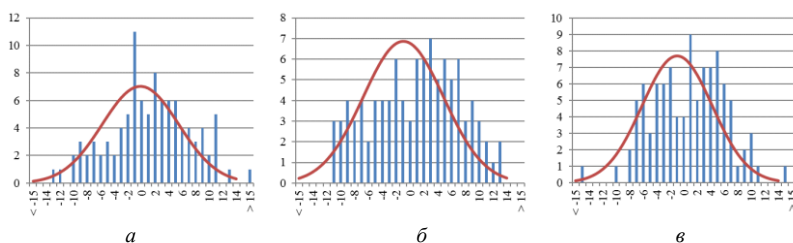


Рис. 4.4. Гистограммы распределения частот угла перегиба стеблей льна в ленте при скорости МТА 9,44 км/ч при высоте тербления: $a - 0,2$ м; $б - 0,3$ м; $в - 0,4$ м

В результате группировки результатов исследований по факторам (высоте тербления и скоростному режиму работы МТА) было установлено, что такие группы подчиняются закону нормального распределения при вероятности 0,05 и степени свободы 28. Эмпирический показатель хи-квадрат приведен в табл. 4.1.

Таблица 4.1. Значение эмпирического показателя хи-квадрат при различных режимах работы агрегата

Скоростной режим работы, км/ч	Высота теребления, м	Эмпирический хи-квадрат	Расчетное значение хи-квадрата
6,03	0,2	19,70	41,34
	0,3	13,21	
	0,4	28,55	
7,14	0,2	22,99	
	0,3	22,33	
	0,4	30,98	
8,11	0,2	22,41	
	0,3	19,91	
	0,4	29,98	
9,44	0,2	22,02	
	0,3	14,66	
	0,4	19,98	

Оценив полученные результаты, можно сделать вывод о том, что 97 % значений угла перекоса стеблей льна не превышают угол $+12^\circ$.

4.2. Результаты определения удлинения стеблей в ленте льна

В результате проведенных исследований была установлена взаимосвязь между удлинением $\Delta_{\text{л}}$ стеблей в ленте льна и длиной $L_{\text{об}}$ их от места зажима до верхушек (длиной выступающей из зажимного транспортера части стеблей льна). Получено 140 значений $\Delta_{\text{л}}$ и 140 расчетных значений коэффициента k при различных значениях $L_{\text{об}}$.

Статистическую обработку полученных данных проводили в Microsoft Excel с помощью надстройки «Анализ данных», «Однофакторный дисперсионный анализ» [39, 195]. В результате установлена доля влияния фактора (L_1) на величины $\Delta_{\text{л}}$ и $\Delta_{\text{ст}}$ соответственно: при величине $L_{\text{об}} = 0,46 \text{ м} - 33,07$ и $68,98 \%$; $L_{\text{об}} = 0,55 \text{ м} - 48,62$ и $35,40 \%$; $L_{\text{об}} = 0,64 \text{ м} - 76,99$ и $17,72 \%$; $L_{\text{об}} = 0,73 \text{ м} - 90,01$ и $2,67 \%$. Снижение доли влияния параметра L_1 на величины $\Delta_{\text{л}}$ и $\Delta_{\text{ст}}$ может объясняться наличием относительного сдвига стеблей в ленте льна.

Рассчитанный коэффициент корреляции между показателями $L_{\text{об}}$ и $\Delta_{\text{л}}$ составил $0,998$, а между показателями $L_{\text{об}}$ и $\Delta_{\text{ст}}$ – $0,987$, что свидетельствует о сильной прямой связи между ними. При проведении расчетов можно воспользоваться одним из них.

Также следует отметить, что изменение параметров k в зависимости от величины $L_{\text{об}}$ нелинейно.

Графики зависимостей длины участка Δ_l и κ от длины участка стебля льна $L_{об}$ от места зажима до вершины приведены на рис. 4.5.

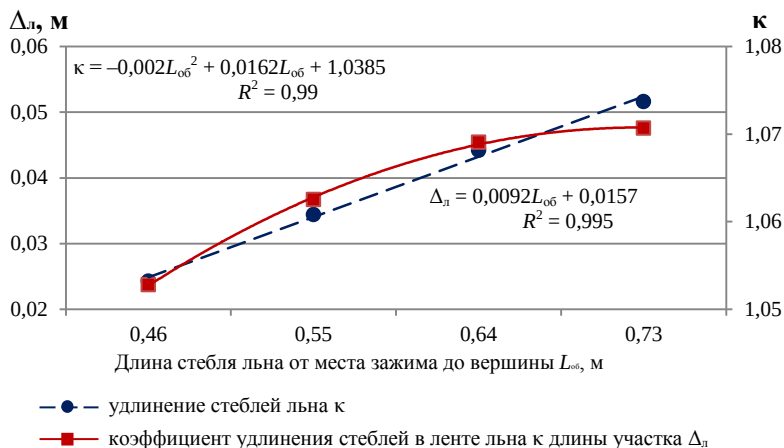


Рис. 4.5. Графики зависимости Δ_l и κ от $L_{об}$

Из рис. 4.5 видно, что параметр Δ_l хорошо подчиняется линейной зависимости от $L_{об}$ вида

$$\Delta_l = 0,0092L_{об} + 0,0157 \quad (4.1)$$

с коэффициентом детерминации, равным 0,995, а коэффициент κ – квадратичной зависимости

$$\kappa = -0,002L_{об}^2 + 0,0162L_{об} + 1,0385 \quad (4.2)$$

с коэффициент детерминации, равным 0,99. Полученные эмпирические закономерности изменения величины удлинения стебля льна Δ_l и коэффициента удлинения стеблей в ленте льна κ от ширины участка стеблей льна, находящегося в зоне обмолота $L_{об}$, могут быть использованы при определении и уточнении параметров обмолачивающего устройства.

4.3. Результаты определения усилия разрушения семенной коробочки

В результате проведенных исследований по определению деформаций и сил сжатия семенных коробочек льна были получены данные, устанавливающие взаимосвязь поперечной деформации семенной коробочки и силы ее сжатия при линейном нагружении и комбинированном (линейном нагружении с приложенным моментом кручения) для семенных коробочек в фазе зеленой, желтой и бурой спелости в зависимости от влажности. На основании полученных данных для средних значений деформаций и сил сжатия получены графические зависимости (рис. 4.6).

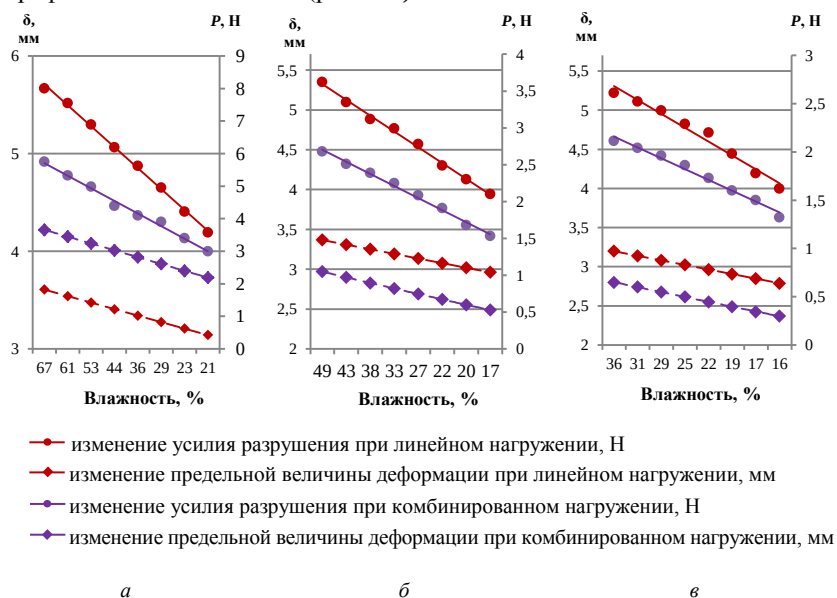


Рис. 4.6. Графики зависимости предельной величины смятия и силы разрушения от влажности в фазе зеленой спелости (а), желтой спелости (б) и бурой спелости (в)

Анализируя графические зависимости (рис. 4.6, а), можно сделать вывод о том, что величина смятия зеленых коробочек влажностью от 67 до 21 % при воздействии металлическими поверхностями изменяется от 3,05 до 3,61 мм при линейном воздействии на коробочки, от 2,67

до 3,23 мм при комбинированном нагружении. Зависимость усилия разрушения коробочек снижается при уменьшении влажности нелинейно и имеет выпуклую форму. Для зеленых коробочек влажностью от 67 до 21 % – с 8,1 до 3,58 Н при линейном воздействии на коробочки, с 5,75 до 2,62 Н при комбинированном.

Анализируя графические зависимости (рис. 4.6, б), можно сделать вывод о том, что величина смятия желтых коробочек влажностью от 49 до 17 % изменяется при линейном воздействии на коробочки от 2,88 до 3,37 мм, при комбинированном – от 2,49 до 2,97 мм.

Изменение сил разрушения семенной коробочки льна в фазе желтой спелости влажностью от 49 до 17 % происходит в пределах от 3,62 до 2,0 Н при линейном воздействии на коробочки и от 2,53 до 1,4 Н при комбинированном.

Критическая величина смятия коробочки льна в фазе бурой спелости в зависимости от влажности изменяется по линейной зависимости (рис. 4.6, в) от 2,7 до 3,2 мм при линейном воздействии на коробочки, от 2,37 до 2,8 мм – при комбинированном.

Изменение сил разрушения семенной коробочки льна в фазе бурой спелости влажностью от 36 до 17 % (рис. 4.6, в) происходит в пределах от 2,61 до 1,6 Н при линейном воздействии на коробочки, от 1,83 до 1,14 Н – при комбинированном.

Основными факторами, определяющими усилие разрушения коробочки льна-долгунца, являются степень спелости коробочки и ее влажность. Имеется сильная прямая связь между силой разрушения коробочки льна и ее влажностью (коэффициент корреляции в проведенных опытах колеблется от 0,94 до 0,99), а также высокая степень связи между критической величиной смятия и влажностью коробочек (коэффициент корреляции в проведенных опытах колеблется от 0,98 до 0,99). Скручивающее воздействие на коробочку льна-долгунца снижает усилие разрушения на 25–40 % в зависимости от влажности и степени зрелости, а величину предельного смятия – на 9–12,5 %.

Таким образом, комбинированное воздействие на коробочку льна-долгунца снижает усилие необходимое для ее разрушения, а также уменьшает критическую величину деформации.

4.4. Результаты поисковых исследований

Поисковые исследования проводились для определения интервалов и уровней варьирования факторов и степени влияния их на протекание

технологического процесса отделения семенной части от стеблей. Предметом исследований являлся роторно-бильный аппарат, установленный на изготовленной лабораторной установке.

Изучение процесса проводилось при влажности стеблей от 10 до 60 %.

При проведении опытов исходный материал имел следующую характеристику:

сорт льна	Грант
фаза спелости	желтая
влажность семенных коробочек, %	14–48
общая средняя длина стеблей, см	61,6
урожайность семян, т/га	0,45–0,6

За функции отклика были приняты чистота обмолота $\text{Ч}_{\text{об}}$ (формула (3.13)), т. е. количество семян, выделенных из ленты льна за один проход через молотильный аппарат, выраженное в долях ко всем семенам, находящимся в коробочках в подаваемой на обмолот ленте, и степень повреждений стеблей льна П_c (формула (3.14)), т. е. отношение числа поврежденных стеблей к общему числу обмолоченных стеблей.

Интервалы варьирования факторов и их границы были определены на основании проведенных теоретических исследований процесса обмолота и априорной информации [6]. Опыты проводились в трехкратной повторности.

При исследовании влияния поперечного угла наклона боковой поверхности бича α_6 на чистоту обмолота и степень повреждения стеблей льна угол изменяли в пределах от 0,35 рад (20°) до 0,785 рад (45°) с интервалом 0,086 рад (5°) (рис. 4.7).

Анализ результатов исследований и графической зависимости (рис. 4.7) позволяет сделать вывод о том, что с увеличением поперечного угла наклона боковой поверхности бича чистота обмолота изменяется по полиномиальной выпуклой кривой с эксцессом в диапазоне угла $\alpha_6 = 0,436 \dots 0,524$ рад (25–30°). Уменьшение чистоты обмолота при угле α_6 , большем 0,61 рад (35°), объясняется низкой вытирающей способностью боковой поверхностью бича. Повышение чистоты обмолота с увеличением угла α_6 от 0,35 рад (20°) до 0,47 рад (27°) объясняется повышенной деформацией слоя боковой поверхностью бича. Изменение степени повреждения стеблей при увеличении угла α_6 во всем диапазоне описывается линейно. Степень повреждения стеблей увеличивается от 0,017 до 0,028, что не превышает требований регламента по возделыванию льна-долгунца. В дальнейших исследованиях угол α_6 фиксировался на уровне 0,47 рад (27°).

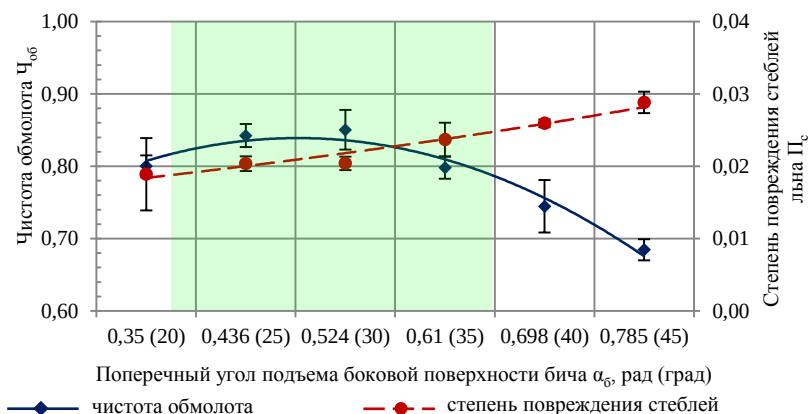


Рис. 4.7. Влияние поперечного угла наклона боковой поверхности бича на чистоту обмолота и степень повреждения стеблей

При исследовании влияния поперечного угла наклона передней поверхности бича α_n на чистоту обмолота и степень повреждения стеблей льна угол изменяли в пределах от 1,05 рад (60°) до 1,48 рад (85°) с интервалом 0,08 рад (5°). Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что поперечный угол наклона передней поверхности бича α_n оказывает значительное влияние на функции отклика (расчетное значение критерия Фишера больше табличного его значения) [7].

Зависимость чистоты обмолота льна от угла α_n (рис. 4.8) представляет собой выпуклую полиномиальную кривую с эксцессом в диапазоне значений угла $\alpha_n = 1,35 \dots 1,4$ рад (77–80°). При угле α_n , большем 1,4 рад, снижается растаскиваемость ленты льна бичом вдоль боковой деки, что понижает чистоту обмолота. Уменьшение угла α_n от 1,31 до 1,05 рад приводит к снижению чистоты обмолота с 0,95 до 0,72 по причине некачественного захвата бичом порции ленты льна, вследствие чего происходит сгруживание ленты перед ротором, накопление массы с последующим захватом бичом переуплотненной порции стеблей.

Зависимость степени повреждения стеблей от угла α_n представляет собой вогнутую полиномиальную кривую с эксцессом в диапазоне значений угла $\alpha_n = 1,36 \dots 1,43$ рад (78–82°). С увеличением угла ухудшается захват стеблей бичом, формируется более уплотненная порция стеблей и происходит дополнительное сжатие стеблей между бичом и жестко установленной декой. Воздействием на уплотненную порцию

стеблей обусловлена возрастающая степень их повреждения в диапазоне значений угла $\alpha_n = 1,36 \dots 1,05$ рад. В дальнейших исследованиях угол α_n фиксировался на уровне 1,4 рад (80°).

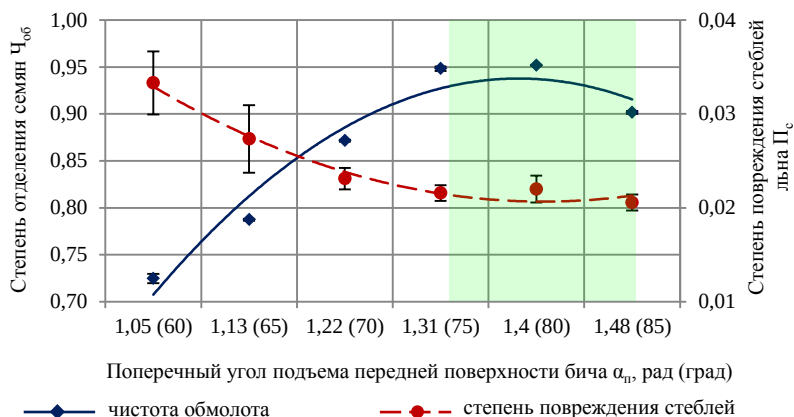


Рис. 4.8. Влияние поперечного угла наклона боковой поверхности бича на чистоту обмолота и степень повреждения стеблей

На следующем этапе исследовали ширину торцевой поверхности бича b_6 , которую изменяли в пределах от 0,03 до 0,08 м с интервалом варьирования 0,01 м. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что ширина торцевой поверхности оказывает существенное влияние на функции отклика (расчетное значение критерия Фишера больше табличного его значения). При ширине торца $b_6 = 0,03$ м (рис. 4.9) наблюдается наименьшая чистота обмолота, что объясняется недостаточной площадью поверхности, взаимодействующей со стеблями, а также происходит сгуживание обрабатываемой ленты стеблей льна у диска ротора. При изменении ширины торца от 0,03 до 0,06 м наблюдается интенсивное повышение чистоты обмолота. При дальнейшем увеличении ширины торца рост показателя незначительный, поэтому оно нецелесообразно, так как влечет за собой увеличение габаритных размеров устройства и его массы [7].

Наибольшая степень повреждения стеблей наблюдается при ширине торца бича 0,03 м. Это обусловлено тем, что бичи ротора не успевают своевременно захватывать и направлять непрерывно подаваемые зажимным транспортером стебли в подроторное пространство, за счет чего происходит торможение и излом их диском ротора.

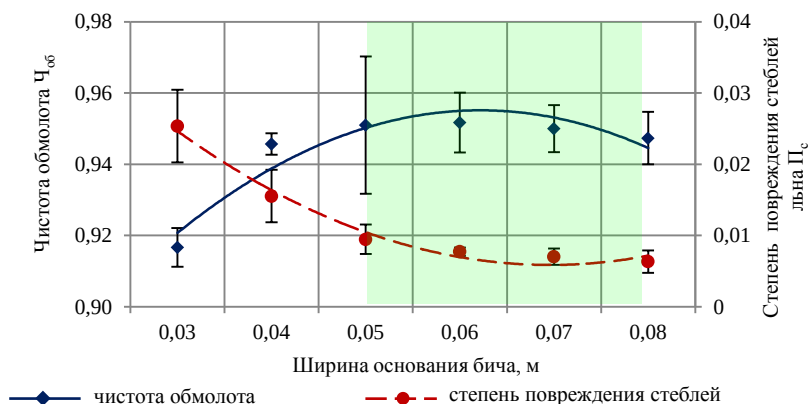


Рис. 4.9. Влияние ширины торцевой поверхности бича на чистоту обмолота и степень повреждения стеблей

Увеличение ширины торца бича с 0,03 до 0,06 м сопровождается существенным снижением повреждения стеблей льна. Дальнейшее увеличение ширины незначительно снижает степень повреждения стеблей. Таким образом, рациональное значение ширины торца бича находится в пределах от 0,05 до 0,075 м. Поскольку увеличение ширины торца бича влечет увеличение размеров всей конструкции, то целесообразно принять ее наименьшее значение. В дальнейших исследованиях ширина торцевой поверхности бича b_6 фиксировалась на уровне 0,055 м.

На следующем этапе исследовали влияние толщины $h_{\text{сл}}$ обмолачиваемой ленты льна, которую изменяли в пределах от 0,02 до 0,07 м с интервалом варьирования 0,01 м. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что толщина обмолачиваемой ленты оказывает существенное влияние на функции отклика (расчетное значение критерия Фишера больше табличного его значения). Из зависимостей параметров оптимизации от толщины ленты (рис. 4.10) видно, что изменение чистоты обмолота имеет форму выпуклой полиномиальной кривой с эксцессом в диапазоне $h_{\text{сл}} = 0,03 \dots 0,04$ м, а изменение степени повреждения стеблей имеет форму вогнутой полиномиальной кривой с эксцессом в диапазоне $h_{\text{сл}} = 0,033 \dots 0,042$ м. При этом превышение степени повреждения стеблей, предусмотренной регламентом, наблюдается при $h_{\text{сл}}$ более 0,065 м.

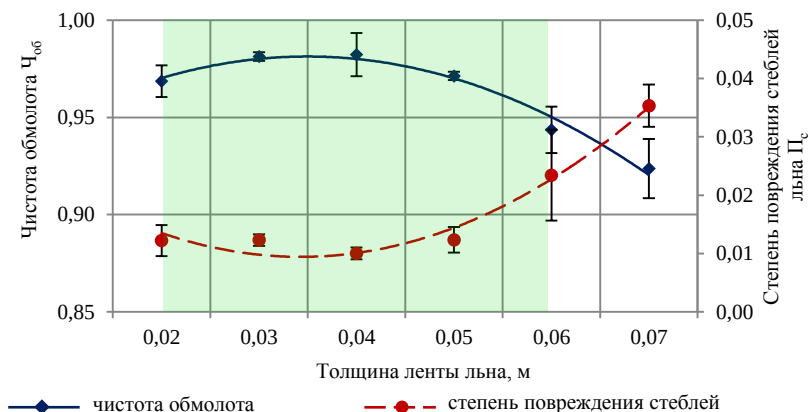


Рис. 4.10. Влияние толщины ленты льна на чистоту обмолота и степень повреждения стеблей

Следует отметить, что уменьшение толщины ленты ниже 0,03 м приводит к снижению чистоты обмолота, что обусловлено недостаточным сжатием обмолачиваемых порций стеблей, а увеличение толщины ленты льна приводит к снижению чистоты обмолота из-за недостаточно эффективного воздействия на семенные коробочки, находящиеся внутри обрабатываемого слоя стеблей, и упругих свойств обрабатываемого материала.

Анализ результатов исследований влияния радиального зазора Δ на параметры оптимизации позволяет сделать вывод о том, что чем меньше зазор Δ , тем больше чистота обмолота и степень повреждения стеблей (рис. 4.11).

В диапазоне значений зазора Δ от 0,005 до 0,012 м чистота обмолота не ниже предусмотренного регламентом значения (98 %). Уменьшение зазора Δ менее 0,006 м приводит к повреждению более 3 % стеблей, что не допускается регламентом. Рациональное значение радиального зазора находится в диапазоне от 0,005 до 0,017 м.

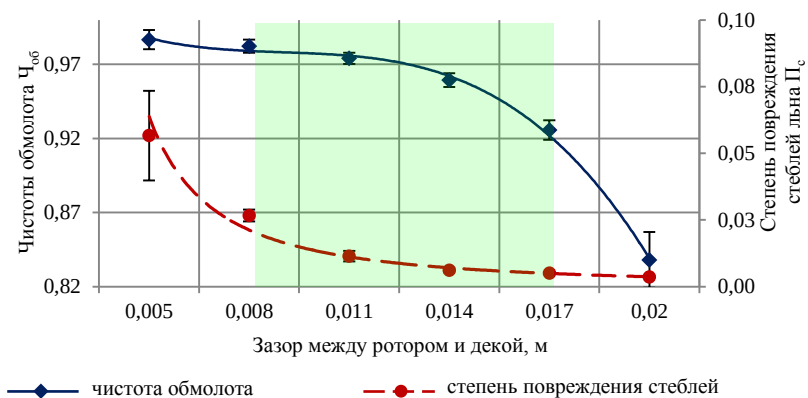


Рис. 4.11. Влияние радиального зазора на чистоту обмолота и степень повреждения стеблей

На следующем этапе исследовали влияние осевого зазора Δ_o , который изменяли в пределах от 0,001 до 0,011 м с интервалом варьирования 0,001 м. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что осевой зазор оказывает существенное влияние на функции отклика (расчетное значение критерия Фишера больше табличного его значения). Из зависимостей (рис. 4.12) видно, что с увеличением осевого зазора уменьшается и чистота обмолота, и степень повреждения стеблей.

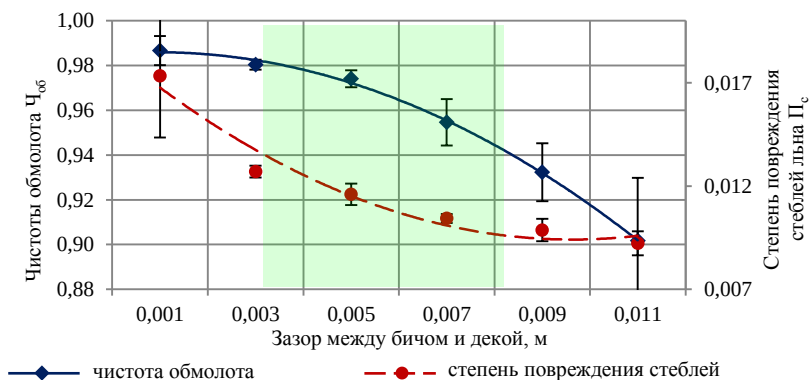


Рис. 4.12. Влияние осевого зазора на чистоту обмолота и степень повреждения стеблей

Как видно, при наименьшем значении осевого зазора степень повреждения стеблей не превышает 3 %. При этом с увеличением зазора от 0,001 до 0,005 м чистота обмолота снижается до 0,975, из чего следует, что рациональное значение осевого зазора находится в диапазоне от 0,001 до 0,004 м.

На следующем этапе исследовали влияние скорости $v_{\text{л}}$ подачи ленты льна, которую изменяли в пределах от 1,32 до 2,28 м/с с интервалом варьирования 0,3 м/с. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что степень повреждения стеблей в зависимости от скорости подачи ленты изменяется по вогнутой полиномиальной кривой с экссессом в диапазоне значений скорости $v_{\text{л}} = 1,7 \dots 1,9$ м/с, а чистота обмолота имеет вид убывающей прямой (рис. 4.13).

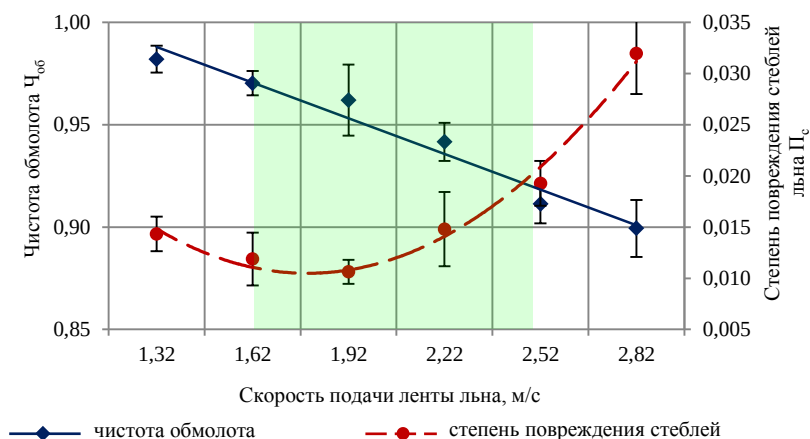


Рис. 4.13. Влияние скорости подачи ленты на чистоту обмолота и степень повреждения стеблей

Для выбранных параметров ротора: ширина торцевой поверхности бича $b_{\text{б}} = 0,055$ м, количество установленных бичей $k_{\text{б}} = 12$ шт., скорость зажимного транспортера $v_{\text{тр}} = 1,5$ м/с и радиус ротора $R = 0,35$ м — по формуле (2.95) рассчитаем кратность воздействия q ротора на стебли и построим зависимость его от окружной скорости $v_{\text{р}}$ ротора (рис. 4.14).

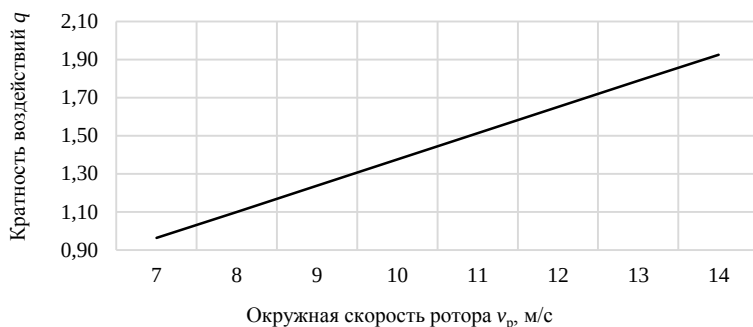


Рис. 4.14. График зависимости q от v_p

Результаты исследований зависимости параметров оптимизации от окружной скорости v_p ротора представлены на рис. 4.15. Анализ зависимостей позволяет сделать вывод о том, что в диапазоне значений скорости v_p от 7 до 13 м/с чистота обмолота растет интенсивно, а затем интенсивность ее изменения падает.

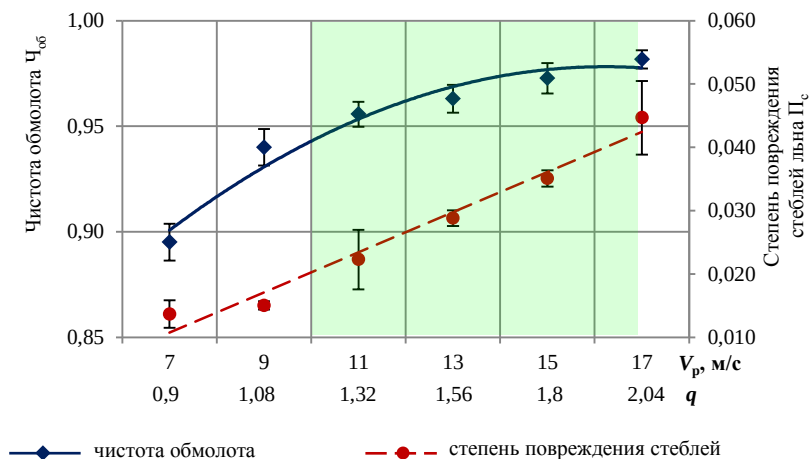


Рис. 4.15. Влияние окружной скорости ротора и кратности воздействий на чистоту обмолота и степень повреждения стеблей

Степень повреждения стеблей в зависимости от окружной скорости

ротора изменяется линейно. С увеличением скорости v_p от 7 до 11,5 м/с степень повреждения стеблей увеличивается с 0,012 до 0,03. Увеличение окружной скорости ротора свыше 11,5 м/с нецелесообразно из-за превышения допустимого значения повреждения стеблей. На основании изложенного диапазон рациональных значений окружной скорости ротора был принят в пределах от 7 до 11,5 м/с.

В дальнейших исследованиях в качестве параметра, влияющего на значения параметров оптимизации, вместо окружной скорости ротора будем использовать кратность q воздействия ротора на стебли.

Влияние угла τ установки боковой деки на параметры оптимизации исследовали в диапазоне значений от 0,174 до 0,349 рад (10–20°) с шагом 0,035 рад (2°). Полученные в результате исследований данные подтверждают значимость влияния угла установки боковой деки на степень повреждения стеблей и чистоту обмолота. Графическая интерпретация полученных результатов приведена на рис. 4.16.

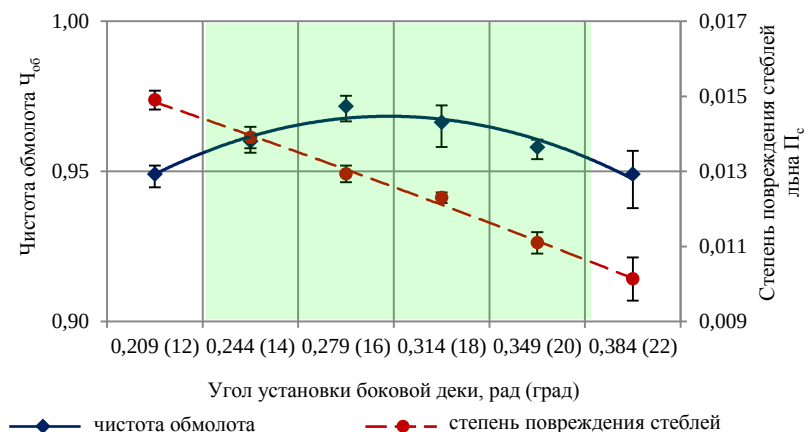


Рис. 4.16. Влияние угла установки боковой деки на чистоту обмолота и степень повреждения стеблей

Из зависимостей (рис. 4.16) видно, что чистота обмолота при увеличении угла установки боковой деки изменяется по выпуклой полиномиальной кривой с экссессом в диапазоне значений угла $\tau = 0,244 \dots 0,314$ рад (14–18°). Изменение степени повреждения стеблей имеет линейную зависимость, и по мере увеличения угла τ от 0,174 до 0,349 рад ее значение уменьшается с 0,0148 до 0,0105. Во всем диапазоне изменения угла τ сте-

пень повреждения стеблей не превышает 3 %. Рациональное значение угла установки боковой деки находится в пределах от 0,244 до 0,314 рад (14–18°). Учитывая, что увеличение угла τ влечет за собой увеличение ширины конструкции устройства, в дальнейших исследованиях угол установки боковой деки принимался равным 0,26 рад (15°).

Влияние ширины $L_{\text{СК}}$ зоны расположения семенных коробочек в обмолачиваемой ленте на параметры оптимизации исследовали в диапазоне значений $L_{\text{СК}}$ от 0,2 до 0,6 м. Полученные в результате исследований данные позволили сделать вывод о том, что ширина зоны расположения семенных коробочек в ленте оказывает существенное влияние на параметры оптимизации (расчетное значение критерия Фишера больше табличного его значения). Графическая интерпретация полученных результатов приведена на рис. 4.17.

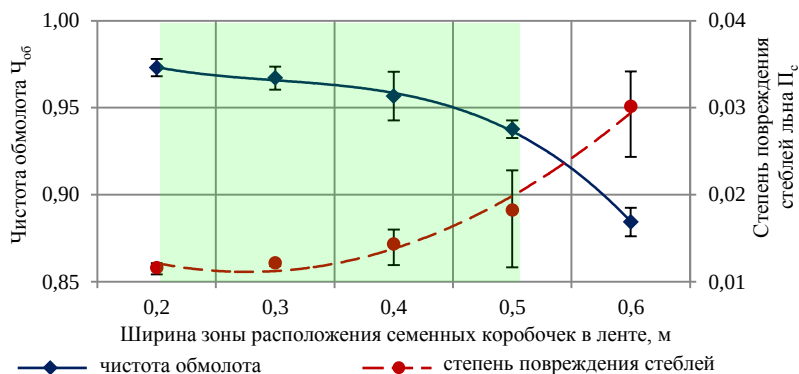


Рис. 4.17. Влияние ширины зоны расположения семенных коробочек в ленте льна на чистоту обмолота и степень повреждения стеблей

Анализ графической зависимости (рис. 4.17) показывает, что при увеличении $L_{\text{СК}}$ от 0,2 до 0,4 м чистота обмолота снижается незначительно, а при дальнейшем увеличении ширины зоны $L_{\text{СК}}$ происходит интенсивное снижение чистоты обмолота. Это обусловлено выходом границ зоны расположения семенных коробочек в ленте за пределы зоны обмолота. Зависимость степени повреждения стеблей от ширины зоны расположения коробочек в ленте изменяется по вогнутой полиномиальной кривой. Увеличение $L_{\text{СК}}$ свыше 0,4 м также отрицательно сказывается на степени повреждения стеблей из-за увеличения длины выступающей части стеблей и их захлестывания за бичи ротора.

Анализ полученных результатов исследований влияния влажности W стеблей льна на параметры оптимизации позволяет сделать вывод о том, что чем меньше влажность, тем выше чистота обмолота (рис. 4.18). В диапазоне влажности 10–40 % чистота обмолота имеет значение, близкое к предусмотренному регламентом (98 %). Увеличение влажности льна от 40 до 60 % приводит к уменьшению чистоты обмолота с 0,96 до 0,89.

Изменение степени повреждения стеблей в зависимости от влажности стеблей происходит по вогнутой полиномиальной кривой с экссесом в диапазоне влажности 20–40 %.

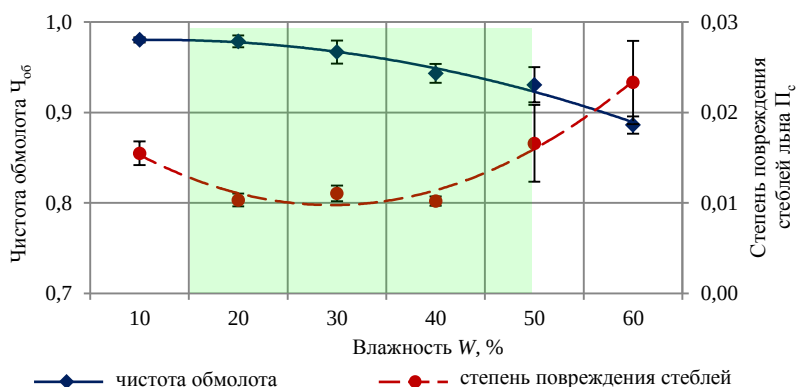


Рис. 4.18. Влияние влажности стеблей льна на чистоту обмолота и степень повреждения стеблей

Следует отметить, что во всем диапазоне влажности стеблей льна степень их повреждения не превышает 3 %.

Анализ результатов проведенных поисковых экспериментов роторно-бильного обмолачивающего аппарата и полученные на их основе зависимости позволили определить рациональные интервалы варьирования факторов при обмолоте ленты льна исходя из обеспечения необходимой чистоты обмолота и степени повреждения стеблей: толщины ленты льна – 0,03–0,05 м; осевого зазора – 0,001–0,004 м; радиального зазора – 0,007–0,017 м; угла установки боковой деки – 0,244–0,314 рад (14–18°); ширины зоны расположения семенных коробочек в ленте – 0,2–0,4 м; окружной скорости ротора – 7–11,5 м/с; скорости зажимного транспортера – 1,32–2,2 м/с. При этом было получено наибольшее значение чистоты обмолота, равное 98,6 %.

4.5. Оптимизация процесса отделения семенной части от стеблей льна

Процесс отделения семенной части от стеблей льна является сложным технологическим процессом, в котором 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 [5, 20, 22, 90, 26, 27, 32, 72, 73, 80, 81, 128].

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 [128].

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 [6, 52].

4.5.1. Выбор параметров оптимизации и уровней варьирования факторов при проведении отсеивающих экспериментов

На основании проведенных предварительных исследований, а также анализа априорной информации [23, 30, 34, 49, 79, 81, 128, 142, 143, 160] в качестве параметров оптимизации были приняты чистота обмолота $\text{Ч}_{\text{об}}$ (формула (3.13)) и степень повреждения стеблей П_c (формула (3.14)). Повышение значения чистоты обмолота приводит к увеличению выхода продуктивных семян, а снижение степени повреждения стеблей повышает выход длинного волокна [164]. Поэтому выбранные параметры оптимизации в значительной мере влияют на показатели

экономической эффективности использования предлагаемого обмолачивающего аппарата [6].

Исследование технологического процесса отделения семенной части от стеблей льна предлагаемым роторно-бильным аппаратом предусматривало учет всех факторов, оказывающих влияние на его протекание и конечные результаты [6, 52]. К совокупности исследуемых факторов предъявляется основное требование: все факторы должны быть управляемыми и контролируемыми. Этому требованию соответствуют следующие конструкционные, технологические и кинематические параметры, выбранные на основании априорной информации и проведенных поисковых исследований: толщина ленты льна, осевой зазор, радиальный зазор, угол установки боковой деки, ширина зоны расположения семенных коробочек в ленте, кратность воздействий бичами на фрагмент ленты льна [23, 30, 34, 49, 79, 81, 128, 142, 143, 160, 172, 182].

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 [5, 72, 73, 80, 81].

В табл. 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)
Толщина ленты льна, м	x_1	0,02	0,06
Осевой зазор, м	x_2	0,001	0,004
Радиальный зазор, м	x_3	0,007	0,017
Угол установки боковой деки, рад (°)	x_4	0,244 (14)	0,314 (18)
Ширина зоны расположения семенных коробочек в ленте, м	x_5	0,2	0,4
Кратность воздействий бичами на фрагмент ленты льна	x_6	1,0	1,5

При проведении отсеивающих экспериментов выбор уровней и интервалов варьирования факторов осуществляли с учетом априорной информации о точности фиксирования их значений, диапазоне изменения параметров оптимизации и характере поверхностей отклика.

В соответствии с рекомендациями [5] принимали функции, описывающие поверхности отклика нелинейными, а диапазоны изменения параметров оптимизации широкими и выбирали уровни и интервалы варьирования факторов [6].

При выборе уровней варьирования факторов учитывали то обстоятельство, что для первой серии опытов необходимо выбирать такую область, при которой будет обеспечена возможность для пошагового движения к оптимуму.

4.5.2. Оценка существенности факторов при проведении отсеивающих экспериментов

Отсеивающие эксперименты проводили на начальной стадии изучения объекта исследования с целью исключения малозначущих факторов для сокращения последующего числа опытов [80].

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 [80, 120].

Построение ранжированного ряда выполняли в два этапа. Вначале проводили серию опытов по специально составленной матрице (табл. 4.3, 4.4) [80], а затем строили диаграммы рассеяния факторов (рис. 4.19–4.20). Учет степени влияния того или иного фактора проводили визуально по величине разности между средними значениями критерия оптимизации, вычисленными отдельно для каждого уровня варьирования фактора. В качестве среднего значения параметра оптимизации принимали медиану [80, 81].

По диаграмме рассеяния выделяли два наиболее значимых фактора x_1 и x_6 . Эффекты факторов количественно оценивали с помощью таблицы с двумя входами (табл. 4.5–4.8). Величину эффектов факторов x_i подсчитывали по формуле [80, 128]

$$x_i = \frac{\bar{y}_1 + \bar{y}_3 + \bar{y}_5 + \dots + \bar{y}_n}{k_i} - \frac{\bar{y}_2 + \bar{y}_4 + \bar{y}_6 + \dots + \bar{y}_{n+1}}{k_i}, \quad (4.3)$$

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.

Таблица 4.3. Матрица планирования и значения параметра «чистота обмолота» при проведении отсевяющих экспериментов

№ опыта	Факторы						Значения параметра оптимизации (чистота обмолота $\chi_{об}$)			
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	y_1	y_2	y_3	$\bar{y}$
1	–	–	–	+	+	+	0,7904	0,76	0,87	0,807
2	+	+	–	–	–	+	0,9424	0,9728	0,9576	0,958
3	+	–	+	–	+	–	0,8356	0,836	0,836	0,836
4	–	+	+	+	–	–	0,6536	0,6232	0,5928	0,623
5	–	+	+	–	–	–	0,6384	0,6384	0,684	0,654
6	+	–	–	+	+	+	0,8938	0,8958	0,8208	0,870
7	–	–	+	+	–	+	0,88	0,8208	0,902	0,868
8	+	+	+	+	–	–	0,8208	0,8056	0,7904	0,806
9	–	+	–	+	+	–	0,4408	0,608	0,6384	0,562
10	+	+	–	–	–	–	0,7244	0,7154	0,7294	0,723

Таблица 4.4. Матрица планирования и значения параметра «степень повреждения стеблей» при проведении отсевяющих экспериментов

№ опыта	Факторы						Значения параметра оптимизации (степень повреждения стеблей Π_c)			
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	y_1	y_2	y_3	$\bar{y}$
1	–	–	–	+	+	+	0,111	0,109	0,114	0,11133
2	+	+	–	–	–	+	0,21	0,198	0,201	0,203
3	+	–	+	–	+	–	0,158	0,159	0,158	0,15833
4	–	+	+	+	–	–	0,037	0,039	0,032	0,036
5	–	+	+	–	–	–	0,072	0,073	0,069	0,07133
6	+	–	–	+	+	+	0,191	0,197	0,192	0,19333
7	–	–	+	+	–	+	0,191	0,188	0,192	0,19033
8	+	+	+	+	–	–	0,142	0,144	0,137	0,141
9	–	+	–	+	+	–	0,035	0,031	0,047	0,03767
10	+	+	–	–	–	–	0,111	0,109	0,102	0,10733

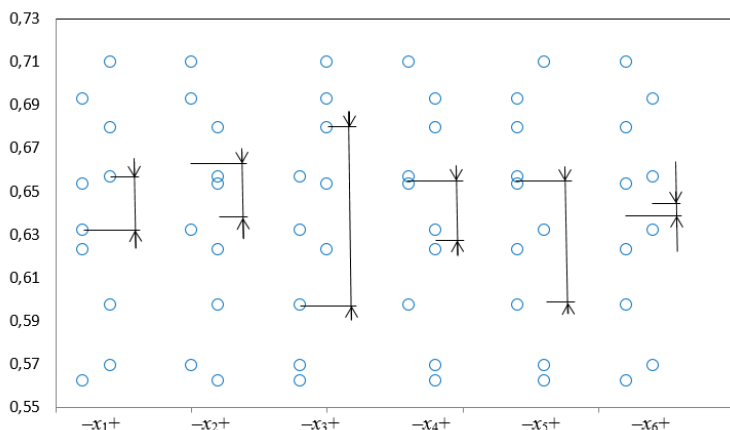


Рис. 4.19. Диаграмма рассеяния факторов, влияющих на чистоту обмолота

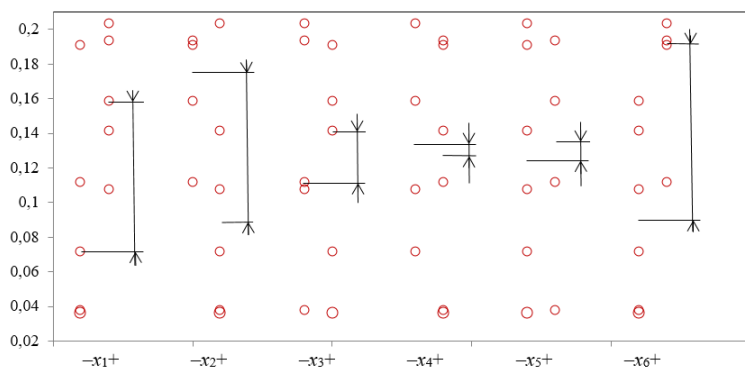


Рис. 4.20. Диаграмма рассеяния факторов, влияющих на степень повреждения стеблей

После расчета эффектов выделенных факторов проверяли их значимость по t -критерию. Для удобства вычисления t -критерия результаты всех расчетов сводили в табл. 4.5.

Таблица 4.5. Таблица с двумя входами для вычисления эффектов факторов x_6 и x_1 , влияющих на чистоту обмолота

Оцениваемый фактор	$+x_1$	$-x_1$
$+x_6$	0,9576	0,8068
	0,8701	0,8676
	$\Sigma y_1 = 1,83$	$\Sigma y_2 = 1,67$
	$\bar{y}_1 = 0,91$	$\bar{y}_2 = 0,84$
$-x_6$	0,8359	0,6232
	0,8056	0,6536
	0,7231	0,5624
	$\Sigma y_3 = 2,3645$	$\Sigma y_4 = 1,8392$
	$\bar{y}_3 = 0,7882$	$\bar{y}_4 = 0,6131$

Значение t -критерия для какого-либо фактора определяли по формуле [80, с. 72]

$$t = \frac{(\bar{y}_1 + \bar{y}_3 + \dots + \bar{y}_n) - (\bar{y}_2 + \bar{y}_4 + \dots + \bar{y}_{n+1})}{S_R \sqrt{\sum \frac{1}{n_i}}}, \quad (4.4)$$

где S_R – среднеквадратическая ошибка, характеризующая рассеяние относительно средних значений в клетках таблицы с несколькими входами, которую определяли по формуле [81]

$$S_R = \sqrt{\frac{\sum y_i^2}{n_i - 1} - \frac{(\sum y_i)^2}{n_i(n_i - 1)}}, \quad (4.5)$$

где n_i – число наблюдений в i -й клетке таблицы с несколькими входами.

Таблица 4.6. Вспомогательная таблица для расчета t -критерия факторов x_6 и x_1

№ клетки	Σy_i	$(\Sigma y_i)^2$	Σy_i^2	n_i	SR^2	SR^2/n_i
1	1,83	3,34	1,674129	2	0,00383	0,00191
2	1,67	2,80	1,403656	2	0,00185	0,00092
3	2,36	5,59	1,870489	3	0,00341	0,00114
4	1,84	3,38	1,131864	3	0,00216	0,00072
				10		0,00469

Таблица 4.7. Таблица с двумя входами для вычисления эффектов факторов x_6 и x_1 , влияющих на степень повреждения стеблей

Оцениваемый фактор	$+x_1$	$-x_1$
$+x_6$	0,203	0,1113
	0,1933	0,1903
	$\Sigma y_1 = 0,3963$	$\Sigma y_2 = 0,3017$
	$\bar{y}_1 = 0,1982$	$\bar{y}_2 = 0,1508$
$-x_6$	0,1583	0,036
	0,1410	0,071333
	0,1073	0,037667
	$\Sigma y_3 = 0,4067$	$\Sigma y_4 = 0,1450$
	$\bar{y}_3 = 0,1356$	$\bar{y}_4 = 0,0483$

Таблица 4.8. Вспомогательная таблица для расчета t -критерия факторов x_6 и x_1

№ клетки	Σy_i	$(\Sigma y_i)^2$	Σy_i^2	n_i	SR^2	SR^2/n_i
1	0,39633	0,15708	0,0786	2	0,000000	0,00000
2	0,30167	0,09100	0,0486	2	0,0031205	0,0015603
3	0,40667	0,16538	0,0565	3	0,0006725	0,0002242
4	0,14500	0,02103	0,007803	3	0,0003974	0,0001325
				10		0,0019169

В результате вычислений были определены эффекты факторов x_1 и x_6 для чистоты обмолота и x_1 и x_6 для степени повреждения стеблей (табл. 4.9).

Таблица 4.9. Результаты оценки значимости факторов

Критерии оптимизации							
Чистота обмолота $Ч_{об} (Y_1)$				Степень повреждения стеблей $П_c (Y_2)$			
Эффект фактора		t -критерий фактора		Эффект фактора		t -критерий фактора	
x_1	x_6	tx_1	tx_6	x_1	x_6	tx_1	tx_6
0,1259	0,1749	3,676	5,107	0,0673	0,0826	3,073	3,771

Выбранные факторы оказались значимыми, так как расчетная величина t -критерия больше его табличного значения. При числе степеней свободы $f = 6$ табличное значение t -критерия равно 2,447 [81], т. е. выделенные факторы оказались значимыми с вероятностью 95 %.

После определения эффектов факторов x_1 и x_6 , для того чтобы четче выделить эффекты других менее значимых факторов и их парных вза-

имедействий, производили корректировку результатов отсеивающих экспериментов путем прибавления эффектов выделенных факторов с обратным знаком к результатам отсеивающих экспериментов на верхнем уровне (+).

После корректировки результатов строили скорректированную диаграмму рассеяния факторов, а также диаграммы рассеяния парных взаимодействий факторов (рис. 4.21–4.23).

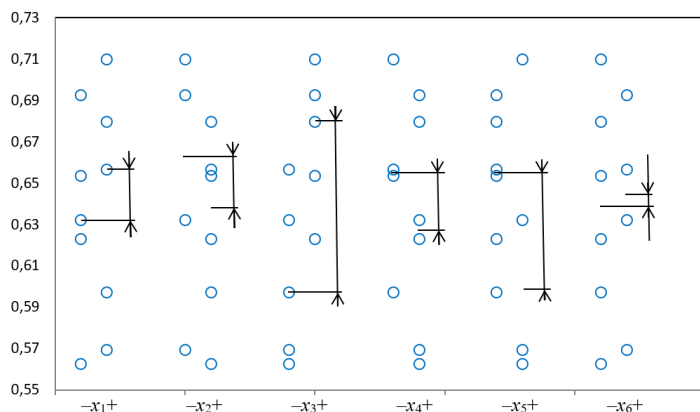


Рис. 4.21. Скорректированная диаграмма рассеяния факторов, влияющих на чистоту обмолота

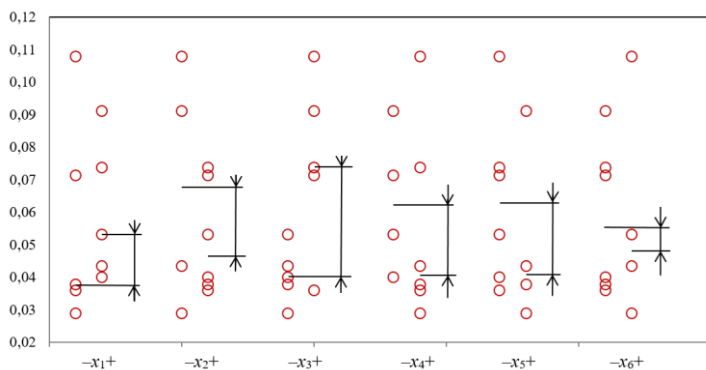


Рис. 4.22. Корректированная диаграмма рассеяния факторов, влияющих на степень повреждения стеблей

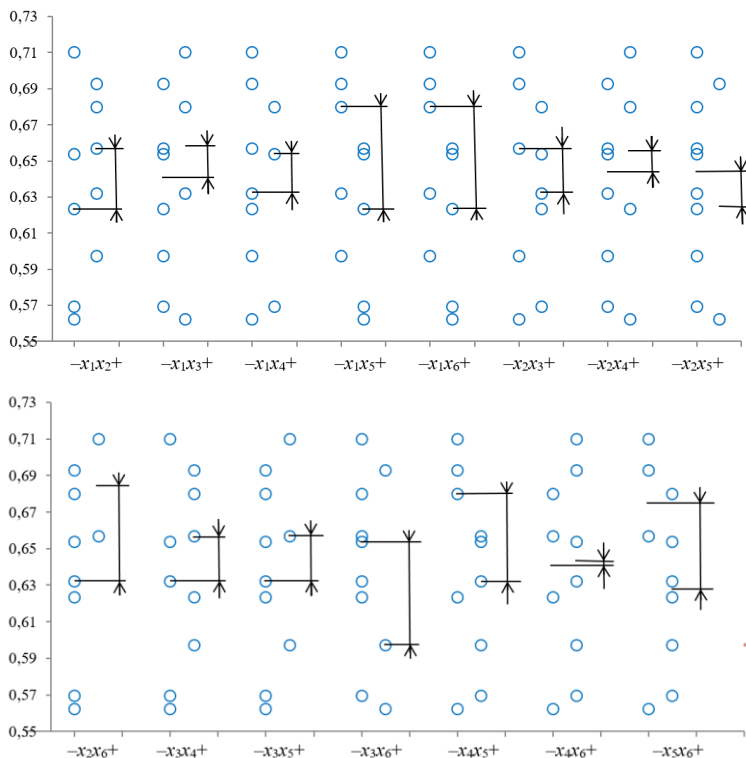


Рис. 4.23. Диаграммы рассеяния парных взаимодействий факторов, влияющих на чистоту обмолота

В результате анализа скорректированной диаграммы рассеяния факторов и диаграмм парных взаимодействий (рис. 4.24) выделяли два наиболее значимых фактора по чистоте обмолота (фактор x_3 и парное взаимодействие x_1x_6) и по степени повреждения стеблей (фактор x_3 и парное взаимодействие x_4x_5) [52]. Расчет эффектов выделенных факторов, а также проверку их значимости по t -критерию производили по вышеизложенной методике (табл. 4.10–4.13). Результаты расчетов приведены в табл. 4.14.

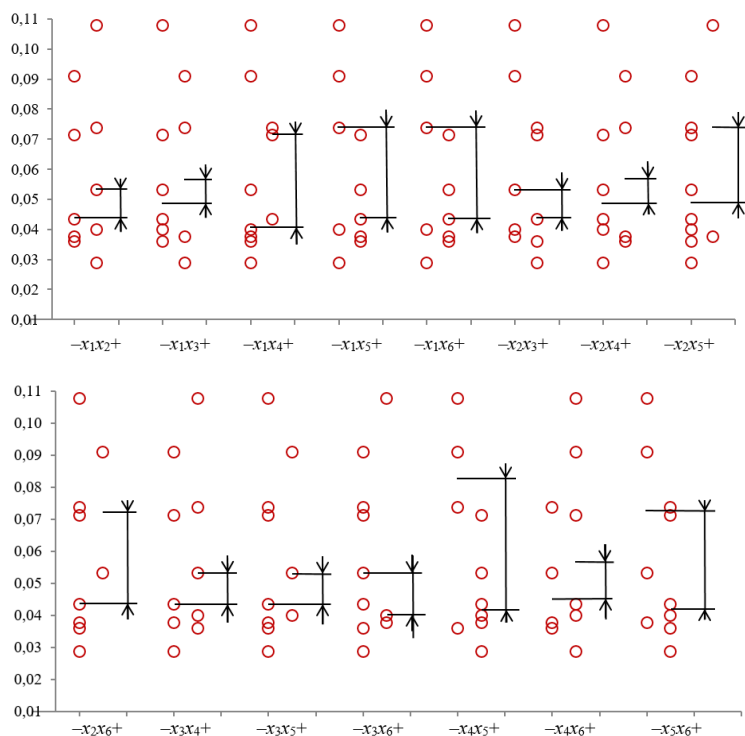


Рис. 4.24. Диаграммы рассеяния парных взаимодействий факторов, влияющих на степень повреждения стеблей

Таблица 4.10. Таблица с двумя входами для вычисления эффектов фактора x_3 и парного взаимодействия факторов x_1x_6 , влияющих на чистоту обмолота

Оцениваемый фактор	$+x_1x_6$	$-x_1x_6$
$+x_3$	0,6232	0,7100
	0,6536	0,6927
	$\Sigma y_1 = 1,2768$	$\Sigma y_2 = 2,08$
	$\bar{y}_1 = 0,6384$	$\bar{y}_2 = 0,69$
$-x_3$	0,6568	0,6319
	0,5693	0,5972
	$\Sigma y_3 = 1,7885$	$\Sigma y_4 = 1,2291$
	$\bar{y}_3 = 0,5962$	$\bar{y}_4 = 0,6145$

Таблица 4.11. Вспомогательная таблица для расчета t -критерия фактора x_3 и парного взаимодействия факторов x_1x_6

№ клетки	Σy_i	$(\Sigma y_i)^2$	Σy_i^2	n_i	SR^2	SR^2/n_i
1	1,2768	1,6302	0,8156	2	0,000462	0,0002310
2	2,0824	4,3363	1,4459	3	0,000231	0,0000769
3	1,7885	3,1989	1,0718	3	0,002768	0,0009228
4	1,2291	1,5106	0,7559	2	0,000602	0,0003012
				10		0,0009996

Таблица 4.12. Таблица с двумя входами для вычисления эффектов фактора x_3 и парного взаимодействия факторов x_1x_6 , влияющих на степень повреждения стеблей

Оцениваемый фактор	$+x_4x_5$	$-x_4x_5$
$+x_3$	0,07133	0,0911
		0,0360
		0,1078
		0,07372
	$\Sigma y_1 = 0,0713$ $\bar{y}_1 = 0,0713$	$\Sigma y_2 = 0,31$ $\bar{y}_2 = 0,08$
$-x_3$	0,0288	
	0,0532	
	0,0435	
	0,0377	
	0,0401	
	$\Sigma y_3 = 0,2032$	$\Sigma y_4 = 0$
	$\bar{y}_3 = 0,0406$	$\bar{y}_4 = 0$

Таблица 4.13. Вспомогательная таблица для расчета t -критерия фактора x_3 и парного взаимодействия факторов x_4x_5

№ клетки	Σy_i	$(\Sigma y_i)^2$	Σy_i^2	n_i	SR^2	SR^2/n_i
1	0,0713	0,0051	0,0051	1	0,000000	0,0000000
2	0,3086	0,0952	0,0266	4	0,000945	0,0002364
3	0,2032	0,0413	0,0086	5	0,000079	0,0000157
4	0,0001	0,0001	0,0001	0	0,000001	0,0000001
				10		0,0002521

Сравнивая полученные значения t -критерия с табличным, делаем вывод о том, что фактор x_3 по показателям чистоты обмолота и степени повреждения стеблей значим с вероятностью 95 % ($t = 2,447$) [80]. Парное сочетание факторов x_1x_6 для показателя чистоты обмолота и

парное сочетание факторов x_4x_5 для показателя повреждения стеблей незначимо.

Таблица 4.14. Результаты оценки значимости факторов

Критерии оптимизации							
Чистота обмолота $\chi_{об}$ (Y_1)				Степень повреждения стеблей Π_c (Y_2)			
Эффект фактора		t-критерий фактора		Эффект фактора		t-критерий фактора	
x_3	x_1x_6	tx_3	tx_1x_6	x_3	x_4x_5	tx_1	tx_4x_5
0,0609	-0,0370	3,853	-2,343	0,0539	0,0174	6,792	2,193

По результатам расчетов строили ранжированный ряд выделенных факторов (рис. 4.25).

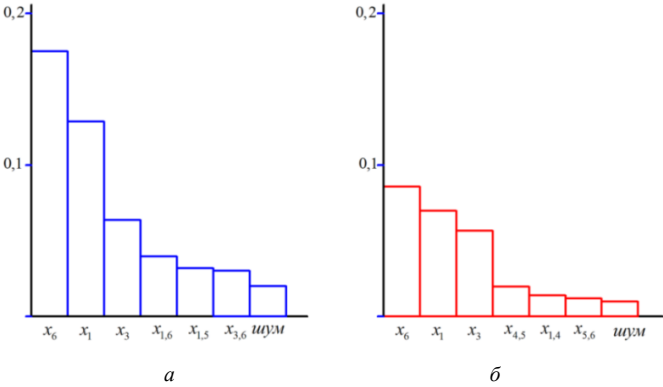


Рис. 4.25. Ранжированный ряд выделенных факторов для критерия $\chi_{об}$ (а) и критерия Π_c (б)

Последовательное применение процедуры отсеивания позволило за два этапа выделить все существенные факторы: x_1 , x_3 и x_6 – и оценить эффекты этих факторов [52, 131].

4.5.3. Движение в область оптимума

После выполнения отсеивающих экспериментов и исключения мало-значущих факторов проводили следующий этап исследований – описание поверхности отклика, т. е. отыскание уравнения поверхности [5, 80].

На начальном этапе построения математической модели процесса

предполагали, что поверхность отклика может быть описана линейным уравнением [80]

$$\hat{Y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k , \tag{4.6}$$

где $\hat{Y}$ – значение модели;
 $b_0, b_1, b_2, \dots, b_k$ – коэффициенты регрессии;
 k – число факторов в эксперименте.

Для отыскания оптимального сочетания выделенных факторов проводили опыты по матрице планирования эксперимента 2³ и выполняли программу крутого восхождения по поверхности отклика. Опыты проводили в трехкратной повторности (табл. 4.15, 4.16).

Таблица 4.15. Планирование и результаты эксперимента по нахождению области оптимума для критерия чистота обмолота Ч_{об}

Уровень	Факторы			Значение параметра оптимизации				
	Толщина ленты льна, м	Радиальный зазор, м	Кратность воздействий	у ₁	у ₂	у ₃	$\overline{y}$	$\hat{y}$
	x ₁	x ₃	x ₆					
Верхний уровень (+)	0,06	0,017	1,5					
Основной уровень (0)	0,04	0,011	1,25					
Нижний уровень (–)	0,02	0,005	1					
План эксперимента и результаты опытов								
1	–	–	–	0,939	0,958	0,947	0,948	0,907
2	+	–	–	0,884	0,785	0,902	0,857	0,863
3	+	+	–	0,865	0,763	0,887	0,838	0,807
4	+	+	+	0,917	0,812	0,962	0,897	0,891
5	–	+	+	0,962	0,964	0,969	0,965	0,935
6	–	–	+	0,985	0,986	0,990	0,987	0,991
7	–	+	–	0,773	0,809	0,770	0,784	0,851
8	+	–	+	0,943	0,886	0,915	0,915	0,947
Крутое восхождение								
Коэффициент регрессии b ₁	–0,0221	–0,0279	0,0421					
Интервал варьирования фактора <i>m</i>	0,02	0,006	0,25					
b ₁ · <i>m</i>	–0,0004	–0,0002	0,0105					
Шаг, соответствующий изменению x ₁ на 0,2	–0,005	–0,0019	0,1190					
Округленный шаг	–0,005	–0,002	0,10					
Шаг 1	0,060	0,017	1	0,8750	0,9117	0,9672	0,918	
2	0,055	0,015	1,10	0,9238	0,9806	0,8946	0,933	
3	0,050	0,013	1,20	0,9755	0,9235	0,9570	0,952	
4	0,045	0,011	1,30	0,9758	0,9686	0,9927	0,979	
5	0,040	0,009	1,40	0,9978	0,9874	0,9907	0,992	
6	0,035	0,007	1,50	0,9956	0,9841	0,9843	0,990	

Расчетное значение критерия Фишера $F_p = 3,504$. Табличное значение критерия Фишера $F_T = 3,01$. Так как $F_p > F_T$, гипотеза об описании результатов эксперимента уравнением первого порядка не принимается.

Таблица 4.16. Планирование и результаты эксперимента по нахождению области оптимума для критерия «степень повреждения стеблей П.»

Уровень	Факторы			Значение параметра оптимизации				
	Толщина ленты льна, м	Радиальный зазор, м	Кратность воздействий	y_1	y_2	y_3	$\bar{y}$	$\hat{y}$
	x_1	x_3	x_6					
Верхний уровень (+)	0,06	0,017	1,5					
Основной уровень (0)	0,04	0,011	1,25					
Нижний уровень (-)	0,02	0,005	1					
План эксперимента и результаты опытов								
1	–	–	–	0,102	0,104	0,103	0,103	0,106
2	+	–	–	0,159	0,149	0,154	0,154	0,148
3	+	+	–	0,090	0,085	0,086	0,087	0,091
4	+	+	+	0,161	0,150	0,162	0,158	0,156
5	–	+	+	0,116	0,116	0,116	0,116	0,114
6	–	–	+	0,172	0,172	0,172	0,172	0,171
7	–	+	–	0,048	0,051	0,048	0,049	0,049
8	+	–	+	0,215	0,207	0,205	0,209	0,213
Крутое восхождение								
Коэффициент регрессии b_1	0,0210	–0,0285	0,0328					
Интервал варьирования фактора m	0,02	0,006	0,250					
$b_1 \cdot m$	0,0004	–0,0002	0,0082					
Шаг, соответствующий изменению x_1 на 0,2	0,0050	–0,0020	0,0975					
Округленный шаг	0,005	–0,002	0,10					
Шаг 1	0,060	0,001	1,8	0,1811	0,1887	0,2002	0,190	
2	0,055	0,003	1,70	0,1188	0,1261	0,1151	0,120	
3	0,050	0,005	1,60	0,0625	0,0592	0,0613	0,061	
4	0,045	0,007	1,50	0,0249	0,0247	0,0253	0,025	
5	0,040	0,009	1,40	0,0131	0,0129	0,0130	0,013	
6	0,035	0,011	1,30	0,0050	0,0050	0,0050	0,005	

Расчетное значение критерия Фишера $F_p = 4,52$. Табличное значение критерия Фишера $F_T = 3,01$. Так как $F_p > F_T$, гипотеза об описании результатов эксперимента уравнением первого порядка не принимается.

Для облегчения анализа уравнения регрессии значения факторов X_i кодировали по формуле [80, с. 77]:

$$x_i = \frac{X_i - X_{0i}}{\varepsilon}, \quad (4.7)$$

где x_i – кодированное значение фактора (безразмерная величина: «–», «0», «+» – соответственно нижний, нулевой и верхний уровни варьирования);

X_i – натуральное значение фактора;

X_{0i} – натуральное значение фактора на нулевом уровне;

ε – натуральное значение интервала варьирования.

По результатам проведенных опытов определяли коэффициенты регрессии и проводили их статистическую оценку. Расчеты производили с помощью ЭВМ по следующим формулам [5, 80]:

$$b_0 = \sum_{u=1}^N \frac{\bar{y}_u}{N}; \quad (4.8)$$

$$b_i = \sum_{u=1}^N \frac{x_{iu} \bar{y}_u}{N}; \quad (4.9)$$

$$b_{ij} = \sum_{u=1}^N \frac{x_{iu} x_{ju} \bar{y}_u}{N}. \quad (4.10)$$

В результате обработки экспериментальных данных получили значения коэффициентов уравнений регрессии (табл. 4.17).

Таблица 4.17. Коэффициенты регрессии линейной модели

Критерии оптимизации							
Чистота обмолота $\chi_{об}$ (Y_1)				Степень повреждения стеблей Π_c (Y_2)			
b_0	0,899	b_{13}	0,0186	b_0	0,131	b_{13}	–0,001
b_1	–0,0221	b_{16}	–0,0129	b_1	0,021	b_{16}	–0,0013
b_3	–0,0279	b_{36}	0,0179	b_3	–0,0285	b_{36}	0,0018
b_6	0,0421			b_6	0,0328		

Значимость коэффициентов регрессии b_i и b_{ij} проверяли с помощью построения доверительных интервалов. Коэффициент считается значимым, если его абсолютное значение превышает величину доверительного интервала Δb_i , рассчитываемого по формуле [80]

$$\pm \Delta b_i = \pm t S_{bi}, \quad (4.11)$$

где t – табличное значение t -критерия при числе степеней свободы, с которым определялась дисперсия S_y^2 ;

$S_{bi} = \sqrt{\frac{S_y^2}{Nm}}$ – квадратичная ошибка коэффициента регрессии;

$S_y^2 = \sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^m \frac{(y_{iu} - \bar{y}_u)^2}{N(m-1)}$ – дисперсия, характеризующая ошибку опытов;

$\bar{y}_u$ – 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).

Табличное значение t -критерия при числе степеней свободы $f = 16$ равно 2,12 [80]. Число степеней свободы определяли по формуле [72, 80]

$$f = N(m - 1). \quad (4.12)$$

Тогда $\pm \Delta b_i = \pm 0,0227$.

Сравнивая абсолютное значение коэффициентов регрессии с величиной доверительного интервала Δb_i , можно сделать вывод о том, что на параметры оптимизации существенное влияние оказывают только одиночные факторы. 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 его значением [80, 169].

Расчет критерия Фишера производили по формуле [80, 169]

$$F_p = \frac{S_{LF}^2}{S_y^2}, \quad (4.13)$$

где S_{LF}^2 – дисперсия неадекватности математической модели;

$$S_{LF}^2 = m \sum_{u=1}^N \frac{(\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2}{N - (k + 1)}, \quad (4.14)$$

где $\hat{y}_u$ – теоретическое (расчетное) значение параметра оптимизации в u -м опыте;

k – число факторов.

Результаты выполнения статистических расчетов приведены в табл. 4.18.

Таблица 4.18. Статистические характеристики линейной модели [169]

Статистические характеристики	Критерии оптимизации	
	Чистота обмолота $\chi_{об}$	Степень повреждения стеблей Π_c
S_y^2	0,00195	0,000014
S_{bi}	0,00903	0,00077
$\pm \Delta b_i$	0,01914	0,00163
S_{LF}^2	0,00686	0,00006
F	3,50432	4,52372

В ходе сравнения полученных коэффициентов регрессии и доверительных интервалов выявлены незначимые: для чистоты обмолота – b_{13} , b_{16} и b_{36} , а для степени повреждения стеблей – b_{13} и b_{16} .

Табличное значение F -критерия при числе степеней свободы $f_1 = 4$ и $f_2 = 16$ для 95%-ного уровня значимости $F_T = 3,01$ [52, 80].

Расчетное значение критерия Фишера больше табличного, поэтому гипотеза об описании результатов экспериментов линейной моделью отвергается [80].

На основании проведенных расчетов можно сделать заключение о том, что линейные модели, определяющие чистоту обмолота

$$\hat{y}_1 = 0,899 - 0,0221x_1 - 0,0279x_3 + 0,0421x_6 \quad (4.15)$$

и степень повреждения стеблей

$$\hat{y}_2 = 0,131 + 0,021x_1 - 0,0285x_3 + 0,0328x_6 + 0,0018x_{36} \quad (4.16)$$

для описания результатов эксперимента не могут быть приняты. 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 [6, 80].

Несмотря на то, что линейные модели для рассматриваемых пара-

метров оптимизации оказались неадекватными, они позволили выполнить крутое восхождение по поверхностям отклика (см. табл. 4.15).

При крутом восхождении для определения чистоты обмолота в качестве единичного шага принимали изменение толщины ленты льна (фактор x_1) на 0,01 м, а для определения степени повреждения стеблей фактор x_1 изменяли с шагом 0,004 м. Величину единичного шага по остальным факторам принимали пропорциональной величине принятого шага фактора x_1 . Поскольку определяли параметры области оптимума, соответствующие максимальной величине параметра оптимизации, то шаговый процесс осуществляли без смены знаков на обратные [80].

В результате пошагового движения в направлении градиента получили положительный результат. Наибольшее значение чистоты обмолота $\text{Ч}_{об}$ составило 0,992 при толщине ленты льна $h_{сл} = 0,04$ м, радиальном зазоре $\Delta = 0,009$ м и кратности воздействия $q = 1,4$. После проведения шестого опыта происходило снижение чистоты обмолота, поэтому дальнейшее крутое восхождение считали нецелесообразным. Наименьшее значение степени повреждения стеблей $\text{П}_с$ составило 0,005 при толщине ленты льна $h_{сл} = 0,035$ м, радиальном зазоре $\Delta = 0,011$ м и кратности воздействия $q = 1,3$. После проведения шестого опыта степень повреждения стеблей не изменялась, поэтому дальнейшее крутое восхождение было нецелесообразно [169].

Выполнение крутого восхождения позволило установить координаты центра эксперимента:

для чистоты обмолота $\text{Ч}_{об}$: $x_1 = 0,04$ м, $x_3 = 0,009$ м, $x_6 = 1,4$;

для степени повреждения стеблей $\text{П}_с$: $x_1 = 0,035$ м, $x_3 = 0,011$ рад, $x_6 = 1,3$.

4.5.4. 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 [113]. 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 [80]

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2, \quad (4.17)$$

где b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – коэффициенты регрессии.

Для описания области оптимума уравнениями второго порядка в условиях неоднородностей Боксом – Бенкеном разработаны трехуровневые планы [24]. 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 Бенкена более экономичны и к тому же обладают свойствами вышеназванных планов.

В результате анализа нами был выбран трехуровневый план второго порядка Бокса – Бенкена для трех факторов, включающий 15 опытов. Матрица выбранного плана с результатами опытов приведена в табл. 4.19 и 4.21. Опыты проводили в трехкратной повторности в рандомизированном порядке. С учетом данных крутого восхождения центр эксперимента выбирали в новой точке. Интервалы и уровни варьирования факторов приведены в табл. 4.20. После проведения опытов производили расчет коэффициентов регрессии по формулам [80, 128]

$$b_0 = \bar{y}_0 = \sum_{u=1}^{n_0} \frac{y_{0u}}{n_0}; \quad (4.18)$$

$$b_i = \frac{1}{8} \sum_{u=1}^N x_{iu} y_u; \quad (4.19)$$

$$b_{ij} = \frac{1}{4} \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u - \frac{1}{16} \sum_{j=1}^k \sum_{u=1}^N x_{ju}^2 y_u - \frac{1}{2} \bar{y}_0, \quad (4.20)$$

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;

y_u – значение параметра оптимизации в u -м опыте;

k – число факторов;

x_{iu}, x_{ju} – значения факторов в u -м опыте.

**Таблица 4.19. Планирование и результаты эксперимента
при описании области оптимума чистоты обмолота**

Обозначения	Факторы			Значения параметра оптимизации				
	Толщина ленты льна, м x_1	Радиальный зазор, м x_3	Кратность воздействий x_6	y_1	y_2	y_3	$\bar{y}$	$\hat{y}$
Верхний уровень (1)	0,045	0,011	1,5					
Основной уровень (0)	0,04	0,009	1,4					
Нижний уровень (-1)	0,035	0,007	1,3					
Интервал варьирования m	0,05	0,002	0,1					
1	0	+	+	0,9789	0,9899	0,9976	0,9888	0,9789
2	0	—	+	0,9996	0,9965	0,9994	0,9985	0,9996
3	0	+	—	0,9830	0,9623	0,9826	0,9760	0,9830
4	0	—	—	0,9897	0,9779	0,9721	0,9799	0,9897
5	0	0	0	0,9875	0,9836	0,9944	0,9885	0,9875
6	+	0	+	0,9858	0,9839	0,9967	0,9888	0,9858
7	—	0	+	0,9960	0,9980	0,9970	0,9970	0,9960
8	+	0	—	0,9947	0,9489	0,9565	0,9667	0,9947
9	—	0	—	0,9826	0,9905	0,9836	0,9856	0,9826
10	0	0	0	0,9974	0,9816	0,9865	0,9885	0,9974
11	+	+	0	0,9815	0,9894	0,9796	0,9835	0,9815
12	—	+	0	0,9875	0,9935	0,9905	0,9905	0,9875
13	+	—	0	0,9935	0,9671	0,9759	0,9788	0,9935
14	—	—	0	0,9720	0,9967	0,9917	0,9868	0,9720
15	0	0	0	0,9984	0,9737	0,9934	0,9885	0,9984

Таблица 4.20. Уровни и интервалы варьирования факторов

Наименование фактора	Обозначение	Уровни и интервалы варьирования			
		(-1)	(0)	(+1)	m
Толщина ленты льна, м	x_1	0,035	0,040	0,045	0,005
Радиальный зазор, м	x_3	0,007	0,009	0,011	0,002
Кратность воздействий бичами на фрагмент ленты льна	x_6	1,3	1,4	1,5	0,1

Таблица 4.21. Планирование и результаты эксперимента при описании области оптимума степени повреждения стеблей

Обозначения	Факторы			Значения параметра оптимизации				
	Толщина ленты, м x_1	Радиальный зазор, м x_3	Кратность воздействия x_6	y_1	y_2	y_3	$\bar{y}$	$\hat{y}$
Верхний уровень (1)	0,45	0,011	1,5					
Основной уровень (0)	0,4	0,009	1,4					
Нижний уровень (-1)	0,35	0,007	1,3					
Интервал варьирования m	0,05	0,002	0,1					
1	0	+	+	0,0286	0,0319	0,0265	0,0290	0,028
2	0	—	+	0,0403	0,0332	0,0288	0,0341	0,034
3	0	+	—	0,0282	0,0237	0,0225	0,0248	0,021
4	0	—	—	0,0313	0,0263	0,0249	0,0275	0,027
5	0	0	0	0,0270	0,0272	0,0289	0,0277	0,028
6	+	0	+	0,0288	0,0281	0,0316	0,0295	0,028
7	—	0	+	0,0355	0,0413	0,0321	0,0363	0,034
8	+	0	—	0,0260	0,0226	0,0205	0,0230	0,021
9	—	0	—	0,0265	0,0308	0,0240	0,0271	0,028
10	0	0	0	0,0329	0,0272	0,0229	0,0277	0,028
11	+	+	0	0,0205	0,0239	0,0186	0,0210	0,021
12	—	+	0	0,0272	0,0317	0,0248	0,0279	0,028
13	+	—	0	0,0312	0,0276	0,0249	0,0279	0,027
14	—	—	0	0,0356	0,0420	0,0319	0,0365	0,034
15	0	0	0	0,0315	0,0270	0,0246	0,0277	0,028

Результаты расчетов коэффициентов регрессии приведены в табл. 4.22.

Таблица 4.22. Коэффициенты регрессии модели второго порядка

Критерии оптимизации							
Чистота обмолота $\chi_{об}$				Степень повреждения стеблей Π_c			
b_0	0,9885	b_{16}	0,0027	b_0	0,0277	b_{16}	—0,0007
b_1	—0,0053	b_{36}	—0,0015	b_1	—0,0033	b_{36}	—0,0006
b_3	—0,0007	b_{11}	—0,0024	b_3	—0,0029	b_{11}	0,0004
b_6	0,0081	b_{33}	—0,0012	b_6	0,0033	b_{33}	0,0003
b_{13}	0,0003	b_{66}	—0,0015	b_{13}	0,0004	b_{66}	0,0009

Подставляя полученные значения коэффициентов регрессии в уравнение (4.15), получим уравнение регрессии в кодированном виде для определения:

чистоты обмолота:

$$y_1 = 0,9885 - 0,0053x_1 - 0,0007x_3 + 0,0081x_6 + \\ + 0,0003x_{1,3} + 0,0027x_{1,6} - 0,0015x_{3,6} - 0,0024x_1^2 - \\ - 0,0012x_3^2 - 0,0015x_6^2; \quad (4.21)$$

степени повреждения стеблей:

$$y_2 = 0,0277 - 0,0033x_1 - 0,0029x_3 + 0,0033x_6 + 0,0004x_{1,3} - \\ - 0,0007x_{1,6} - 0,0006x_{3,6} + 0,0004x_1^2 + \\ + 0,0003x_3^2 + 0,0009x_6^2. \quad (4.22)$$

Для подтверждения гипотезы об адекватности моделей второго порядка проводили статистический анализ полученных уравнений. Оценку адекватности моделей второго порядка производили путем сравнения табличного значения критерия Фишера с расчетным [80, 128]. Расчет критерия Фишера осуществляли по формуле [80]

$$F = \frac{SS_{LF}}{f_{LF}} \frac{f_y}{SS_y}, \quad (4.23)$$

где SS_{LF} – сумма квадратов, определяющая неадекватность результатов эксперимента [80];

$$SS_{LF} = m \sum_{u=1}^N (\hat{y}_u - \bar{y}_u)^2, \quad (4.24)$$

SS_y – сумма квадратов, характеризующая ошибку опытов [80];

$$SS_y = \sum_{u=1}^N \sum_{i=1}^m (y_{iu} - \bar{y}_u)^2, \quad (4.25)$$

где f_{LF} и f_y – число степеней свободы, отвечающее соответственно сумме SS_{LF} и SS_y [80];

$$f_{LF} = N - k_p; \quad (4.26)$$

$$f_y = N(m-1), \quad (4.27)$$

где k_p – число коэффициентов в уравнении регрессии.

Для удобства расчета критерия Фишера промежуточные результаты расчетов сводили в табл. 4.23–4.24.

Таблица 4.23. Вспомогательная таблица для расчета экспериментального значения критерия Фишера для чистоты обмолота

№ опыта	$\bar{y}$	y_i	$(\bar{y} - y_1)^2$	$(\bar{y} - y_2)^2$	$(\bar{y} - y_3)^2$	$\bar{y} - y_i$	$(\bar{y} - y_i)^2$
1	0,9888	0,9960	0,000098	0,0000012	0,00008	-0,00716	0,00005
2	0,9985	0,9973	0,000001	0,0000040	$8,07 \cdot 10^{-7}$	0,00124	$1,53 \cdot 10^{-6}$
3	0,9760	0,9797	0,000049	0,0001867	0,00004	-0,00374	0,00001
4	0,9799	0,9810	0,000096	0,0000038	0,00006	-0,00114	$1,29 \cdot 10^{-6}$
5	0,9885	0,9885	0,000001	0,0000244	0,00004	0	0
6	0,9888	0,9914	0,000009	0,0000244	0,00006	-0,00255	0,00001
7	0,9970	1,0019	0,000001	0,0000010	0	-0,00488	0,00002
8	0,9667	0,9751	0,000786	0,0003164	0,00011	-0,00843	0,00007
9	0,9856	0,9857	0,000009	0,0000243	$3,8 \cdot 10^{-6}$	-0,00005	$2,5 \cdot 10^{-9}$
10	0,9885	0,9885	0,000079	0,0000479	$3,9 \cdot 10^{-6}$	0	0
11	0,9835	0,9826	0,000004	0,0000348	0,00002	0,00091	$0,83 \cdot 10^{-6}$
12	0,9905	0,9931	0,000009	0,0000088	$4,93 \cdot 10^{-32}$	-0,00261	0,00001
13	0,9788	0,9839	0,000216	0,0001380	0,00001	-0,00509	0,00003
14	0,9868	0,9944	0,000219	0,0000974	0,00002	-0,00761	0,00006
15	0,9885	0,9885	0,000098	0,0002199	0,00002	0	0
Сумма			0,001674	0,001133	0,000467	-0,041100	0,000261

Таблица 4.24. Вспомогательная таблица для расчета экспериментального значения критерия Фишера для степени повреждения стеблей

№ опыта	$\bar{y}$	y_i	$(\bar{y} - y_1)^2$	$(\bar{y} - y_2)^2$	$(\bar{y} - y_3)^2$	$\bar{y} - y_i$	$(\bar{y} - y_i)^2$
1	0,02900	0,02810	$0,125 \cdot 10^{-6}$	$8,4 \cdot 10^{-6}$	$6,48 \cdot 10^{-6}$	0,0009	$0,81 \cdot 10^{-6}$
2	0,03410	0,03393	$38,1 \cdot 10^{-6}$	$0,7 \cdot 10^{-6}$	$0,28 \cdot 10^{-6}$	0,000175	$0,03 \cdot 10^{-6}$
3	0,02480	0,02148	$11,6 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$5,34 \cdot 10^{-6}$	0,003325	$11,05 \cdot 10^{-6}$
4	0,02750	0,02730	$14,4 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$6,97 \cdot 10^{-6}$	0,0002	$0,04 \cdot 10^{-6}$
5	0,02770	0,02770	$0,48 \cdot 10^{-6}$	$0,3 \cdot 10^{-6}$	$1,49 \cdot 10^{-6}$	0	0
6	0,02950	0,02771	$0,50 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$4,57 \cdot 10^{-6}$	0,0017875	$3,19 \cdot 10^{-6}$
7	0,03630	0,03431	$0,58 \cdot 10^{-6}$	$25,0 \cdot 10^{-6}$	$0,17 \cdot 10^{-6}$	0,0019875	$3,95 \cdot 10^{-6}$
8	0,02300	0,02109	$8,8 \cdot 10^{-6}$	$0,2 \cdot 10^{-6}$	$6,47 \cdot 10^{-6}$	0,0019125	$3,65 \cdot 10^{-6}$
9	0,02710	0,02769	$0,39 \cdot 10^{-6}$	$14,0 \cdot 10^{-6}$	$9,71 \cdot 10^{-6}$	-0,000587	$0,34 \cdot 10^{-6}$
10	0,02770	0,02770	$0,27 \cdot 10^{-6}$	$0,2 \cdot 10^{-6}$	$0,227 \cdot 10^{-6}$	0	0
11	0,02100	0,02149	$0,21 \cdot 10^{-6}$	$8,2 \cdot 10^{-6}$	$5,73 \cdot 10^{-6}$	-0,000487	$0,23 \cdot 10^{-6}$
12	0,02790	0,02809	$0,48 \cdot 10^{-6}$	$14,8 \cdot 10^{-6}$	$9,9 \cdot 10^{-6}$	-0,000187	$0,035 \cdot 10^{-6}$
13	0,02790	0,02731	$10,9 \cdot 10^{-6}$	$0,1 \cdot 10^{-6}$	$8,83 \cdot 10^{-6}$	0,0005875	$0,34 \cdot 10^{-6}$
14	0,03650	0,03391	$0,83 \cdot 10^{-6}$	$30,0 \cdot 10^{-6}$	$0,21 \cdot 10^{-6}$	0,0025875	$6,69 \cdot 10^{-6}$
15	0,02770	0,02770	$14,6 \cdot 10^{-6}$	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$9,8 \cdot 10^{-6}$	0	0
Сумма			0,00013	$106,9 \cdot 10^{-6}$	0,00017	0,01220	0,00003

Результаты расчетов статистических характеристик оценки моделей второго порядка, произведенных по формулам (4.21)–(4.25), приведены в табл. 4.25.

Таблица 4.25. Результаты статистической оценки моделей второго порядка

Параметр	Значение	
	$y_1 (Ч_{об})$	$y_2 (П_c)$
SS_{LF}	0,00078	0,0000912
SS_y	0,0033	0,0004
f_{LF}	5	5
f_y	30	30
F_p	1,434	1,3629
F_T	2,51	2,51

Поскольку $F_p < F_T$, то гипотеза об описании результатов эксперимента уравнением второго порядка (4.21) и (4.22) принимается [52, 80, 131].

Расчет доверительных интервалов производили по формулам [80]

$$\pm \Delta b_i = \pm t_c S_{bi}; \quad (4.28)$$

$$S_{b0} = \frac{1}{n_0} S_y^2; \quad (4.29)$$

$$S_{bi} = \frac{1}{8} S_y^2; \quad (4.30)$$

$$S_{bii} = \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{4} n_0 \right) S_y^2; \quad (4.31)$$

$$S_{bij} = \frac{1}{4} S_y^2, \quad (4.32)$$

где t_c – табличное значение критерия Стьюдента [80];

S_{bi} – квадратичная ошибка коэффициента регрессии [80];

n_0 – число нулевых точек в матрице плана.

Числовые коэффициенты зависимостей (4.27)–(4.30) определяли согласно выбранному плану эксперимента и числу факторов [80].

Результаты расчетов приведены в табл. 4.26.

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод о том, что коэффициенты регрессии являются значимыми.

Таблица 4.26. Результаты статистической оценки моделей второго порядка

Статистическая характеристика	Значение	
	Ч _{об}	П _с
N	15	15
K	3	3
n_0	3	3
S_y^2	0,00011	0,000013
S_{b0}	0,00004	0,000004
S_{bi}	0,00001	0,000002
S_{bii}	0,00011	0,000013
S_{bij}	0,00003	0,000003
$\pm \Delta b_0$	$\pm 0,00008$	$\pm 0,000010$
$\pm \Delta b_i$	$\pm 0,00003$	$\pm 0,000004$
$\pm \Delta b_{ii}$	$\pm 0,00025$	$\pm 0,000031$
$\pm \Delta b_{ij}$	$\pm 0,00006$	$\pm 0,000008$

Для перехода к реальным значениям факторов выполнили раскодирование полученных математических моделей по формуле (4.5). В результате получили следующие уравнения:

для чистоты обмолота:

$$\begin{aligned} \text{Ч}_{\text{об}} = & 1,2587 - 0,9534h_{\text{сл}} + 14,0585\Delta - 0,4984q + 25,0h_{\text{сл}}\Delta + \\ & + 5,35h_{\text{сл}}q - 7,25\Delta q - 97,25h_{\text{сл}}^2 - 290,75\Delta^2 + 0,1538q^2; \end{aligned} \quad (4.33)$$

для степени повреждения стеблей:

$$\begin{aligned} \text{П}_c = & 0,1285 - 0,3525h_{\text{сл}} - 0,0815\Delta - 0,13787q + 42,5h_{\text{сл}}\Delta - \\ & - 1,35h_{\text{сл}}q - 3,0\Delta q + 15,0h_{\text{сл}}^2 + 62,5\Delta^2 + 0,09q^2, \end{aligned} \quad (4.34)$$

где $h_{\text{сл}}$ – толщина ленты льна, м;

Δ – радиальный зазор, м;

q – кратность воздействий бичами на фрагмент ленты льна.

Подставив в уравнения (4.33) и (4.34) значения факторов, соответствующие их нулевым уровням, получили значения чистоты обмолота $\text{Ч}_{\text{об}} = 0,9878$ и степени повреждения стеблей $\text{П}_c = 0,028$. В результате экспериментов, проведенных при нулевых уровнях факторов, получили значения чистоты обмолота $\text{Ч}_{\text{об}} = 0,9885$ и степени повреждения стеблей $\text{П}_c = 0,0277$ (см. табл. 4.23–4.24). Разность между расчетными и экспериментальными значениями не превысила 5 %. На основании этого можно сделать вывод о том, что экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными и подтверждают их [52].

4.5.5. Анализ математических моделей процесса

После получения адекватных математических моделей второго порядка следующим этапом являлось определение координат оптимумов и изучение свойств поверхностей отклика в их окрестностях [5].

Нахождение оптимальных параметров изучаемого процесса сводили к решению задачи математического программирования с целевой функцией

$$Ч_{об} = 1,2587 - 0,9534h_{сл} + 14,0585\Delta - 0,4984q + 25,0h_{сл}\Delta + 5,35h_{сл}q - 7,25\Delta q - 97,25h_{сл}^2 - 290,75\Delta^2 + 0,1538q^2 \rightarrow \max. \quad (4.35)$$

$$\begin{cases} 0,03 \leq h_{сл} \leq 0,05; \\ 0,007 \leq \Delta \leq 0,011; \\ 1,3 \leq q \leq 1,5; \\ \Pi_c = 0,1285 - 0,3525h_{сл} - 0,0815\Delta - 0,13787q + 42,5h_{сл}\Delta - \\ - 1,35h_{сл}q - 3,0\Delta q + 15,0h_{сл}^2 + 62,5\Delta^2 + 0,09q^2 \leq 0,03. \end{cases} \quad (4.36)$$

Решение оптимизационной задачи (4.35)–(4.36) производили в Microsoft Excel с помощью надстройки «Поиск решения». Для этого исходные данные разместили на листе Excel в порядке, показанном на рис. 4.26.

Исходные данные разделили на четыре блока:

- 1) коэффициенты полученной математической модели (4.33) (блок ячеек В3:С12);
- 2) коэффициенты полученной математической модели (4.34) (блок ячеек В3:В12; D3:D12);
- 3) вычисляемые параметры: значения аргументов математической модели (4.33) (блок ячеек С15:G15) и значение функции (ячейка С19);
- 4) границы варьирования аргументов математической модели (4.36) (блок ячеек С16:E17).

В качестве целевой функции в ячейку С19 была введена формула, соответствующая полученной модели (4.35), а в ячейку С20 – формула, соответствующая модели (4.36), со ссылками на ячейки, отведенные под их аргументы.

	Чоб	Пс
b_0	1,2587	0,1285
b_1	-0,9534	-0,3525
b_3	14,0585	-0,0815
b_6	-0,4984	-0,13787
b_{13}	25	42,5
b_{16}	5,35	-1,35
b_{36}	-7,25	-3
b_{11}	-97,52	15
b_{33}	-290,75	62,5
b_{66}	0,1538	0,09

Обозначение параметров	h	δ	q
Значения параметров			
Нижняя граница	0,03	0,007	1,3
Верхняя граница	0,05	0,011	1,5

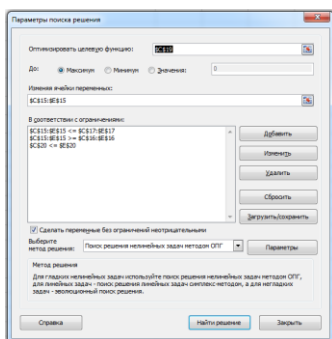
Целевая функция Чоб: $=C3+C4*C15+C5*D15+C6*E15+C7*C15*D15+C8*C15*E15+C9*C15*F15+C10*C15*2+C11*D15*2+C12*E15*2$

Целевая функция Пс: $=D3+D4*C15+D5*D15+D6*E15+D7*C15*D15+D8*C15*E15+D9*D15*E15+D10*D15*2+D11*D15*2+D12*E15*2$

Рис. 4.26. Общий вид оформления оптимизационной задачи на листе Excel

В окне надстройки «Параметры поиска решения» (рис. 4.27, а) указали ячейку целевой функции (C19) и ее стремление к максимуму. Определили блок изменяемых ячеек (C15:E15) и ограничения для них, соответствующие выражениям (4.36).

В результате решения поставленной задачи были получены результаты, отображенные на рисунке 4.27, б.



а

	h	δ	q
Значения параметров	0,041	0,010	1,500
Нижняя граница	0,03	0,007	1,3
Верхняя граница	0,05	0,011	1,5

Целевая функция Чоб: 0,996368

Целевая функция Пс: 0,029999

б

Рис. 4.27. Общий вид оформления надстройки «Поиск решения» (а) и результатов решения оптимизационной задачи (4.35)–(4.36) (б)

Данные результаты показывают, что роторно-бильный аппарат способен обеспечить чистоту обмолота лент льна на уровне 0,996 при допустимом значении степени повреждения стеблей льна до 3 %. При этом толщина ленты льна должна быть $h_{\text{сл}} = 0,041$ м, радиальный зазор $\Delta = 0,01$ м, кратность воздействия $q = 1,5$.

Изучение поверхности отклика проводили методом двумерных сечений (рис. 4.28–4.30). Полученные выражения подвергали графоаналитическому анализу, для которого использовали графики в координатах независимых переменных с натуральным масштабom.

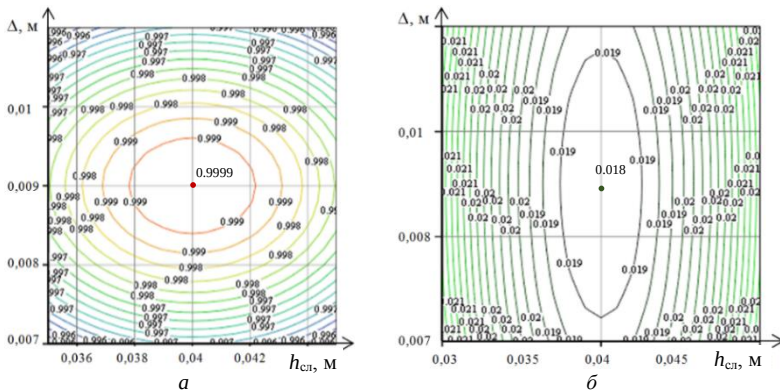


Рис. 4.28. Двумерное сечение поверхности отклика для факторов Δ и $h_{\text{сл}}$:
 a – чистота обмолота $\text{Ч}_{\text{об}}$; b – степень повреждения стеблей $\text{П}_{\text{с}}$

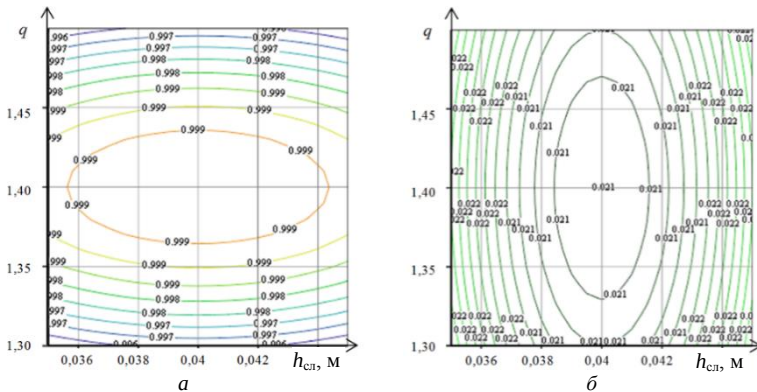


Рис. 4.29. Двумерное сечение поверхности отклика для факторов q и $h_{\text{сл}}$:
 a – чистота обмолота $\text{Ч}_{\text{об}}$; b – степень повреждения стеблей $\text{П}_{\text{с}}$

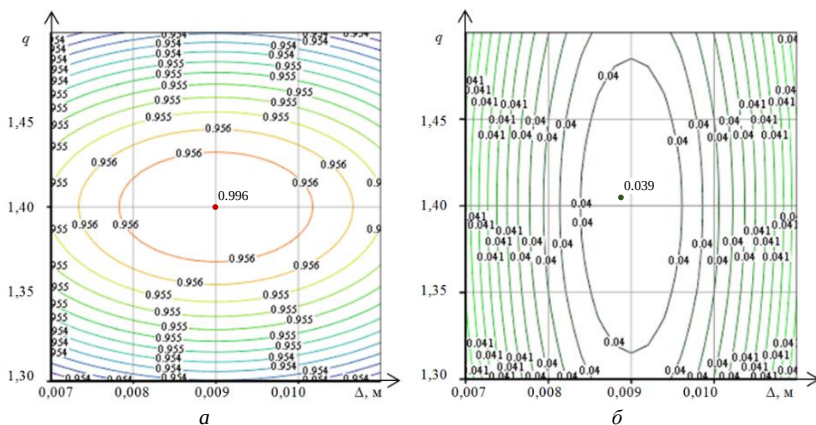


Рис. 4.30. Двумерное сечение поверхности отклика для факторов q и Δ :
 a – чистота обмолота $\chi_{об}$; b – степень повреждения стеблей Π_c

Анализируя полученные двумерные сечения (см. рис. 4.28–4.30), можно отметить, что области оптимума соответствуют значения исследуемых факторов в следующих пределах [177]:

- толщина ленты льна – от 0,037 до 0,043 м;
- радиальный зазор – от 0,007 до 0,011 м;
- кратность воздействий бичами на фрагмент ленты льна – от 1,32 до 1,5.

Выводы

1. Определены значения углов ξ перегиба стеблей в ленте льна. Установлено, что значения перегиба стеблей в ленте в случае их группировки по факторам высоты тербления и скоростного режима работы подчиняются закону нормального распределения. Установлено, что 97 % значений угла ξ перегиба стеблей льна не превышают $+12^\circ$ ($+0,188$ рад).

Получены эмпирические зависимости удлинения Δ_d стеблей льна и коэффициента к удлинению стеблей в ленте льна от ширины $L_{об}$ выступающего из зажимного транспортера участка стеблей льна, позволяющие уточнить радиусы ротора и защитного кольца [155, 173].

Установлены основные факторы, определяющие усилие разрушения коробочки льна-долгунца – степень зрелости коробочки и ее

влажность. Имеется сильная прямая связь между силой разрушения коробочки льна и ее влажностью, а также высокая степень связи между критической величиной смятия и влажностью коробочек. Скручивающее воздействие на коробочку льна-долгунца снижает усилие разрушения на 25–40 % в зависимости от влажности и степени зрелости, а величину предельного смятия на 9–12,5 %. Влияние применения металлических и полиуретановых пластин на критическую величину смятия несущественно и при влажности коробочек льна 16–25 % ничтожно мало, им можно пренебречь. Влияние использования полиуретановых и металлических пластин на усилие разрушения коробочек неодинаково и зависит от схемы нагружения коробочки.

2. По результатам поисковых экспериментов установлено, что такие факторы, как продольный угол β_6 наклона боковой поверхности, поперечный угол α_6 наклона боковой поверхности бича, поперечный угол α_n наклона передней поверхности бича, а также ширину b_6 торцевой поверхности бича можно зафиксировать на рациональных значениях, обеспечивающих наименьшие размеры обмолачивающего устройства: $\beta_6 = 0,188$ рад (12°), $\alpha_n = 1,396$ рад (80°), $\alpha_6 = 0,47$ рад (27°), $b_6 = 0,055$ м [175].

Анализ поисковых экспериментов роторно-бильного аппарата позволил определить рациональные интервалы варьирования факторов при обмолоте ленты льна роторно-бильным аппаратом исходя из обеспечения требуемых значений параметров оптимизации: толщины обрабатываемой ленты льна – 0,03–0,05 м; осевого зазора – 0,001–0,004 м; радиального зазора – 0,007–0,017 м; угла установки боковой деки – 0,244–0,314 рад (14 – 18°); ширины зоны расположения семенных коробочек в ленте – 0,2–0,4 м; окружной скорости ротора – 7–11,5 м/с; скорости подаваемой на обмолот ленты льна – 1,35–2,20 м/с [175].

3. Получены математические модели, описывающие процесс обмолота ленты льна роторно-бильным аппаратом. Они позволили определить значения факторов, при которых достигается наибольшая чистота обмолота ($\text{Ч}_{\text{об}} = 0,996$) при допустимом значении степени повреждения стеблей льна: толщины ленты льна $h_{\text{сл}} = 0,041$ м; радиального зазора $\Delta = 0,01$ м; кратности воздействий $q = 1,5$. Остальные факторы фиксировались на ранее определенных рациональных уровнях: осевой зазор – 0,004 м; скорость подачи ленты льна – 1,5 м/с; угол установки боковой деки – 0,188 рад (14°); ширина торцевой поверхности бича – 0,055 м [177].

5. РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ ВНЕДРЕНИЯ

5.1. Условия и результаты проведения полевых испытаний

Испытания проводили на поле урочища Петруки ОАО «Дворецкий льнозавод» Дятловского района 3–11 августа 2021 г. На момент начала опытов лен находился в стадии желтой спелости (рис. 5.1). В табл. 5.1 приведены основные характеристики условий испытаний опытного образца льнокомбайна с роторно-бильным аппаратом.



Рис. 5.1. Общий вид посевов льна-долгунца при проведении испытаний

Состав агрегата – трактор «Беларус-820» + льнокомбайн «Двина-4М» с роторно-бильным аппаратом + прицеп 2ПТС-4,5 (рис. 5.2).

Полевые испытания опытного образца льноуборочного комбайна проводили после настройки параметров и режимов работы рабочих органов в соответствии со значениями, полученными путем теоретических и лабораторных исследований [154].

Испытания проведены на соответствие машины введенным в действие 5 марта 2008 г. требованиям ТУ ВУ 300079094.006–2007 на комбайн льноуборочный «Двина-4М». На рис. 5.3 показан фрагмент испытаний льноуборочного комбайна с опытным образцом роторно-бильного аппарата.

Таблица 5.1. Условия испытаний [36]

Характеристика	Значение
Культура, сорт	Лен-долгунец, Ласка (1 р)
Рельеф, град	Уклон не более 10
Фаза спелости льна	Желтая
Спелость коробочек по семенам, %:	
– зеленые	14
– желтые	21
– бурые	65
Влажность, %:	
– стеблей	22,2
– коробочек	14,5
– сорняков	55,6
Полегание стеблестоя, балл	4,5
Высота зоны расположения коробочек в стеблестое над поверхностью поля, см	13,2
Высота расположения зоны коробочек, см	68,7
Общая длина стебля, см	73,9
Засоренность культуры сорняками, %	3,04
Густота стеблестоя, шт/м ²	1606
Диаметр стебля, мм	1,25
Скорость ветра, м/с	До 0,5



Рис. 5.2. Общий вид уборочного агрегата с переоборудованным комбайном «Двина-4М»



Рис. 5.3. Рабочий процесс льноуборочного комбайна «Двина-4М» с роторно-бильным аппаратом

Лента льна (рис. 5.4), уложенная на поле льноуборочным комбайном с роторно-бильным аппаратом, соответствовала предъявляемым требованиям (растянутость не превышала 1,1–1,15).



Рис. 5.4. Ленты льна после обмолота переоборудованным льноуборочным комбайном «Двина-4М»

Влияние влажности и спелости льна на качественные показатели устройств для отделения семян от стеблей льна отмечается многими

исследователями [23, 31, 49, 128, 142]. Наступление желтой спелости у сорта Ласка произошло 29 июля, при этом в стеблестое льна содержалось 17 % зеленых, 56 % желтых и 28 % бурых коробочек. 6 августа отмечено начало фазы полной спелости льна-долгунца. Количество бурых коробочек в стеблестое льна достигло 88 %, желтых – 11 % и зеленых – 1 %.

В процессе созревания льна средняя влажность стеблей и ранне-спелого, и позднеспелого сортов мало отличалась [47]. При этом средняя влажность стеблей $W_{\text{лс}}$ и коробочек $W_{\text{лк}}$ уменьшалась по параболическим кривым (рис. 5.5).

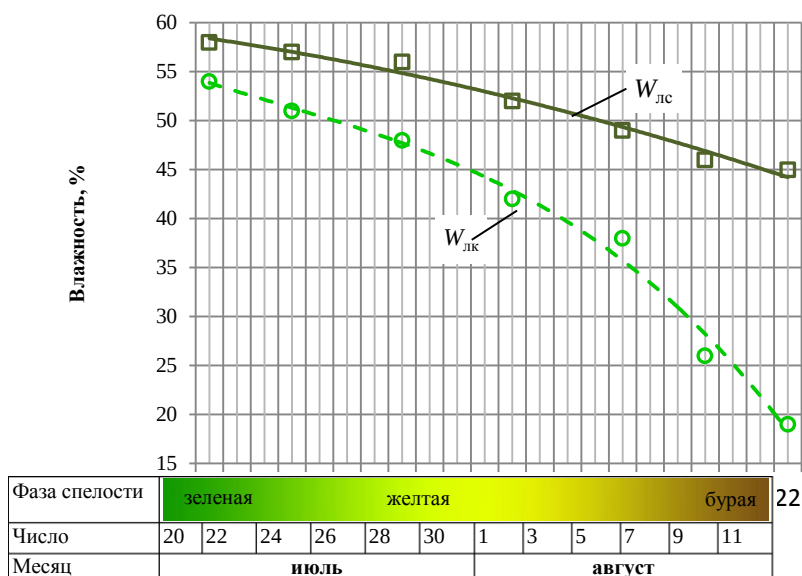


Рис. 5.5. Зависимости влажности льна от фазы спелости

Средняя влажность коробочек льна изменялась более существенно, что особенно заметно в конце желтой и бурой спелости. При проведении эксперимента у сорта Ласка средняя влажность коробочек уменьшалась с 54,5 % в фазе зеленой спелости до 17 % в фазе бурой спелости.

В процессе полевых испытаний исследовали качественные показатели работы обмолачивающего аппарата в желтой (рис. 5.6) и бурой (рис. 5.7) фазах спелости льна.

Исследование влияния радиального зазора на параметры оптимизации в фазе желтой спелости льна при различной окружной скорости ротора (рис. 5.6) показали, что увеличение зазора с 0,007 до 0,012 м приводит к снижению и чистоты обмолота, и степени повреждения стеблей. Это обусловлено уменьшением силового воздействия рабочих органов на обрабатываемый материал в молотильном пространстве. При кратности воздействий бичей на фрагмент ленты льна $q = 1,27$ рациональное значение зазора находится в диапазоне 0,008–0,01 м, при кратности воздействий $q = 1,36$ – в диапазоне 0,009–0,011 м, при кратности воздействий $q = 1,49$ – в диапазоне 0,01–0,012 м.

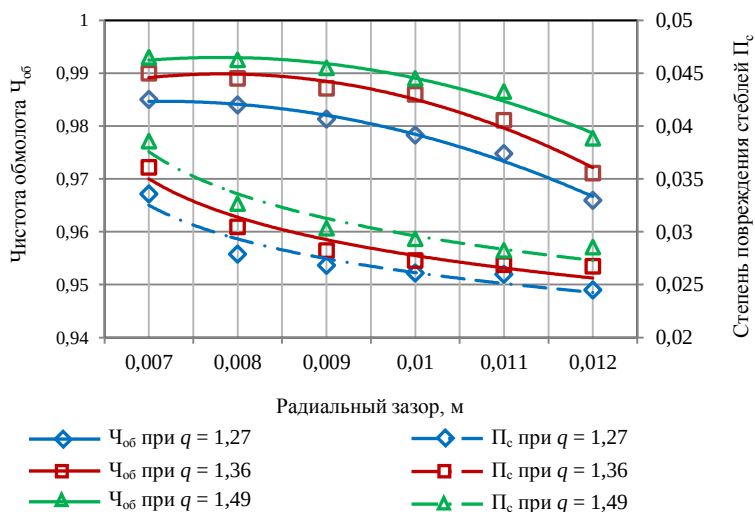


Рис. 5.6. Зависимости чистоты обмолота и степени повреждения стеблей льна от радиального зазора в фазе желтой спелости льна

Исследование влияния радиального зазора на параметры оптимизации в фазе бурой спелости льна при различной окружной скорости ротора (рис. 5.7) показали, что при кратности воздействий $q = 1,27$ рациональное значение радиального зазора находится в диапазоне 0,0076–0,011 м, при кратности воздействий $q = 1,36$ – в диапазоне 0,008–0,012 м, при кратности воздействий $q = 1,49$ – в диапазоне

0,009–0,012 м. Это также связано с уменьшением силового воздействия рабочих органов на обрабатываемый материал в молотильном пространстве.

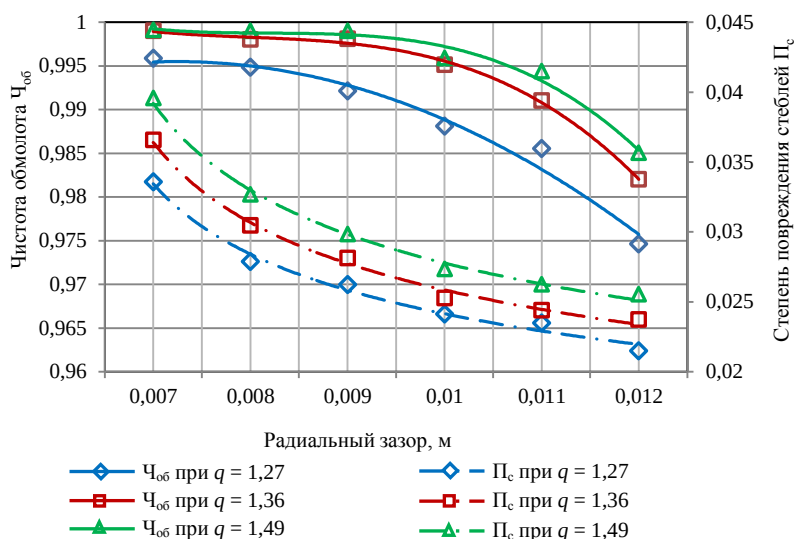


Рис. 5.7. Зависимости чистоты обмолота и степени повреждения стеблей льна от радиального зазора в фазе бурой спелости льна

Из вышеизложенного следует, что спелый лен лучше поддается обмолоту и при кратности воздействий $q = 1,27–1,36$ в диапазоне изменения радиального зазора 0,007–0,011 м чистота обмолота не превышает допустимых регламентом значений. В фазе желтой спелости уменьшение чистоты обмолота ниже 0,98 наблюдается при кратности воздействий $q = 1,27$ при зазоре больше 0,01 м.

Влияние радиального зазора на степень повреждения стеблей более существенно в фазе бурой спелости, чем в фазе желтой спелости. Это обусловлено тем, что по мере созревания льна стебли становятся более жесткими, а корковый и древесный слои хрупкими, что при изгибе стебля приводит к заломам.

Изменение окружной скорости ротора оказывает существенное влияние на качественные показатели процесса обмолота. Ее увеличение приводит к увеличению кратности воздействия бичами на фрагмент

ленты льна и, соответственно, повышает вероятность непосредственного воздействия рабочих органов на стебли и семенные коробочки льна, что положительно сказывается на чистоте обмолота и отрицательно – на степени повреждения стеблей. Таким образом, производственные испытания позволили подтвердить рациональные значения параметров роторно-бильного аппарата при обмолоте лент льна, полученные в ходе лабораторных исследований.

Получаемый после льноуборочного комбайна семенной ворох со значительным содержанием путанины представляет собой связанную массу, трудноразделимую из-за пронизывающих ее прочных стеблей. У такого вороха практически полностью отсутствует сыпучесть. После выгрузки из транспортных средств при перемещении по плоскости он сохраняет форму емкости, из которой выгружен [6]. Все это затрудняет его дальнейшую переработку.

Оборудованный роторно-бильным аппаратом льноуборочный комбайн «Двина-4М» обеспечивал получение однородного вороха (рис. 5.8) с низким содержанием путанины, который имел значительно меньшую влажность и представлял собой малосыпучий, но легкоразделимый материал [154].



Рис. 5.8. Общий вид льновороха, полученного после работы опытного образца льнокомбайна

Были проведены исследования объемной массы семенного вороха льна, полученного при уборке льна-долгунца льноуборочным комбай-

ном ЛК-4А с серийным гребневым очесывающим аппаратом и комбайном «Двина-4М» с роторно-бильным обмолачивающим аппаратом, что позволило судить о степени насыщенности вороха семенами. Объемная масса льняного вороха (табл. 5.2), полученного при уборке льна комбайном ЛК-4А с гребневым очесывающим устройством, изменялась в пределах 129–151 кг/м³ и в среднем составляла 140,2 кг/м³.

Таблица 5.2. Объемная масса семенного вороха льна, полученного при уборке комбайнами с гребневым очесывающим и роторно-бильным аппаратами

Показатели	Повторность опытов			Среднее арифметическое значение
	1	2	3	
При уборке комбайном «Двина-4М» с гребневым очесывающим аппаратом				
Масса вороха, кг	13,3	15,5	11	13,27
Площадь дна ящика, м ²	0,25	0,25	0,25	0,25
Высота расположения вороха в ящике, м	0,38	0,41	0,34	0,38
Объемная масса вороха, кг/м ³	140,0	151,22	129,41	140,21
При уборке комбайном «Двина-4М» с роторно-бильным аппаратом				
Масса вороха, кг	12,1	14,63	17,05	14,59
Площадь дна ящика, м ²	0,25	0,25	0,25	0,25
Высота расположения вороха в ящике, м	0,35	0,38	0,41	0,38
Объемная масса вороха, кг/м ³	138,29	154,00	166,34	152,88

Объемная масса семенного вороха, полученного при уборке льна комбайном «Двина-4М» с роторно-бильным аппаратом, изменялась в пределах 138–166 кг/м³ и в среднем составляла 152,9 кг/м³, что на 9 % больше, чем у вороха, полученного при очесе гребневым аппаратом. Это свидетельствует о меньшем содержании в ворохе примесей и большем содержании семян.

В семенном ворохе, полученном при уборке льна комбайном «Двина-4М» с гребневым очесывающим аппаратом, содержалось 52–84 % семенных коробочек различной спелости и влажности (рис. 5.9), 2–9 % свободных семян и 12–45 % путанины, мякины и сорняков. Всего семян в ворохе содержалось 35–50 % от общей массы вороха.

В семенном ворохе, полученном при уборке льна комбайном «Двина-4М» с роторно-бильным аппаратом, содержалось 55–87 % семенных коробочек различной спелости и влажности (рис. 5.9), 11–16 % свободных семян и 4–23 % путанины, мякины и сорняков. Всего семян в ворохе содержалось 41–67 % от общей массы вороха.

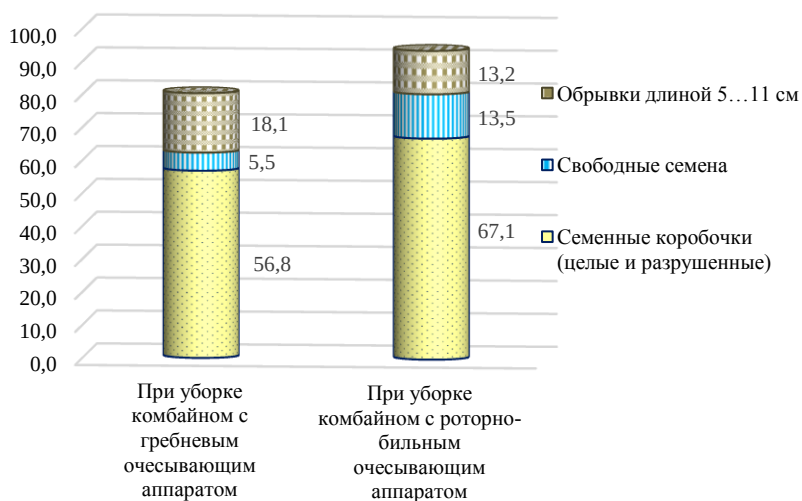


Рис. 5.9. Процентный состав семенного вороха

Длина обрывков стеблей льна при очесе гребневым аппаратом составляла 20–170 мм, при этом 48 % обрывков стеблей имели длину 50–10 мм и 32 % – 110–150 мм.

Длина обрывков стеблей льна при обмолоте роторно-бильным аппаратом составляла 10–150 мм, 52 % обрывков стеблей имели длину 30–90 мм и 27 % – 90–120 мм.

Применение роторно-бильного аппарата по сравнению с гребневым очесывающим аппаратом позволило уменьшить процентное содержание путанины в структуре льняного вороха в среднем на 48,5 %, а общий объем льновороха снизить на 28,5–56,3 %. Объемная масса вороха, полученного при уборке роторно-бильным аппаратом, увеличилась на 9 % (с 140 до 152,8 кг/м³).

Средние значения показателей сравнительной агротехнической оценки работы льноуборочного комбайна «Двина-4М» с серийным гребневым очесывающим аппаратом и с предлагаемым роторно-бильным аппаратом приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3. Результаты сравнительных испытаний комбайнов «Двина-4М» с различными аппаратами для отделения семенной части

Показатели	Значение показателя		
	по ТУ и ТНПА	по результатам испытаний	
		гребневый очесывающий аппарат	роторно- бильный аппарат
Скорость движения комбайна, км/ч	6–8	7,09	7,68
Ширина захвата, м	1,52	1,52	1,52
Производительность за час основного времени, га	1	0,8	0,8
Производительность за час сменного времени, га		0,5	0,54
Показатели качества выполнения технологического процесса			
Потери семян всего, %	Не более 4	3,81	2,57
В т. ч.:			
- под теребильным аппаратом		0,64	0,64
- от выноса с лентой		2,30	0,97
- от недоочеса		0,87	0,85
- от просыпания под очесывающим аппаратом		3,18	1,83
Чистота очеса (обмолота), %	Не менее 98	97,53	98,97
Потери стеблей всего, %		2,21	0,98
В т. ч.:			
- невытеребленными		0,24	0,24
- в виде отхода стеблей в путанину	Не более 3	1,97	0,74
Чистота тербления, %	Не менее 99	99,37	99,37
Состав льновороха по массе, %:			
- семенные коробочки целые и разрушенные		48,02	65,05
- семена свободные		1,67	7,93
- путанина		37,67	19,4
- сорняки		1,82	1,35
- прочие примеси		12,50	14,2
Характеристика ленты льна после обработки:			
- растянутость ленты	Не более 1,2	1,15	1,15
- степень повреждения стеблей, %		3,00	1,86
- открытый излом стебля с разрывом волокна		0,84	0,92
- обрыв технической длины		2,15	1,56

Как видно из табл. 5.3, все показатели работы льноуборочного комбайна с роторно-бильным аппаратом соответствуют техническим условиям ТУ ВУ 300079094.006–2007 на льнокомбайн [154] «Двина-4М».

По результатам агротехнической оценки чистота обмолота у опытного образца составила в среднем для трех режимов работы 98,97 %,

что отвечает требованиям ТУ ВУ 300079094.006–2007. Этот показатель получен при работе [154] машины при средней скорости 7,09 км/ч и кратности воздействий $q = 1,49$. При этом степень повреждения стеблей, влияющая на выход длинного волокна, составила 2,5 %. Практически все потери семян происходили из-за просыпания под очесывающим аппаратом, что обусловлено состоянием стеблестоя и недостаточной герметичностью камеры очеса. Так как испытания льнокомбайна происходили в фазах желтой и бурой спелости льна, то из-за растрескивания пересушенных семенных коробочек имелись повышенные потери семян от осыпания [117, 154].

5.2. Методика выбора параметров и режимов работы льноуборочного комбайна с роторно-бильным аппаратом

Методика выбора параметров и режимов работы комбайна с роторно-бильным аппаратом основана на результатах теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в соответствии с программой исследований.

Факторами, оказывающими наиболее существенное влияние на параметры оптимизации процесса обмолота лент льна обмолачивающим устройством, являются: кратность воздействий q бичами на фрагмент ленты льна (формула (2.95)), определяемая скоростью подачи ленты льна $v_{тр}$ и окружной скоростью ротора v_r ; толщина обмолачиваемого слоя стеблей льна $h_{сл}$ и радиальный зазор Δ . В зависимости от состояния убираемого стеблестоя необходимо значения этих факторов устанавливать на уровне, обеспечивающем наилучшие значения показателей качества.

В результате производственных испытаний с учетом формул (1.9), (1.11), (1.12), (2.81), (4.31) и (4.32) была разработана номограмма (рис. 5.10), позволяющая увязать агробиологические и физико-механические свойства стеблестоя, параметры и режимы работы роторно-бильного аппарата, обеспечивающие качественную работу льноуборочного комбайна.

В первом квадранте номограммы (рис. 5.10) представлены линии, соответствующие различным скоростям комбайна; во втором – график зависимости радиального зазора от толщины слоя стеблей льна; в третьем – график зависимости частоты вращения ротора от кратности воздействий бичами на фрагмент ленты льна; в четвертом – график зависимости кратности воздействий от влажности убираемого льна.

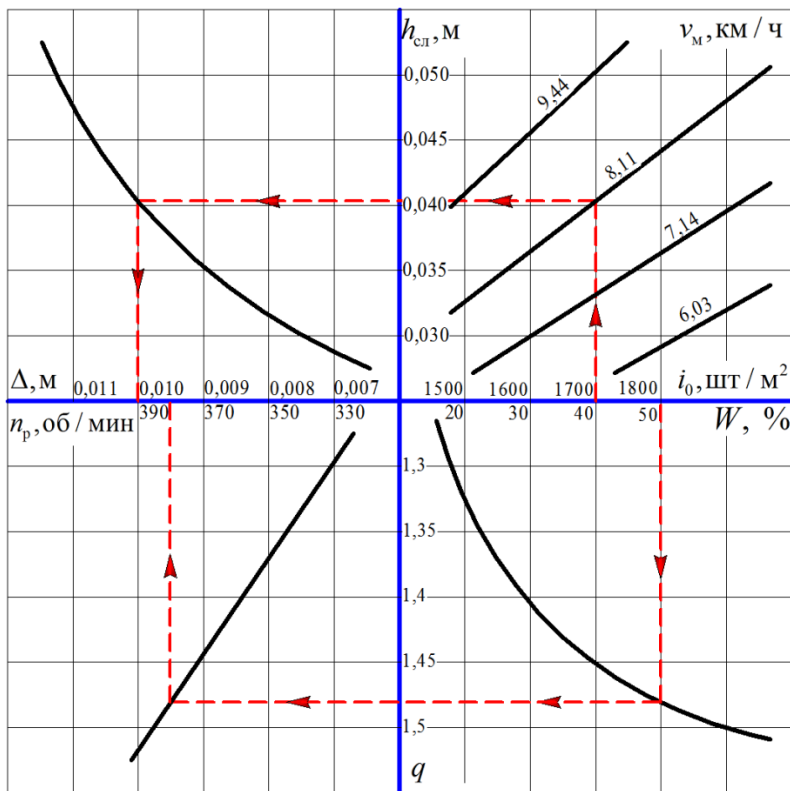


Рис. 5.10. Номограмма для выбора параметров и режимов работы льноуборочного комбайна с роторно-бильным аппаратом:
 v_m – скорость движения комбайна, км/ч; i_0 – густота стеблестоя, шт/м²;
 W – влажность убираемого льна, %; $h_{сл}$ – толщина слоя стеблей льна, м;
 Δ – радиальный зазор, м; n_p – частота вращения ротора, об/мин;
 q – кратность воздействий бичами на фрагмент ленты льна, шт.

Приведем пример использования номограммы. Исходные данные: густота стеблестоя i_0 (шт/м²) и влажность убираемого льна W (%). В первом квадранте номограммы проводим перпендикуляр вверх из точки, соответствующей выбранной густоте стеблестоя 1700 шт/м², до пересечения с линией, соответствующей скорости движения комбайна $v_m = 8,11$ км/ч, и проводим горизонталь до пересечения с осью $h_{сл}$. Таким образом определяем значение толщины слоя стеблей льна

$h_{\text{сл}} = 0,04$ м. Продолжив горизонталь до пересечения с графиком второго квадранта и опустив из точки пересечения перпендикуляр на ось Δ , получим значение радиального зазора $\Delta = 0,01$ м. В четвертом квадранте из точки, соответствующей влажности $W = 50$ %, опускаем перпендикуляр до пересечения с графиком зависимости кратности воздействия от влажности и проводим горизонталь до оси q . Таким образом определяем значение кратности воздействий бичами на фрагмент ленты льна $q = 1,48$. Продолжив горизонталь до пересечения с графиком третьего квадранта и из точки пересечения проведем перпендикуляр до оси n_p , получим значение частоты вращения ротора $n_p = 380$ об/мин.

5.3. Реализация результатов исследований

По результатам теоретических и экспериментальных исследований был изготовлен опытный образец роторно-бильного аппарата. Конструкция обеспечивала варьирование основных параметров обмолачивающего устройства в необходимых пределах. Производственные испытания льноуборочного комбайна с разработанным роторно-бильным аппаратом проводились в ОАО «Дворецкий льнозавод» Гродненской области.

По результатам проведенных производственных испытаний можно сделать заключение о том, что разработанное устройство работоспособно и обеспечивает значение качественных показателей процесса обмола в пределах агротехнических требований. Это подтверждается соответствующими актами [52].

Полученные результаты исследований рассматривались как составная часть хозяйственной темы [52] № 315 «Исследование процесса взаимодействия различных типов рабочих органов с льнотрестой и льноволокном», № госрегистрации 20143309, работы по которой проводились в 2014–2015 гг., а также в рамках договора на выполнение научно-исследовательской работы № 296 от 02.08.2021 «Производственные испытания льноуборочного комбайна «Двина-4М».

В 2019 г. проведена оценка возможности использования роторно-бильного аппарата в подборщике-очесывателе ПОЛ-1 в ОАО «Ореховский льнозавод». Установлено, что использование данного устройства, в сравнении с очесывающим устройством ПОЛ-1, позволит: уменьшить металлоемкость на 65 %; уменьшить энергоемкость процесса на 20–30 %; степень выделения семян из ленты льна –

98,7 %; повреждение стеблей льна до 1,8 %; потери семян до 0,9 %.

В ОАО «Дворецкий льнозавод» (аг. Дворец, Дятловский район, Гродненская область) в период 3–11 августа 2021 г. проводились производственные испытания опытного образца льноуборочного комбайна «Двина-4М» с роторно-бильным аппаратом. По результатам испытаний получен протокол испытаний и акт о практическом использовании результатов исследований в ОАО «Дворецкий льнозавод».

В 2022 г. результаты исследований рассмотрены и одобрены научным советом РУП «Институт льна» НАН Беларуси и рекомендованы к использованию в льноуборочных комбайнах при уборке льна-долгунца.

В 2022 г. результаты исследований рассмотрены и одобрены научно-техническим советом Центра научно-технических разработок ОАО «Управляющая компания холдинга «Бобруйскагромаш» и приняты к использованию при проектировании новой льноуборочной техники.

Полученные материалы используются в учреждении образования «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия» на кафедре сельскохозяйственных машин при изучении современных технологий и машин для уборки и первичной переработки льна и кафедре механизации растениеводства и практического обучения.

Результаты исследований, а также макетный образец обмолачивающего устройства были представлены на выставке межрегионального бизнес-форума «Кооперация производства, бизнеса и науки» в 2015 г. в г. Могилеве в РУП «Научно-аналитический центр информации, инноваций и трансфера технологий».

Научная новизна исследований подтверждена патентами Республики Беларусь и Российской Федерации на изобретение и полезную модель.

5.4. Экономическая эффективность применения роторно-бильного аппарата на льноуборочном комбайне

Расчет экономической эффективности [37, 198] применения разработанного авторами роторно-бильного аппарата на льноуборочном комбайне производили в сравнении с серийным четырехгребневым очесывающим аппаратом с плоскопараллельным движением гребней, установленным на комбайне «Двина-4М».

При определении экономической эффективности применения новой техники основным критерием является годовой приведенный экономический эффект [94, 52, 83, 84, 194].

Для расчетов использовались данные сравнительных испытаний (см. табл. 5.3). Анализ агротехнических показателей показывает, что состав льновороха, полученного после роторно-бильного аппарата, отличается от состава льновороха, полученного после работы гребневого очесывающего аппарата. На основании этих данных был произведен расчет содержания в ворохе семян и несеменной части. Несеменная часть (путанина, сорняки, примеси, мякина) является балластом при перевозке, сушке и переработке льновороха, на которые нередко тратится значительная часть ресурсов. Расчеты показали, что содержание несеменной части в полученном после льнокомбайна с серийным гребневым очесывающим аппаратом ворохе на 32–57 % больше, чем после льнокомбайна с роторно-бильным аппаратом. Это объясняется особенностями работы очесывающих аппаратов, описанными в подразделе 1.3. Большое содержание в ворохе несеменной части приводит к увеличению его объема, что требует большего количества транспортных средств для его перевозки, увеличивает затраты на его переработку [141].

В настоящее время в Республике Беларусь ворох обмолачивают на оборудованных в поле площадках зерноуборочными комбайнами с подборщиками типа ПЗ-3,4. В связи с этим расчет эффективности применения роторно-бильного аппарата вели по совокупности взаимосвязанных операций:

базовый вариант – тербление льна с очесом и последующим расстилом в ленту агрегатом «Беларус-820» + «Двина-4М» (с серийным гребневым очесывающим аппаратом) + 2ПТС-4, двойной обмолот вороха зерноуборочным комбайном КЗС-1218 + ПЗ-3,4 и транспортировка семян на льнозавод – «Беларус-920» + 2ПТС-4 15 км с последующей сушкой СКУ-10, очисткой и сортировкой семян ПЛ-500;

предлагаемый вариант – тербление льна с очесом и последующим расстилом в ленту агрегатом «Беларус-820» + «Двина-4М» (с роторно-бильным аппаратом) + 2ПТС-4, двойной обмолот вороха зерноуборочным комбайном КЗС-1218 + ПЗ-3,4 и транспортировка семян на льнозавод – «Беларус-920» + 2ПТС-4 15 км с последующей сушкой СКУ-10 и очисткой и сортировкой семян ПЛ-500.

Расчет произвели по ценам льнотресты, льносемян, энергоносителей, сложившимся на рынке в 2025 г.

Анализ качественного состава льняной тресты позволяет классифицировать валовой сбор по номерам (качественным группам) в следующих пропорциях:

– номера 0,50–0,75: группа низкокачественного сырья, доля которого в неблагоприятные агроклиматические периоды достигает 40–65 %. Треста с показателем 0,75 и ниже характеризуется как предельная для эффективной промышленной переработки;

– номер 1,00: наиболее репрезентативная категория, составляющая 25–35 % совокупного объема заготовок. Данный показатель является среднестатистическим для большинства льносеющих хозяйств;

– номер 1,25: промежуточная категория, на долю которой приходится 10–15 % валового сбора;

– номер 1,50: качественное сырье с невысоким удельным весом в структуре отрасли (в среднем 5–8 %). Достижение объема в 10–25 % данной группы характерно исключительно для высокотехнологичных предприятий;

– номера 1,75–2,00 и выше: высококачественная продукция, объем которой в общей структуре заготовок является минимальным и редко превышает 1–3 %.

В Беларуси для повышения качества льняной продукции осуществляются дотации (рис. 5.11).

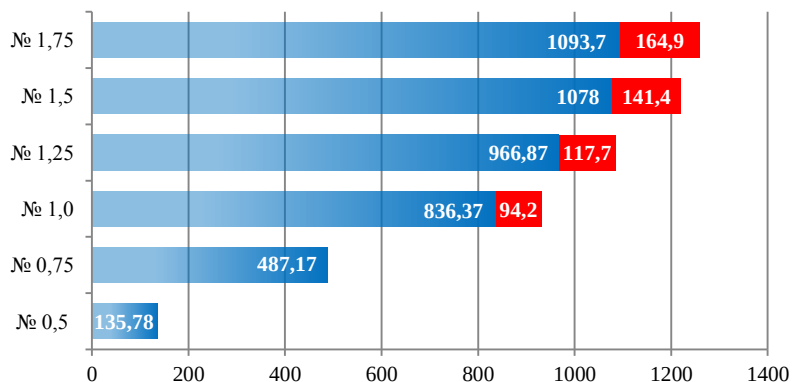


Рис. 5.11. Стоимость 1 т льнотресты с учетом дотации государства, руб.

Исходные данные, принятые для расчета экономической эффективности применения роторно-бильного аппарата согласно данным предприятия и технологической карты на уборку льна-долгунца (прил. 1), представлены в табл. 5.4.

Таблица 5.4. Исходные данные для расчета экономической эффективности

Показатели	Обозначение	Единица измерения	Комплекс машин	
			базовый вариант	предлагаемый вариант
Тарифный фонд	T_{ϕ}	руб.	201,26	189,10
Затраты труда	t	чел.-ч	344,42	324,09
Расход топлива	$N_{\text{дт}}$	кг	6179	4612
Площадь убираемой культуры	S	га	50	50
Урожайность льнотресты	$Y_{\text{тр}}$	т/га	3,17	3,17
Урожайность семян	$Y_{\text{сем}}$	т/га	0,45	0,45
Комплексная цена 1 кг ГСМ	$\Pi_{\text{гл}}$	руб.	2,5	
Средневзвешенная стоимость семян	$\Pi_{\text{сем}}$	руб/т	1576,7	
Стоимость средневзвешенного номера льнотресты	$\Pi_{\text{тр}}$	руб/т	5306,43	

В основе методики расчета эффективности проекта использовали сравнение выручки от реализации дополнительной продукции (семена, треста) и затрат на модернизацию, уборку и доработку продукции.

Годовой экономический эффект от использования роторно-бильного аппарата в расчете на один льноуборочный комбайн «Двина-4М»

$$\Xi = V_{\kappa} \left(D - (\Pi_{\text{уд}}^{\text{предл}} - \Pi_{\text{уд}}^{\text{баз}}) \right), \quad (5.1)$$

где V_{κ} – средняя сезонная выработка льнокомбайна, га ($V_{\kappa} = 50$ га);

D – дополнительная выручка на 1 га посевов льна-долгунца за счет увеличения выхода и роста качества продукции, руб.;

$\Pi_{\text{уд}}^{\text{предл}}$ – удельные приведенные затраты на уборку и доработку продукции комплексом машин по предлагаемому варианту, руб/га;

$\Pi_{\text{уд}}^{\text{баз}}$ – удельные приведенные затраты на уборку и доработку продукции комплексом машин по базовому варианту, руб/га.

$$D = D_{\text{с}} + D_{\text{т}}, \quad (5.2)$$

где $D_{\text{с}}$ – дополнительный доход с одного гектара посевов льна за счет снижения общих потерь семян льна, руб.;

$D_{\text{т}}$ – дополнительный доход с 1 га посевов льна за счет снижения потерь тресты, руб.

$$Д_с = \Delta_с Ц_с , \quad (5.3)$$

где $\Delta_с$ – дополнительный выход семян за счет снижения общих потерь при уборке, т;

$Ц_с$ – стоимость семян льна, руб/т. При уборке льна на посевные цели семена должны быть не ниже второй репродукции, $Ц_с = 1235,31$ руб/т.

$$\Delta_с = \frac{Y_{\text{сем}} (П_с^{\text{баз}} - П_с^{\text{предл}})}{100} , \quad (5.4)$$

где $Y_{\text{сем}}$ – биологическая урожайность семян льна, т/га;

$П_с^{\text{баз}}$ – общие потери семян льна при уборке льноуборочным комбайном с серийным гребневым очесывающим аппаратом, % ($П_с^{\text{баз}} = 3,81$ %);

$П_с^{\text{предл}}$ – общие потери семян льна при уборке льноуборочным комбайном с роторно-бильным аппаратом, % ($П_с^{\text{предл}} = 2,56$ %).

$$Д_т = \Delta_т Ц_т , \quad (5.5)$$

где $\Delta_т$ – дополнительный выход стеблей льна с 1 га посевов за счет снижения их повреждения, т;

$Ц_т$ – стоимость 1 т льняной тресты среднего номера, руб. В расчетах принимали стоимость тресты № 1 $Ц_т = 836,37$ руб/т.

$$\Delta_т = \frac{Y_{\text{тр}} (П_с^{\text{баз}} - П_с^{\text{предл}})}{100} , \quad (5.6)$$

где $Y_{\text{тр}}$ – биологическая урожайность льнотресты, т/га;

$П_с^{\text{баз}}$ – общие потери стеблей льна при уборке льноуборочным комбайном с серийным гребневым очесывающим аппаратом, % ($П_с^{\text{баз}} = 3,0$ %);

$П_с^{\text{предл}}$ – общие потери стеблей льна при уборке льноуборочным комбайном с роторно-бильным аппаратом, % ($П_с^{\text{предл}} = 1,86$ %).

Балансовую стоимость льноуборочного комбайна «Двина-4М» с роторно-бильным аппаратом определяли по формуле

$$K_2 = (K_1 - Ц_{\text{тр}}) + C_{\text{д}} + P_{\text{тз}} + З_3 + P_{\text{оп}} + P_{\text{ох}} + P_{\text{пр}} , \quad (5.7)$$

где K_1 – балансовая стоимость комбайна «Двина-4М» до модернизации, руб.;

$\Pi_{\text{тр}}$ – стоимость рабочего органа гребневого типа, руб. ($\Pi_{\text{тр}} = 3280$ 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 $C_{\text{д}}$ приведена в прил. 2 [101, 161, 117].

Транспортно-заготовительные расходы $P_{\text{тз}}$ определяли в процентах от стоимости покупных материалов и изделий [93]:

$$P_{\text{тз}} = C_{\text{д}} \Pi_{\text{тз}}, \quad (5.8)$$

где $\Pi_{\text{тз}}$ – транспортно-заготовительные расходы, %. Принимали равными 5 %.

Затраты на оплату труда Z_3 при изготовлении деталей установки определяли по формуле

$$Z_3 = OT_{\text{тар}} a_{\text{п}} O_{\text{доп}} O_{\text{отч}}, \quad (5.9)$$

где $OT_{\text{тар}}$ – тарифная оплата труда, руб.;

$a_{\text{п}}$ – коэффициент, учитывающий премии по фонду оплаты труда.

Принимали равным 1,7 [125];

$O_{\text{доп}}$ – коэффициент, учитывающий размеры стимулирующей оплаты труда. Принимали равным 1,9 [92];

$O_{\text{отч}}$ – коэффициент, учитывающий отчисления на социальное страхование. Принимали равным 1,34 [95].

Тарифная оплата труда $OT_{\text{тар}}$ зависит от трудоемкости работ и часовой тарифной ставки соответствующих разрядов персонала:

$$OT_{\text{тар}} = T_{\text{ем}} C_{\text{ч}}, \quad (5.10)$$

где $T_{\text{ем}}$ – трудоемкость работ, необходимых для изготовления устройства, чел.-ч. В соответствии с данными, полученными в результате нормирования труда работников ремонтного звена (бригады), трудоемкость $T_{\text{ем}}$ составила 56 чел.-ч;

$C_{\text{ч}}$ – часовая тарифная ставка, соответствующая разряду рабочего, руб. Часовая тарифная ставка рабочих 5-го разряда на 06.02.2025 составляла 1,7 руб/ч [134, 135].

Общепроизводственные $P_{оп}$ и общехозяйственные $P_{ох}$ расходы определяли в процентах от основной заработной платы на изготовление установки по формулам [94]

$$P_{оп} = 3_3 \Pi_{оп} / 100; \quad (5.11)$$

$$P_{ох} = 3_3 \Pi_{ох} / 100, \quad (5.12)$$

где $\Pi_{оп}$ – общепроизводственные расходы, %. По данным предприятия – 10 %;

$\Pi_{ох}$ – общехозяйственные расходы, %. По данным предприятия – 15 %.

Расчет затрат на содержание основных средств приведен в прил. 3. Затраты на ГСМ определяли по формуле

$$3_{гсм} = N_{дт} \Pi_{гд}, \quad (5.13)$$

где $N_{дт}$ – количество топлива, необходимое на весь объем работ, кг;

$\Pi_{гд}$ – комплексная цена 1 кг ГСМ, руб.

Прочие затраты брали в размере 5 % от суммы всех эксплуатационных отчислений:

$$3_{пр} = (3_{зп} + 3_{гсм} + 3_{эл} + 3_o) 0,05, \quad (5.14)$$

где $3_{зп}$, $3_{гсм}$, $3_{эл}$, 3_o – затраты соответственно на заработную плату, ГСМ, электроэнергию и содержание основных средств, работы и услуги, руб.

Сумму эксплуатационных затрат по сравниваемым вариантам определяли по формуле

$$3_y = 1,05 (3_{зп} + 3_{гсм} + 3_{эл} + 3_o). \quad (5.15)$$

Производительность труда (га/чел.-ч) определяли по формуле

$$ПТ = \frac{S}{t}, \quad (5.16)$$

где S – объем работ, га;

t – затраты труда, чел./-ч.

Трудоемкость (чел.-ч/га) рассчитывали по формуле

$$T = \frac{t}{S}. \quad (5.17)$$

Рост производительности труда (%) определяли по формуле

$$П_{пр} = \frac{ПТ^{предл} - ПТ^{баз}}{ПТ^{баз}} 100. \quad (5.18)$$

Уровень снижения трудоемкости (%) находили по формуле

$$T_{сн} = \frac{T^{баз} - T^{предл}}{T^{баз}} 100. \quad (5.19)$$

Удельные эксплуатационные затраты (руб/га) для технологий определяли по следующей формуле:

$$З_{уд} = \frac{З_{э}}{S}. \quad (5.20)$$

Годовую экономию эксплуатационных затрат (руб.) определяли по формуле

$$\Theta_r = (З_{э}^{баз} - З_{э}^{предл}) Q. \quad (5.21)$$

Приведенные затраты рассчитывали по формуле

$$П = З_{э} + E_n K, \quad (5.22)$$

где E_n – нормативный коэффициент экономической эффективности.

Согласно [36, 194] принимали $E_n = 0,1$;

K – сумма инвестиций, руб.

Удельные приведенные затраты определяли по формуле

$$З_{уд} = \frac{П}{S}. \quad (5.23)$$

Результаты расчета экономической эффективности роторно-бильного аппарата представлены в табл. 5.5.

Таблица 5.5. Техничко-экономические показатели эффективности применения роторно-бильного аппарата

Показатели	Базовая технология	Предлагаемая технология		± предлагаемый вариант к базовому в %	± предлагаемый вариант к базовому (чел.-ч; руб.; га/чел.-ч; руб/га)
Среднегодовая наработка льноуборочно-го комбайна, га	50	50			
Тарифный фонд	201,26	189,10		-6,04	-12,15
Затраты труда,	344,42	324,09		-5,90	-20,34
Расход топлива,	6179	4612		-25,36	-1567,17
Валовой сбор урожая, т/га: льнотресты	3,07	3,11		1,18	0,04
семян льна	0,43	0,44		1,30	0,01
Затраты труда, чел.-ч	344,42	324,09		-5,90	-20,34
Эксплуатационные затраты, руб.	26450,3	20549,94		-22,31	-5900,39
Производительность труда, га/чел.-ч	0,15	0,15		6,27	0,01
Трудоемкость, чел.-ч/га	6,89	6,48		-5,90	-0,41
Рост производительности труда, %		6,27			
Уровень снижения трудоемкости, %		5,90			
Удельные эксплуатационные затраты, руб/га	529,01	411,00		-22,31	-118,01
Дополнительная выручка на 1 га посевов льна-долгунца за счет увеличения выхода и роста качества продукции, руб/га		37,28	53,32		
Годовая экономия, руб.		5900,39			
Приведенные затраты, руб.	29823,2	23306,21		-21,85	-6517,08
Удельные приведенные затраты, руб/га	596,47	466,12		-21,85	-130,34
Годовой экономический эффект, руб.		8381,21	9182,92		
Годовой экономический эффект с 1 га посевов льна, руб/га		167,62	183,66		

Данные, приведенные в табл. 5.5, показывают, что годовой экономический эффект от применения роторно-бильного аппарата составляет 8,3–9,2 тыс. руб., экономический эффект в расчете на 1 га посевов составляет 167,6–183,6 руб. в ценах I квартала 2025 г. Следует отметить существенное снижение затрат труда, а также эксплуатационных затрат: соответственно на 5,9 и 22,3 %.

Выводы

1. Производственные испытания позволили подтвердить рациональные значения параметров роторно-бильного аппарата при обмолае лент льна.

Установлены закономерности изменения чистоты обмолота и степени повреждения стеблей льна от радиального зазора при уборке в фазе желтой и бурой спелости льна при различных окружных скоростях ротора [116].

2. По результатам сравнительных испытаний льноуборочного комбайна с роторно-бильным аппаратом и серийного льноуборочного комбайна «Двина-4М» получены следующие данные [114, 116, 178, 168]:

- повышение производительности переоборудованного комбайна на 8,7 %;
- снижение общих потерь семян с 3,81 до 2,57 %;
- снижение повреждения стеблей льна с 3,0 до 1,86 %;
- уменьшение содержания путанины в льняном ворохе с 37,67 до 19,4 %, снижение его общего объема на 28,5–56,3 % в зависимости от условий уборки.

Объемная масса вороха, получаемого при уборке роторно-бильным аппаратом, увеличивается на 9 % (с 140 до 152,8 кг/м³) [116, 133, 180].

3. Разработана номограмма, которая позволяет с учетом состояния стеблестоя определить параметры и режимы работы льноуборочного комбайна с роторно-бильным аппаратом при условии обеспечения требуемого качества уборки [116].

4. Расчетный годовой экономический эффект от применения роторно-бильного аппарата на площади 50 га составил 8,3–9,2 тыс. руб. в ценах I квартала 2025 г., что в расчете на 1 га составило 167,6–183,6 руб. [116, 132].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что отношение радиуса ротора к радиусу защитного кольца роторно-бильного аппарата является постоянной величиной для принятого значения предельного угла изгиба стеблей льна. Полученный безразмерный показатель $i = R/r$ является параметром подобия обмолачивающих устройств, сконструированных по предлагаемой схеме взаимного расположения рабочих органов. Получены зависимости для определения радиусов ротора и защитного кольца из условия ненаматывания стеблей льна на защитное кольцо с учетом возможного удлинения стеблей, что в совокупности позволило установить минимальные значения радиусов ротора $R = 0,345$ м и защитного кольца $r = 0,120$ м [100, 155].

Получены аналитические зависимости для определения параметров бича как объемной фигуры с учетом радиусов ротора и защитного кольца, ширины торцевой поверхности бича, поперечного угла наклона боковой поверхности бича к плоскости диска, продольного угла наклона боковой поверхности бича, поперечного угла наклона передней поверхности бича и количества установленных на роторе бичей [173].

Получена аналитическая зависимость, устанавливающая связь между кратностью воздействий бичами на фрагмент ленты льна, конструктивными (радиусом ротора, шириной торцевой поверхности бича, количеством установленных на роторе бичей) и кинематическими (окружной скоростью ротора и скоростью движения зажимного транспортера) параметрами роторно-бильного аппарата, что позволило установить минимальные значения окружной скорости ротора $v_p = 7,0$ м/с и ширины торцевой поверхности бича $b_6 = 0,03$ м и рациональное значение количества бичей $k_6 = 6-12$ шт. [173, 175].

2. Получены эмпирические зависимости удлинения Δ_n стеблей и коэффициента к удлинению стеблей в ленте от ширины L_{06} выступающего из зажимного транспортера участка ленты, позволяющие уточнить радиусы ротора и защитного кольца [155, 173].

Получены зависимости чистоты обмолота и степени повреждения стеблей льна от геометрических параметров бича ротора. Установлены рациональные значения поперечного угла боковой поверхности бича $\alpha_6 = 0,47$ рад (27°), поперечного угла передней поверхности бича $\alpha_n = 1,4$ рад (80°), ширины торцевой поверхности бича $b_6 = 0,055$ м [173, 175].

3. Получены математические модели, описывающие процесс обмолота ленты льна роторно-бильным аппаратом и позволяющие определить значения факторов, обеспечивающие наибольшую чистоту обмолота ($\text{Ч}_{\text{об}} = 0,996$) при степени повреждения стеблей не более 3 %: толщины ленты льна $h_{\text{сл}} = 0,041$ м; радиального зазора $\Delta = 0,01$ м; кратности воздействий бичами на фрагмент ленты льна $q = 1,5$ [177].

4. Производственные испытания показали повышение эффективности работы льноуборочного комбайна «Двина-4М» с разработанным роторно-бильным аппаратом по сравнению с серийным гребневым очесывающим аппаратом. Установлено: увеличение производительности переоборудованного льнокомбайна на 8,7 %, снижение общих потерь семян с 3,81 до 2,57 %, снижение повреждения стеблей льна с 3,0 до 1,86 %. Применение роторно-бильного аппарата на льноуборочном комбайне позволило уменьшить содержание путанины в льняном ворохе в среднем на 56,5 %, а общий объем льновороха – на 28,5–56,3 %, при этом объемная масса вороха увеличилась на 9 % (с 140 до 152,8 кг/м³). Расчетный годовой экономический эффект применения роторно-бильного аппарата составил 8,3–9,2 тыс. руб. (167,6–183,6 руб/га) в ценах I квартала 2025 г. [116, 132, 180, 178].

Полученные теоретические и экспериментальные результаты могут быть использованы при разработке машин и оборудования для отделеия семян от стеблей льна.

Результаты исследований рассмотрены и одобрены научным советом РУП «Институт льна» НАН Беларуси и рекомендованы к использованию на льноуборочных комбайнах.

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 орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия» на кафедре сельскохозяйственных машин (акт о внедрении № 735 от 05.01.2021 г., акт о внедрении № 99 от 31.10.2023 г.) и на кафедре механизации растениеводства и практического обучения (акт о внедрении № 100 от 31.10.2023 г.) при изучении современных технологий и машин для уборки и первичной переработки льна.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аверьянова, Г. А. Некоторые закономерности сжатия массы стеблей / Г. А. Аверьянова // Сб. науч. работ аспирантов ЦНИИМЭСХ НЗ СССР. – Минск, 1978. – С. 85–88.
2. Авторское свидетельство 1323021 А1 СССР, МПК А01D 46/00. Устройство для уборки плодов с высокорастущих кустарниковых культур : заявл. 28.02.1986 : опубл. 15.07.1987 / Стороженко Н. Е., Пахно В. С., Барц Р. А., Журавлев А. С.
3. Авторское свидетельство 1679997 А1 СССР, МПК А01D 41/08, А01D 45/30. Машина для очеса растений на корню : заявл. 24.11.1988 : опубл. 30.09.1991 / Кормишников А. Д., Рублев В. И.
4. Авторское свидетельство 398209 СССР. Лыноуборочный комбайн : заявл. 07.04.1972 / Порфирьев С. Г., Мозгунов В. Г., Смирнов В. И. [и др.].
5. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 279 с.
6. Алексеенко, А. С. Досушивание льновороха на двухъярусной карусельной сушилке с рыхляще-перемешивающим устройством : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Алексеенко Александр Сергеевич ; Белорус. гос. с.-х. акад. – Горки, 2009. – 215 л.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Анализ конструкций очесывающих аппаратов / Р. А. Ростовцев, В. Г. Черников, С. В. Соловьев [и др.] // Технические культуры. – 2022. – № 2 (4). – С. 31–35. – DOI 10.54016/SVITOK.2022.67.20.004.
11. Анализ механизированных технологий уборки и первичной переработки льна / В. А. Шаршунов, А. С. Алексеенко, М. В. Цайц [и др.] // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 2. – С. 137–141.
12. 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.
13. Анализ устройств для отделения семян льна от стеблей / В. А. Шаршунов, А. С. Алексеенко, М. В. Цайц [и др.] // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 4. – С. 174–180.
14. Астахов, В. С. Анализ формирования растянутости ленты льна-долгунца при уборке комбайновой технологией / В. С. Астахов, С. В. Курзенков, О. В. Гордеенко // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 2. – С. 180–186.
15. Балдин, А. А. Повышение эффективности работы лыноуборочного комбайна путем пневматического транспортирования вороха : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 /

Болдин Александр Александрович ; Костром. гос. с.-х. акад. – Кострома, 2003. – 205 л.

16. Басова, Н. В. Анализ экономической эффективности льнозавода с производством котонина, пеллет из льнокузры и растительной массы / Н. В. Басова, Э. В. Новиков, А. В. Безбабченко // АПК: экономика, управление. – 2022. – № 4. – С. 57–64. – DOI 10.33305/224-57.

17. Бортник, С. А. Выделение кормовых материалов из отходов льноводства на стационарных молотилках : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Бортник Сергей Александрович ; Белорус. с.-х. акад. – Горки, 1992. – 195 л.

18. 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 л.

19. Вакарчук, С. Анализ очесывающих аппаратов для отделения семян от стеблей льна / С. Вакарчук // Актуальные вопросы развития науки и технологий : сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Караваево, 1–31 марта 2017 г. / Костром. гос. с.-х. акад. – Караваево : КГСХА, 2017. – С. 71–75.

20. Веденяпин, Г. В. Общая методика экспериментальных исследований и обработки опытных данных / Г. В. Веденяпин. – М. : Колос, 1967. – 159 с.

21. Возделывание и уборка льна-долгунца. Типовые технологические процессы : отраслевой регламент. – Минск : Ин-т систем. исслед. в АПК НАН Беларуси, 2019. – 12 с.

22. Вольф, В. Г. Статистическая обработка опытных данных / В. Г. Вольф. – М. : Колос, 1966. – 255 с.

23. 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 л.

24. Гмурман, В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – М. : Высш. шк., 1972. – 358 с.

25. Голуб, И. А. Перспективы возделывания и переработки льна-долгунца в Республике Беларусь / И. А. Голуб // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2017. – № 3. – С. 91–98.

26. Гусаров, В. В. Молотильно-сепарирующее устройство с дифференцированным подбарабашением для интенсификации обмолота и сепарации зерна : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / В. В. Гусаров ; Белорус. гос. с.-х. акад. – Горки, 2016. – 212 л.

27. Гусаров, В. В. Результаты экспериментальных исследований процесса обмолота бильным молотильным аппаратом с дифференцированным подбарабашением / В. В. Гусаров, С. В. Курзенков // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2015. – № 3. – С. 175–181.

28. Диденко, Н. Ф. Параметры и рабочие режимы роторно-планчатого очесывающего аппарата / Н. Ф. Диденко, М. М. Ковалев, В. Г. Черников // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2001. – № 3. – С. 25–28.

29. Домчев, Ю. И. Определение основных конструктивных параметров роторного устройства для обмолота льна / Ю. И. Домчев, М. В. Цайц // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. / Белорус. гос. с.-х. акад. – Горки, 2021. – Вып. 6. – С. 170–175.

30. 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 л.

31. Еругин, А. Ф. Обоснование процессов, средств вымолота и очистки семян льна в селекции и семеноводстве : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / Еругин Александр Федорович. – М., 1991. – 39 с.

32. Зедгеиндзе, И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И. Г. Зедгеиндзе. – М. : Наука, 1976. – 390 с.
33. Зинцов, А. Н. О взаимном расположении ленты растений льна-долгунца и очесывающего аппарата при раздельной уборке / А. Н. Зинцов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2020. – № 3. – С. 75–80.
34. 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 л.
35. Институт льна НАН Беларуси [Сайт] : Институт льна – 2023. – URL: <https://institut-lna.by/index.php/ru/nauka> (дата обращения: 24.05.2025).
36. Испытания сельскохозяйственной техники. Методы определения условий испытаний : ГОСТ 20915–2011. – М. : Стандартинформ, 2013. – 23 с.
37. Испытания сельскохозяйственной техники. Методы экономической оценки. Порядок определения показателей : ТКП 151–2008 (ОСТ 10.2.18–2001). – Минск : Минсельхозпрод, 2001. – 14 с.
38. Испытания сельскохозяйственной техники. Методы эксплуатационно-технологической оценки : ГОСТ 52778–2007. – М. : Стандартинформ, 2008. – 23 с.
39. Испытания сельскохозяйственной техники. Надежность. Сбор и обработка информации : ОСТ 70.2.8–82. – М., 1982. – 245 с.
40. Исследование качества обмолота льнотресты в линии первичной переработки льна / В. Е. Круглень, В. А. Левчук, М. В. Цайц [и др.] // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. – 2014. – № 3. – С. 69–72.
41. Исследование обмолачивающего устройства в линии первичной переработки льна / В. А. Шаршунов, В. Е. Круглень, А. С. Алексеенко, В. А. Левчук [и др.] // Вестні Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сэрыя аграрных навук. – 2015. – № 3. – С. 112–117.
42. Исследование характера деформации и разрушения семенной коробочки льна / В. А. Шаршунов, С. В. Курзенков, М. В. Цайц [и др.] // Вестник Барановичского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2022. – № 1 (11). – С. 96–105.
43. К вопросу оптимизации комплекса технических средств для уборки льна-долгунца / А. Н. Чайчиц, М. В. Цайц, А. В. Кесарев [и др.] // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. / Белорус. гос. с.-х. акад. – Горки, 2025. – С. 189–193.
44. Ковалев, М. М. Исследование сопротивления стеблей льна отгибу / М. М. Ковалев, А. В. Галкин, В. И. Дмитриев // Проблемы повышения технологического качества льна-долгунца : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Торжок, 2–3 нояб. 2004 г. – Торжок : ООО «Фирма Вариант», 2005. – С. 224–229.
45. Ковалев, М. М. Плущильные аппараты льноуборочных машин (конструкция, теория и расчет) : монография / М. М. Ковалев, В. П. Козлов. – Тверь : Твер. обл. кн.-журн. изд-во, 2002. – 208 с.
46. Ковалев, М. М. Ресурсосберегающая технология комбинированной уборки льна-долгунца / М. М. Ковалев, Ю. Ф. Лачуга // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2006. – № 1. – С. 77–80.
47. Ковалев, М. М. Технологии и машины для комбинированной уборки льна долгунца : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / Ковалев Михаил Михайлович ; Всерос. науч.-исслед. ин-т механизации сел. хоз-ва. – Тверь, 2010. – 615 л.
48. Ковалев, Н. Г. Сельскохозяйственные материалы (виды, состав, свойства) : учеб. пособие / Н. Г. Ковалев, Г. А. Хайлис, М. М. Ковалев. – М. : ИК «Родник», 1998. – 208 с.

49. 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.

50. 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 ; Костром. гос. с.-х. акад. – Кострома, 2005. – 141 л.

51. Коротких, Н. В. Экспериментальные исследования очесывающих аппаратов бильного типа льноуборочных машин / Н. В. Коротких, А. А. Чернышков, Р. В. Пытченко // Исследование технологических процессов и рабочих органов машин для уборки лубяных и других технических культур : сб. науч. тр. / ВИСХОМ. – М. : ВИСХОМ, 1987. – С. 60–73.

52. Коцуба, В. И. Очистка семян льна молотилкой-сепаратором с подпружиненными инерционными качающимися решетками : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Коцуба Виктор Иосифович ; Белорус. гос. с.-х. акад. – Горки, 2012. – 215 л.

53. Крагельский, И. В. Трение волокнистых веществ / И. В. Крагельский. – М. : Гизлегпром, 1941. – 127 с.

54. Крагельский, И. В. Физико-механические свойства лубяного сырья / И. В. Крагельский. – М. : Гизлегпром, 1935. – 299 с.

55. Кругленя, В. Е. Анализ применения механизированных технологий уборки льна-долгунца в Республике Беларусь / В. Е. Кругленя, М. В. Цайц, П. Д. Сентюров // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. – 2013. – № 1 (12). – С. 35–41.

56. Кругленя, В. Е. Анализ существующих и перспективных обмолачивающих аппаратов, применяемых при раздельной технологии уборки льна / В. Е. Кругленя, П. Д. Сентюров, М. В. Цайц // Молодежь и инновации – 2013 : материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых : в 4 ч. / Белорус. гос. с.-х. акад. ; гл. ред. А. П. Курдеко. – Горки, 2013. – Ч. 2. – С. 299–302.

57. Кругленя, В. Е. Обоснование кинематических параметров роторного очесывающего аппарата / В. Е. Кругленя, П. Д. Сентюров, М. В. Цайц // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. – 2013. – № 1 (12). – С. 74–78.

58. Кругленя, В. Е. Обоснование технологической схемы льноуборочного комбайна / В. Е. Кругленя, М. В. Цайц // Актуальные проблемы агроинженерии и их инновационные решения : сб. науч. тр. / Рязан. гос. агротехнол. ун-т им. П. А. Костычева ; редкол.: А. Н. Бачурин [и др.]. – Рязань, 2013. – С. 210–214.

59. Кругленя, В. Е. Повышение качества очеса льна-долгунца путем использования роторного очесывающего устройства / В. Е. Кругленя, П. Д. Сентюров, М. В. Цайц // 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 : Вят. гос. с.-х. акад., 2013. – Ч. 2: Технические и экономические науки. – С. 52–54.

60. Кругленя, В. Е. Совершенствование комбайнового способа уборки льна-долгунца в условиях Республики Беларусь / В. Е. Кругленя, М. В. Цайц, П. Д. Сентюров // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения : сб. науч. работ Междунар. науч.-техн. конф. – Брянск : Изд-во Брянской гос. с.-х. акад., 2012. – С. 44–48.

61. Кругленя, В. Е. Устройства для отделения семенных коробочек от стеблей – очесывающие аппараты / В. Е. Кругленя, В. А. Левчук, М. В. Цайц // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения : сб. науч. работ

XXVII Междунар. науч.-техн. конф. – Брянск : Изд-во Брянского ГАУ, 2015. – С. 168–179.

62. Кругленья, В. Е. Устройство для отделения головок льна в линии переработки / В. Е. Кругленья, А. С. Радовский, М. В. Цайц // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. – 2014. – № 3. – С. 41–44.

63. Кругленья, В. Е. Энергосберегающая технология и машины для досушивания и обмолота льновороха / В. Е. Кругленья, А. Н. Кудрявцев, А. С. Алексеев // Актуальные проблемы механизации мелиоративного и водохозяйственного строительства : материалы Респ. науч.-практ. конф., посвящ. 35-летию каф. мелиоративных и строительных машин БГСХА, Горки, 29–30 мая 2002 г. / Белорус. гос. с.-х. акад. ; редкол.: А. Н. Карташевич (отв. ред.) [и др.]. – Горки, 2003. – С. 62–67.

64. Кудрявцев, А. Н. Повышение эффективности обмолота льновороха эластичными вальцами молотилки : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Кудрявцев Александр Николаевич ; Белорус. гос. с.-х. акад. – Горки, 2001. – 182 л.

65. 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.

66. Кукреш, Л. В. Зарубежная практика в сельскохозяйственном производстве республики / Л. В. Кукреш // Вестні Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – 2010. – № 3. – С. 36–42.

67. Курзенков, С. В. Методика расчета параметров слоя стеблей льна в зоне обмолота / С. В. Курзенков, В. А. Левчук, М. В. Цайц // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 1. – С. 154–159.

68. Курзенков, С. В. Моделирование деформации формы коробочки льна при ее сжатии между бичом и декой в процессе обмолота / С. В. Курзенков, В. А. Левчук, М. В. Цайц // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 1. – С. 142–147.

69. 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.

70. 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.

71. Левчук, В. А. Анализ состояния производства льна-долгунца в Республике Беларусь / В. А. Левчук, М. В. Цайц, В. Е. Кругленья // 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. 329–333.

72. Леонов, А. Н. Основы научных исследований в примерах и задачах / А. Н. Леонов, М. М. Дечко, В. Б. Ловкис. – Минск : БГАТУ, 2010. – 136 с.

73. Листопад, И. А. Планирование эксперимента в исследованиях по механизации сельскохозяйственного производства / И. А. Листопад. – М. : Агропромиздат, 1988. – 88 с.

74. Логинов, В. Е. Исследование зажима стеблей льна в зажимном транспортере с плоскими ремнями / В. Е. Логинов // Сб. тр. аспирантов и молодых науч. сотр. / ВНИИ льна. – М. : Моск. рабочий, 1966. – С. 131–137.

75. Логинов, С. И. Коэффициенты трения стеблей льна и некоторых сорняков и их изменение в процессе сушки / С. И. Логинов // Тр. ВНИИ льна. – Торжок, 1972. – Вып. X. – С. 119–123.

76. Луценко, В. М. Определение кинематического коэффициента трения скольжения материалов на наклонной плоскости / В. М. Луценко // Сб. тр. аспирантов и молодых науч. сотр. / ВНИИ льна. – М. : Моск. рабочий, 1970. – Вып. 2. – С. 164–167.
77. 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.
78. Льноуборочные машины / Г. А. Хайлис, Н. Н. Быков, В. Н. Бухаркин [и др.]. – М. : Машиностроение, 1985. – 232 с.
79. Масленников, В. А. Совершенствование технологии с обоснованием параметров и режимов работы аппарата отделения коробочек от стеблей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Масленников Валерий Александрович. – Рязань, 1995. – 20 с.
80. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рошин. – Л. : Колос, 1972. – 168 с.
81. Методика выбора и оптимизации контролируемых параметров технологических процессов : метод. указания, РДМУ 109-77. – М. : Изд-во стандартов, 1978. – 64 с.
82. Методика выбора параметров и режимов работы льноуборочного комбайна с роторно-бильным аппаратом / М. В. Цайц, В. А. Левчук, А. Н. Чайчиц [и др.] // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. / Белорус. гос. с.-х. акад. – Горки, 2025. – С. 184–188.
83. 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. – К. : Урожай, 1986 – 118 с.
84. 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., 1979. – 399 с.
85. Механико-технологические основы совершенствования послеуборочной обработки льновороха на семена / В. А. Шаршунов, В. Е. Кругленья, А. Н. Кудрявцев [и др.]. – Горки: Белорус. гос. с.-х. акад., 2012. – 329 с.
86. Механико-технологичны властивості сільсько-господарських матеріалів : навч. посібник / Г. А. Хайлис, А. Ю. Горбовий, З. О. Гошко [та ін.]. – Луцьк : Ред.-вид. видш ЛДГУ, 1998. – 268 с.
87. 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.
88. Морозов, Ю. Г. Исследование работы льнотеребильных машин : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Морозов Юрий Григорьевич. – М., 1967. – 20 с.
89. Мюллер, А. Г. Исследование технологического процесса работы плющильно-го аппарата на уборке поливной люцерны : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Мюллер Армас Георгиевич ; Казах. гос. с.-х. ин-т. – Алма-Ата, 1965. – 17 с.
90. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения : ГОСТ 27.002–89. – Введ. 01.07.90. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 38 с.
91. 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.
92. Налимов, В. В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М. : Наука, 1965. – 340 с.
93. Новиков, А. И. Эконометрика : учеб. пособие для вузов / А. И. Новиков. – 2-е изд. – М. : ИНФРА-М, 2007. – 144 с.

94. О внесении дополнения в Трудовой кодекс Республики Беларусь : Закон Республики Беларусь от 29 июня 2006 г. № 138-З // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – URL: <http://www.vsavm.by/help5.doc> (дата обращения: 03.02.2025).

95. О внесении изменений в постановление Министерства труда Республики Беларусь от 21 января 2000 г. № 6 : постановление М-ва труда и соцзащиты Респ. Беларусь от 26 сент. 2003 г. № 108 // Белорусский правовой портал. – 2018. – URL: <http://www.pravoby.info/tema/mintruda/page20.htm> (дата обращения: 08.01.2025).

96. 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. / Белорус. гос. с.-х. акад. – Горки, 2024. – С. 137–140.

97. Обоснование конструктивных параметров барабанно-планчатого устройства для очеса стеблей льна / В. Е. Круглень, М. В. Цайц, В. А. Левчук [и др.] // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. – 2014. – № 3. – С. 38–41.

98. 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.

99. 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.

100. Обоснование рациональной схемы расположения элементов роторного устройства для отделения семенной части от стеблей льна и конструктивных его параметров / С. В. Курзенков, М. В. Симонов, М. В. Цайц [и др.] // Вестник Нижегородского государственного инженерно-экономического института. – 2022. – № 10 (137). – С. 7–19. – DOI 10.24412/2227-9407-2022-10-7-19.

101. Общетехнический справочник / Э. В. Анисимов, В. П. Законников, А. Н. Малов [и др.] ; под ред. А. Н. Малова. – М. : Машиностроение, 1971. – 464 с.

102. Определение параметра кратности воздействия бичей роторно-бильного аппарата на стебли льна / В. А. Шаршунов, М. В. Цайц, В. И. Коцуба [и др.] // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2025. – № 3. – С. 99–104.

103. Основы расчета рабочих органов машин и оборудования для производства семян льна / В. А. Шаршунов, В. Е. Круглень, А. Н. Кудрявцев [и др.]. – Горки : Белорус. гос. с.-х. акад., 2016. – 156 с.

104. Оценка эффективности уборки урожая льносемян по заводской технологии / В. Н. Перевозников, А. Н. Чайчиц, В. Е. Круглень [и др.] // Технологические аспекты возделывания сельскохозяйственных культур : сб. ст. по материалам XX Междунар. науч.-практ. конф., Горки, 22–23 июня 2022 г. / Белорус. гос. с.-х. акад. – Горки, 2022. – С. 146–149.

105. Патент 10253 Респ. Беларусь, МПК C02F 1/32 (2006.01). Устройство для обеззараживания воды ультрафиолетовым излучением : № u20130685 : заявлено 09.07.2013 : опубл. 30.08.2014 / Козлов А. С., Новиков А. И., Семенов А. П.; заявитель и патентообладатель УП «Акватехнология». – 2 с.

106. Патент 2004954 Российская Федерация, МПК H01L 33/50 (2009.01). Способ изготовления светодиода и устройство для его осуществления : № 2010116236/07 : заявл. 21.04.2010 : опубл. 27.04.2012 / Чубков Р. В., Федина Н. В., Захаров А. И., Гулин А. В., Казак О. В., Попович А. Ф. ; патентообладатель Федер. гос. бюджет. учрежд. науки «Физический ин-т им. П. Н. Лебедева» Рос. акад. наук (ФИАН). – Бюл. № 12. – 11 с.

107. Патент 2053630 Российская Федерация, МПК G06F 15/363. Устройство для

формирования обучающей выборки нейронной сети : № 93056228/09 : заявл. 09.11.1993 : опубл. 10.02.1996 / Головкин В. А., Красненков В. В., Тарасов А. С. ; заявитель и патентообладатель НИИ многопроцессорных вычислительных систем при ТРТУ. – Бюл. № 4. – 6 с.

108. Патент 21293 Респ. Беларусь, МПК C22C 38/02 (2006.01). Сталь конструкционная низколегированная : № a20140013 : заявл. 03.01.2014 : опубл. 30.08.2017 / Жук А. П., Комлев А. С., Михневич В. С. ; заявитель и патентообладатель Беларус. нац. техн. ун-т. – Бюл. № 4. – 6 с.

109. Патент 2522 Респ. Беларусь, МПК G01N 33/49. Устройство для исследования реологических свойств структурированных дисперсных систем : № u20050154 : заявл. 21.06.2005 : опубл. 28.02.2006 / Савченко А. В., Богдан С. В. ; заявитель и патентообладатель Беларус. гос. ун-т. – 2 с.

110. Патент 2788696 Российская Федерация, МПК G06N 3/04 (2023.01). Способ обработки изображений с использованием сверточной нейронной сети и устройство для его реализации : № 2022111525 : заявл. 28.04.2022 : опубл. 24.01.2023 / Петров И. А., Сидорова Е. В. ; патентообладатель АО «Науч.-исслед. ин-т интелект. систем». – URL: https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2788696&TypeFile=html (дата обращения: 01.10.2025).

111. Патент 7947 Респ. Беларусь, МПК A61B 5/00 (2006.01). Устройство для регистрации параметров жизнедеятельности человека в условиях физической нагрузки : № u20110282 : заявл. 16.03.2011 : опубл. 28.02.2012 / Иванов С. В., Малашко П. М. ; заявитель и патентообладатель Беларус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – 2 с.

112. Патент 9863 Респ. Беларусь, МПК B25J 9/00 (2006.01). Манипуляционное устройство (варианты) : № u20130103 : заявл. 01.02.2013 : опубл. 28.02.2014 / Карпович С. В., Костюк Д. А. ; заявитель и патентообладатель Беларус. нац. техн. ун-т. – 3 с.

113. Перевозников, В. Н. Исследование процесса отделения семян в линии первичной переработки льна / В. Н. Перевозников, В. А. Левчук, В. И. Коцуба // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра. – Гомель : Науч.-техн. центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш», 2022. – С. 219–223.

114. 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.

115. Писарчик, А. В. Комплексная механизация возделывания и уборки льна / А. В. Писарчик, В. А. Бакунович, А. И. Тарасевич. – Минск : Ураджай, 1983. – 127 с.

116. Повышение эффективности получения семян льна-долгунца при комбайновой уборке / В. А. Шаршунов, М. В. Цайц, С. В. Курзенков [и др.] // Вестник Нижегородского государственного инженерно-экономического института. – 2023. – № 7 (146). – С. 44–59. – DOI 10.24412/2227-9407-2023-7-44-59.

117. Повышение эффективности уборки льна-долгунца методом обмола 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.

118. Полезная модель BY 7742 U, МПК A01D 45/06 (2006.01). Роторное устройство для отделения семенных коробочек от стеблей : № U 20110245 : заявлено 04.04.2011 : опубл. 30.12.2011 / Сентюров П. Д., Сентюров А. Д., Алексеенко А. С., Коцуба В. И., Кругленя В. Е., Цайц М. В. ; заявитель Беларус. гос. с.-х. акад. – 3 с.

119. Получение семян в линии первичной переработки льна / В. А. Левчук, В. А. Шаршунов, М. В. Цайц [и др.]. – Горки : Беларус. гос. с.-х. акад., 2025. – 192 с.

120. Понталев, О. В. Обработка смеси фуражного зерна и пудрета экспандером с активной матрицей : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Понталев Олег Владимирович ; Беларус. гос. с.-х. акад. – Горки, 2007. – 231 л.

121. Порфирьев, С. Г. Закономерность созревания льна-долгунца и сроки его уборки / С. Г. Порфирьев, В. Г. Игнатов // Повышение производительности и качества работы с.-х. машин в условиях НЗ РСФР : тр. / ВСХИЗО. – М., 1986. – Вып. 204. – С. 76–83.

122. Предпосылки исследования свойств ворса барабана роторно-бильного аппарата при уборке льна / М. В. Цайц, И. А. Гращенко, И. И. Сергеева [и др.] // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2025. – № 4. – С. 85–90.

123. Прибытков, П. Ф. Экспериментальные исследования процесса очеса льна у комбайна ЛК-7 : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Прибытков Павел Федорович. – Л. : Пущкин, 1952. – 177 с.

124. 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. Останина. – Минск : Выш. шк., 1989. – 218 с.

125. Примерное Положение об оплате труда работников: 2007–2023 // Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь. – URL: <https://www.mshp.gov.by/information/zarplata/commercial/f2110042179b6424.html> (дата обращения: 07.02.2025).

126. Пугачев, А. Н. Влияние повышения производительности молотильного аппарата на механические повреждения зерна пшеницы и ржи / А. Н. Пугачев // Тр. Челябин.-та механизации и электрификации сел. хоз.-ва. – Челябинск, 1973. – Вып. 62. – С. 19–24.

127. Пучков, Е. М. Технология производства сорбентов из костры масличного льна / Е. М. Пучков, А. В. Галкин, И. В. Ушаповский // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2019. – Т. 20, № 5. – С. 517–525. – DOI 10.30766/2072-9081.2019.20.5.517-525.

128. Радченко, Г. Е. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий протекания процесса / Г. Е. Радченко. – Горки : Беларус. с.-х. акад., 1978. – 69 с.

129. Разработка и обоснование рациональной конструкции устройства для очеса коробочек льна / В. Е. Круглень, А. С. Алексеенко, М. В. Цайц [и др.] // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения : сб. науч. работ XXVII Междунар. науч.-техн. конф. – Брянск : Изд-во Брянского ГАУ, 2015. – С. 78–82.

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 ; Беларус. гос. с.-х. акад. – Горки, 2006. – 176 л.

131. Результаты отсеивающего эксперимента по обмолоту лент льнотресты в линии первичной переработки устройством с эластичным рабочим органом / В. А. Левчук, М. В. Симонов, С. В. Курзенков, М. В. Цайц // Вестник Нижегородского государственного инженерно-экономического института. – 2022. – № 12 (139). – С. 18–30. – DOI 10.24412/2227-9407-2022-12-18-30.

132. Результаты производственных испытаний и экономическая оценка применения роторного бильно-выссывающего 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. – URL: <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2023-61-4-324-336> (дата обращения: 07.02.2025).

133. Результаты производственных испытаний применения роторно-бильного аппарата в прицепном льнокомбайне / М. В. Цайц, В. А. Левчук, В. Г. Ковалев [и др.] // Вест-

ник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2025. – № 1. – С. 134–139.

134. Рекомендации по материальному стимулированию работников, занятых на возделывании и уборке, переработке льна-долгунца: 2007–2025 // Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь. – URL: <https://www.mshp.gov.by/information/zarplata/commercial/e5f949211c0e9993.html> (дата обращения 07.02.2025).

135. Рекомендации по тарификации механизированных и ручных работ в сельском хозяйстве: 2007–2023 // Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь. – URL: <https://www.mshp.gov.by/information/zarplata/commercial/f09549959cea93d0.html> (дата обращения: 07.02.2025).

136. Родионов, Л. В. Разработка процессов и рабочих органов машин для раздельной уборки льна: дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / Родионов Леонид Васильевич ; ВНИИ механизации сел. хоз-ва. – Тверь, 1991. – 445 л.

137. Родионов, Л. В. Способы и средства для очеса стеблей льна / Л. В. Родионов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1980. – № 11. – С. 22–26.

138. Родионов, Л. В. Сравнительный анализ очесывающих устройств поли- и монощелевого типа / Л. В. Родионов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1986. – № 5. – С. 31–33.

139. Ростовцев, Р. А. Повышение качества очеса стеблей льна путем совершенствования технологии и оптимизации параметров и режимов работы очесывающего аппарата : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Ростовцев Роман Анатольевич. – Санкт-Петербург – Павловск, 2003. – 19 с.

140. Ростовцев, Р. А. Лабораторные исследования рабочих органов динамически активного очесывающего аппарата монощелевого типа / Р. А. Ростовцев // Проблемы социально-экономического развития села Тверской области : сб. науч. тр. – Тверь : ТГСХА, 2003. – С. 209–212.

141. Ростовцев, Р. А. Повышение эффективности уборки льна-долгунца путем разработки технологических процессов и технических средств для их осуществления : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / Ростовцев Роман Анатольевич ; Сев.-Зап. науч.-исслед. ин-т механизации и электрификации сел. хоз-ва Рос. акад. с.-х. наук. – Санкт-Петербург – Павловск, 2010. – 444 л.

142. Ростовцев, Р. А. Расчет частоты вращения барабана динамически активного очесывающего аппарата монощелевого типа / Р. А. Ростовцев // Достижения науки и техники в АПК. – 2003. – № 4. – С. 25–27.

143. 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.

144. Рябцев, В. Н. Исследование вопросов комплексной механизации уборки льна-долгунца с использованием льноуборочных агрегатов на повышенных скоростях : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Рябцев Валерий Николаевич ; Белорус. науч.-исслед. ин-т земледелия. – Минск, 1962. – 26 с.

145. Савченко, И. А. Обеспеченность льносеющих хозяйств Беларуси техническими средствами уборки льна-долгунца / И. А. Савченко, Д. Ю. Симоненко, Р. П. Козлов // Актуальные вопросы механизации сельскохозяйственного производства : материалы междунар. науч. конф. студентов и магистрантов, Горки, 28–29 марта 2024 г. / Белорус. гос. с.-х. акад. – Горки, 2024. – С. 34–37.

146. Сельскохозяйственная техника. Испытания сельскохозяйственной техники, машин и оборудования для переработки сельскохозяйственного сырья. Техническая экспертиза : ТКП 194–2009 (02150). – Минск : Минсельхозпрод, 2010. – 32 с.

147. Сентюров, Н. С. Состояние уборки и переработки льна-долгунца в Республике Беларусь и перспективы развития / Н. С. Сентюров, М. В. Цайц // Тракторы, автомобили и машины для природообустройства : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию кафедры мелиоративных и строительных машин Белорус. гос. с.-х. акад. / Белорус. гос. с.-х. акад. ; редкол.: А. Н. Карташевич (гл. ред.) [и др.]. – Горки, 2018. – С. 95–98.

148. Сентюров, П. Д. Повышение эффективности технологии уборки льна-долгунца путем использования роторного устройства для очеса головок / П. Д. Сентюров, М. В. Цайц, В. Е. Круглень // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения : сб. науч. работ Междунар. науч.-техн. конф. – Брянск : Изд-во Брянской гос. с.-х. акад., 2012. – С. 33–37.

149. Совершенствование процесса переработки льновороха на стационарном пункте модернизированными машинами и оборудованием / В. Е. Круглень, А. Н. Кудрявцев, А. С. Алексеенко, В. И. Коцуба // Опыт, проблемы и перспективы развития технического сервиса сельскохозяйственной техники : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 6–8 апр. 2004 г. : в 3 ч. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т ; редкол.: И. Н. Шило [и др.]. – Минск, 2006. – Ч. 2. – С. 143–149.

150. Соснов, В. И. Устойчивость комлевой части стеблей льняной тресты при продольном изгибе / В. И. Соснов // Тр. ВНИИ льна. – Торжок, 1974. – Вып. XII. – С. 190–195.

151. Субботин, Александр. «Льняная отрасль должна не просто работать, а стать экономически более эффективной и состоятельной» / Александр Субботин // Витебские вести. – 2021. – URL: <https://vitvesti.by/index.php/economy/aleksandru-subbotin-linianaia-otrasl-dolzha-ne-prosto-rabotat-a-stat-ekonomicheski-bolee-effektivnoi-i-sostoiatelnoi.html> (дата обращения: 10.10.2025).

152. Тавгень, Е. Мировой рынок льняной продукции: обзор / Е. Тавгень, А. Вразлица // Наука и инновации. – 2021. – № 8 (222). – С. 61–67.

153. Татарницев, К. В. Повышение эффективности технологии уборки льна-долгунца путем оптимизации параметров и режимов работы очесывающего аппарата : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Татарницев Константин Вячеславович ; Сев.-Зап. науч.-исслед. ин-т механизации и электрификации сел. хоз-ва. – Тверь – Сахарово, 2008. – 21 с.

154. Татарницев, К. В. Повышение эффективности технологии уборки льна-долгунца путем оптимизации параметров и режимов работы очесывающего аппарата : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Татарницев Константин Вячеславович ; Сев.-Зап. науч.-исслед. ин-т механизации и электрификации сел. хоз-ва. – Тверь – Сахарово, 2008. – 149 л.

155. Теоретическое обоснование радиусов ротора и защитного кольца роторного билльно-вычесывающего устройства / В. А. Шаршунов, А. Н. Карташевич, М. В. Цайц [и др.] // Агропанорама. – 2023. – № 3 (149). – С. 14–21.

156. Техника сельскохозяйственная. Комбайны и машины для уборки льна. Методы испытаний : ГОСТ 33734–2016. – М. : Стандартиформ, 2017. – 49 с.

157. Технические средства для обмола семян коробочек льнотресты в заводских условиях / В. Г. Черников, В. Ю. Романенко, С. В. Соловьев [и др.] // Ресурсосберегающие технологии и технические средства производства и переработки сельскохозяйственной продукции : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 75-летию со дня рожд. д-ра с.-х. наук, проф., чл.-кор. РАН Горбачева Ивана Васильевича, Тверь, 20 сент. 2022 г. – Тверь: ФГБНУ «Фед. науч. центр лубяных культур», 2022. – С. 124–131.

158. Технические средства для уборки льна-долгунца в разрезе перспектив развития льноводческой отрасли / В. В. Азаренко, В. С. Астахов, С. В. Курзенков, О. В. Гордеенко // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2022. – № 3. – С. 136–139.
159. Улахович, А. Е. Обмолот семенного вороха клевера вальцовым аппаратом с эластичными рабочими поверхностями : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Улахович Александр Егорович ; Белорус. с.-х. акад. – Горки, 1989. – 214 л.
160. Усевич, И. Г. Исследование работы теребильных аппаратов льноуборочных машин : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Усевич Иван Григорьевич. – Великие Луки, 1972. – 127 с.
161. Фадеев, Д. Г. Совершенствование процесса очеса стеблей в льноуборочном комбайне : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Фадеев Денис Геннадьевич ; Моск. с.-х. акад. им. К. А. Тимирязева. – Тверь, 2017. – 236 с.
162. Физико-механические свойства растений, почв и удобрений / Б. А. Воронюк, А. И. Пьянков, Л. В. Мальцева [и др.]. – М. : Колос, 1970. – 422 с.
163. Хайлис, Г. А. Механика растительных материалов / Г. А. Хайлис. – К., 1994. – 332 с.
164. Хайлис, Г. А. Механика растительных материалов / Г. А. Хайлис. – К. : УА-АН, 2002. – С. 160–167.
165. Хайлис, Г. А. Теория и расчет льноуборочных машин / Г. А. Хайлис // Тр. Веліколуцк. с.-х. ін-та. – Елгава, 1973. – Вып. XXVI. – 334 с.
166. Хайлис, Г. А. Элементы теории и расчет льноуборочных машин / Г. А. Хайлис. – М. : Машгиз, 1963. – 149 с.
167. Цайц, М. В. Обзор и анализ технических средств для уборки льна-долгунца / М. В. Цайц, В. А. Левчук, Д. Ю. Симоненко // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. – 2025. – № 1 (24). – С. 334–340.
168. Цайц, М. В. Отделение семенной части от стеблей льна роторно-бильным аппаратом при комбайновой уборке : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Цайц Максим Валерьевич ; Белорус. гос. с.-х. акад. – Горки, 2024. – 239 с.
169. Цайц, М. В. Результаты отсеивающего эксперимента по обмолоту лент льна-долгунца роторно-бильным аппаратом льнокомбайна / М. В. Цайц, В. А. Левчук, И. И. Сергеева // Международный журнал аграрной науки и образования. – 2024. – № 2 (2). – С. 75–83.
170. Цайц, М. В. Анализ состояния уборки льна-долгунца в Республике Беларусь / М. В. Цайц, А. С. Алексеев // Аграрная наука – сельскому хозяйству : сб. материалов XIII Междунар. науч.-практ. конф., 15–16 февр. 2018 г. : в 2 кн. – Барнаул : РИО Алт. ГАУ, 2018. – Кн. 2. – С. 202–203.
171. Цайц, М. В. Исследование изгибающего воздействия роторного бильно-вычесывающего устройства на ленту льна / М. В. Цайц, Ю. И. Домчев // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. / Белорус. гос. с.-х. акад. – Горки, 2021. – Вып. 6. – С. 164–169.
172. Цайц, М. В. К вопросу сообразности применения растянутости ленты льна как фактора при исследовании обмолачивающих и очесывающих устройств / М. В. Цайц // Ресурсосберегающие технологии в агропромышленном комплексе России : материалы III Междунар. науч. конф. / Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2022. – С. 163–167.
173. Цайц, М. В. Обоснование параметров и режимов работы роторного бильно-вычесывающего устройства для обмолота льна / М. В. Цайц // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2023. – № 2. – С. 167–172.
174. Цайц, М. В. Определение усилия разрушения коробочек льна-долгунца /

М. В. Цайц // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 4. – С. 93–99.

175. Цайц, М. В. Поисковые эксперименты процесса обмолота лент льна роторным бильно-вычесывающим устройством / М. В. Цайц // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2023. – № 1. – С. 156–164.

176. Цайц, М. В. Результаты теоретических исследований роторного очесывающего устройства / М. В. Цайц, В. А. Левчук // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых / М-во обр. Респ. Беларусь, М-во обр. и науки Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т ; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2016. – С. 36.

177. Цайц, М. В. Результаты экспериментальных исследований процесса обмолота лент льна роторным бильно-вычесывающим устройством / М. В. Цайц // Вестник Нижегородского государственного инженерно-экономического института. – 2023. – № 2 (141). – С. 19–34. – DOI 10.24412/2227-9407-2023-2-19-34.

178. Цайц, М. В. Роторное бильно-вычесывающее устройство для отделения семян от стеблей льна / М. В. Цайц // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра : сб. науч. ст. 6-й Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель : Науч.-техн. центр комбайностроения ОАО «Гомсельмаш», 2022. – С. 227–232.

179. Цайц, М. В. Совершенствование производства семян льна-долгунца в Республике Беларусь // Молодежь и инновации – 2011 : материалы Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых : в 4 ч. / Белорус. гос. с.-х. акад. ; гл. ред. А. П. Курдеко. – Горки, 2011. – Ч. 2. – С. 46–48.

180. Цайц, М. В. Сравнительный анализ размерно-массовых характеристик вороха льна-долгунца / М. В. Цайц // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. / Белорус. гос. с.-х. акад. – Горки, 2022. – Вып. 7. – С. 285–289.

181. Цайц, М. В. Теоретическое обоснование молотильного зазора устройства для обмолота льна / М. В. Цайц, С. В. Курзенков, В. А. Левчук // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. – 2022. – № 1 (21). – С. 213–218.

182. Цайц, М. В. Факторы и критерии оптимизации устройств для отделения семян от стеблей льна / М. В. Цайц // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. / Белорус. гос. с.-х. акад. – Горки, 2023. – Вып. 8. – С. 188–192.

183. Чайчиц, А. Н. Определение растянутости ленты льна: теоретические аспекты / А. Н. Чайчиц, М. В. Цайц, Ю. И. Домчев // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства : сб. науч. тр. / Белорус. гос. с.-х. акад. – Горки, 2022. – Вып. 7. – С. 290–293.

184. Черников, В. Г. Конструкции очесывающих аппаратов и их анализ / В. Г. Черников, Р. А. Ростовцев, К. В. Татарнищев // Наука и производство – пути развития и ожидаемые результаты : тез. докл. XI Междунар. науч.-практ. конф., Вологда, 11–13 марта 2008 г. – Вологда, 2008. – С. 260–268.

185. Черников, В. Г. Машины для уборки льна (конструкция, теория и расчет) : монография / В. Г. Черников. – М. : ИНФРА-М, 1999. – 209 с.

186. Черников, В. Г. Очесывающие аппараты льноуборочных машин (теория, конструкция, расчет) : монография / В. Г. Черников. – М. : ВИМ, 2004. – 240 с.

187. Черников, В. Г. Потери семян в зависимости от точности подачи ленты льна в камеру очеса / В. Г. Черников // Достижения науки и техники АПК. – 2007. – № 4. – С. 14–15.

188. Черников, В. Г. Статистические характеристики высоты стеблестоя и зоны расположения семенных коробочек в нем / В. Г. Черников // *Достижения науки и техники АПК*. – 2006. – № 4. – С. 18–19.
189. Черников, В. Г. Технологии и технические средства комбайнового и раздельного способов уборки льна : дис. в виде науч. докл. ... д-ра техн. наук : 05.20.01 / Черников Виктор Григорьевич. – Тверь, 1999. – 85 с.
190. Чернышков, А. А. Обоснование схемы и основных параметров очесывающего аппарата для отделения семенных коробочек льна : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Чернышков Алексей Алексеевич. – М. : ВИСХОМ, 1987. – 142 л.
191. Шаршунов, В. А. Технологические свойства вороха льнокустры как объекта переработки прессованием / В. А. Шаршунов, Н. С. Сентюров, М. В. Цайц // *Вестник Барановичского государственного университета. Серия: Технические науки*. – 2025. – № 2 (18). – С. 82–86.
192. Шаршунов, В. А. Анализ обеспеченности льносеющих хозяйств Республики Беларусь техническими средствами для уборки льна-долгунца / В. А. Шаршунов, В. А. Кожановский, М. В. Цайц // *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2022. – № 4. – С. 150–156.
193. Шаршунов, В. А. Состояние льноводческой отрасли Республики Беларусь и пути повышения ее эффективности / В. А. Шаршунов, А. С. Алексеев, М. В. Цайц // *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2019. – № 2. – С. 267–271.
194. Шейченко, В. О. Обґрунтування параметрів та режиму роботи льнообрального апарату з поперечними рівчакми : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11 / Шейченко Віктор Олександрович. – Дослідницьке, 2006. – 126 с.
195. Шик, А. В. Определение удлинения стеблей в ленте льна при отделении семенной части урожая / А. В. Шик, А. А. Булаткин // *Актуальные вопросы механизации сельскохозяйственного производства : материалы междунар. науч. конф. студентов и магистрантов, Горки, 28–29 марта 2024 г.* / Белорус. гос. с.-х. акад. – Горки, 2024. – С. 42–44.
196. Шкляров, М. И. Разработка роторного очесывающе-транспортирующего устройства / М. И. Шкляров, 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, ИПК «Нива», 2016. – Ч. III. – С. 337–339.
197. Шлыков, М. И. Лёноуборочный комбайн (теория, расчет, конструкция) / М. И. Шлыков. – М. : Машгиз, 1949. – 300 с.
198. Шпилько, А. В. Экономическая эффективность механизации сельскохозяйственного производства / А. В. Шпилько, В. И. Драганцев, Н. М. Морозов. – М. : Высш. шк., 2001. – 346 с.
199. Шрамко, П. К. Изыскание способов снижения выхода путанины в работе очесывающего аппарата в системе льнокомбайна ЛК-7 : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Шрамко Петр Климентьевич ; Ленингр. с.-х. ин-т. – Л. : Пушкин, 1955. – 167 л.
200. Экономическая эффективность механизации сельскохозяйственного производства / А. В. Шпилько, В. И. Драгайцев, Н. М. Морозов [и др.]. – М., 2001. – 345 с.
201. Эндрюкайтис, А. И. Исследование технологического процесса обмолота льняного вороха : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Эндрюкайтис Альгимантас-Ионас Ионас. – Каунас, 1975. – 40 с.
202. Tensile properties of flax fibers / C. Baley [et al.] // *Handbook of properties of textile and technical fibres*. – Woodhead Publishing, 2018. – P. 275–300.

203. Characteristics of Hermès flax fibres as a function of their location in the stem and properties of the derived unidirectional composites / K. Charlet [et al.] // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2007. – T. 38, № 8. – P. 1912–1921.
204. Dudarev, I. A review of fibre flax harvesting: conditions, technologies, processes and machines / I. Dudarev // *Journal of Natural Fibers*. – 2022. – T. 19, № 12. – P. 4496–4508.
205. El-Ashry, A. S. Design and construction of a flax rubbing deseeder / A. S. El-Ashry // *Misr Journal of Agricultural Engineering*. – 2011. – T. 28, № 2. – P. 250–265.
206. Limont, A. S. Morphological indices of fiber flax stalks and machines for its harvesting / A. S. Limont // *Europäische Fachhochschule*. – 2015. – № 1. – P. 79–84.
207. Research on new technology of fiber flax harvesting / J. Mańkowski [et al.] // *Journal of Natural Fibers*. – 2018. – T. 15, № 1. – C. 53–61.
208. Multi-scale morphological characterisation of flax: From the stem to the fibrils / K. Charlet [et al.] // *Carbohydrate Polymers*. – 2010. – T. 8, № 1. – P. 54–61.
209. Nilsson, D. Harvesting and handling of flax for the production of short fibres under Swedish conditions / D. Nilsson // *A literature review*. – 2003. – P. 32.
210. Harvesting strategies of bast fiber crops in Europe and in China / L. Pari [et al.] // *Industrial crops and products*. – 2015. – T. 68. – P. 90–96.
211. Exploring the link between flexural behaviour of hemp and flax stems and fibre stiffness / S. Réquillé [et al.] // *Industrial crops and products*. – 2018. – T. 113. – P. 179–186.
212. Studies on flax threshing using a local paddy thresher / A. A. El-Beheri [et al.] // *Egyptian Journal of Agricultural Research*. – 2000. – T. 78, № 1. – P. 489–497.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Технологическая карта уборки для базового и предлагаемого вариантов																																		
Площадь по сельскохозяйственной культуре – 50 га.																																		
Урожайность:																																		
льнотресты – 31,7 ц/га;																																		
семян льна – 4,5 ц/га.																																		
Расстояние до льнозавода – 15 км.																																		
№	Наименование работ с указанием количественных показателей	Шифр работ	Объем работ	Единица измерения	Состав МТП		Плановые сроки выполнения работ, дней	Количество обслуживаемых площадей, га	Производительность, га/ч	Количество пересевов, га/т	Количество высеваемых семян, кг/га	Затраты труда, чел.-ч	Расход топлива, л/га	Тарифный разряд	Оплата труда, руб.					Требуется					Электроснабжение, кВт.ч									
					Эксплуатационное средство	Сельскохозяйственная машина									За норму выработки	За весь объем работ	Итого	МТЗ	Других рабочих, чел.	Время, дней	Кассетарных дисков													
																						механизаторов	других рабочих	всего		на единицу объема работ, кг/т	механизаторов	других рабочих	всего					
1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	
Базовый вариант																																		
1	Терпение льна с отсечом и последующим расстелом в ленту. Продолжительность уборки 8...10 дней	Л1	50	га	«Беларус-820»	Длин-4М + 2ПТС-4	7	15	1	1	0,50	3,47	52,03	14,41	100,90	100,9	201,80	9,5	475	7	5	4,64	3,65	66,88	52,6124	119,50	1	1	1	14,41	17,0	17		
2	Обмолот комбайном	Л2	90	т	КЗС-1218 «Палессе GS12»	ПЗ-3,4	7	10	1	1	24	168	1680	0,54	3,75	3,8	7,50	22,5	202,5	7	5	4,64	3,65	2,49	1,95536	4,44	1	1	1	0,54	1,0	3		
3	Повторный обмолот комбайном	Л3	69,75	т	КЗС-1218 «Палессе GS12»	ПЗ-3,4	7	10	1	1	24	168	1680	0,42	2,91	2,9	5,81	22,5	156,9	7	6	4,64	4,01	1,93	1,66487	3,59	1	1	1	0,42	1,0	3		
4	Транспортировка семян льна к сушильному пункту, 15 км	Л4	324,6	т.км	«Беларус-920»	2ПТС-4	7	10	1	0	8	56	560	5,80	40,58	0,0	40,58	6,5	2110	5	6	3,95	4,01	22,90	0	22,90	1	1	0	5,80	7,0	7		
5	Сушка семян льна (20 кВт)	Л5	21,64	т		СКУ-10	7	8	1	2	14	112	1,55	0,00	10,8	10,82	0	6	6	4,34	4,01	0,00	6,19889	6,20	1	0	1	1,55	2,0	2	216,4			
6	Очистка и сортировка семян (13 кВт)	Л6	19,48	т		ПШ-500	7	8	2	0,5	3,5	28	5,57	0,00	77,9	77,91	0	7	6	4,64	4,01	0,00	44,632	44,63	1	0	2	5,57	7,0	7	506,4			
Итого															148,1	196,3	344,4	6179					94,19	107,06	201,26				28,3	35,0	722,8			
Предлагаемый вариант																																		
1	Терпение льна с отсечом и последующим расстелом в ленту. Продолжительность уборки 8...10 дней	Л1	50	га	«Беларус-820»	Длин-4Мп + 2ПТС-4	7	15	1	1	0,54	3,77	56,56	13,26	92,82	92,8	185,64	9,2	460	7	5	4,64	3,65	61,53	48,3981	109,92	1	1	1	13,26	15	15		
2	Обмолот комбайном	Л2	54,9	т	КЗС-1218 «Палессе GS12»	ПЗ-3,4	7	10	1	1	24	168	1680	0,33	2,29	2,3	4,58	22,5	123,5	7	5	4,64	3,65	1,52	1,19277	2,71	1	1	1	0,33	1	3		
3	Повторный обмолот комбайном	Л3	34,65	т	КЗС-1218 «Палессе GS12»	ПЗ-3,4	7	10	1	1	24	168	1680	0,21	1,44	1,4	2,89	22,5	78,0	7	6	4,64	4,01	0,96	0,82706	1,78	1	1	1	0,21	1	3		
4	Транспортировка семян льна к сушильному пункту, 15 км	Л4	328,8	т.км	«Беларус-920»	2ПТС-4	7	10	1	0	8	56	560	5,87	41,10	0,0	41,10	6,5	2137	5	6	3,95	4,01	23,19	0	23,19	1	1	0	5,87	7	7		
5	Сушка семян льна (20 кВт)	Л5	21,92	т		СКУ-10	7	10	1	2	14	140	1,57	0,00	11,0	10,96	0	6	6	4,22	4,01	0,00	6,27947	6,28	1	0	1	1,57	2	2	219,2			
6	Очистка и сортировка семян (13 кВт)	Л6	19,73	т		ПШ-500	7	10	2	0,5	3,5	35	5,64	0,00	78,9	78,92	0	7	6	4,64	4,01	0,00	45,2122	45,21	1	0	2	5,64	7	7	513,0			
Итого															137,7	186,4	324,1	4612					87,19	101,91	189,10				26,9	33,0	732			

Приложение 2

Стоимость материалов для изготовления роторно-бильного аппарата на 01.02.2025

Название элемента	Типоразмер	Стоимость, руб.
Лист горячекатаный, марка стали – Ст3пс/сп5, ГОСТ 16523–97, 14637–89	10×750×750	94,5
Лист холоднокатаный (ст 08 пс)	3×1250×1100	98,9
Лист холоднокатаный (ст 08 пс)	1×200×2200	31,6
Лист холоднокатаный (ст 08 пс)	2×200×2200	24,3
Электросварная профильная труба, 3 м	3×60×60	31,5
Круг, ст35	Ø36×1500	26,3
Ступица	–	80,5
Крепежные изделия	–	62,9
Ворс для лотковой щетки	п/п L-600 d4	23
Другие элементы	–	44,9
Корпусной подшипник, 2 шт.	UCP213	146
Итого		664,4

Расчет затрат по содержанию основных средств

Марка машины	Балансовая стоимость, руб.	Фактическая загрузка, ч	Годовая загрузка, ч	Капитальные вложения, руб.	Норма отчисления, %		Сумма отчисления, руб.		Всего отчислено, руб.
					на амортизацию	на ТО и ремонт	на амортизацию	на ТО и ремонт	
Базовый вариант									
«Беларус-820»	42075	100,9	1300	3265,69	10	14,9	326,57	486,59	813,16
«Двина-4М»	29156	100,90	130	22629,67	14,2	7	3213,41	1584,08	4797,49
КЗС-1218 «Палессе GS12»	224487,9	6,66	240	6226,03	10	15,6	622,60	971,26	1593,86
ПЗ-3,4	1087,9	6,66	100	72,41	16,6	14	12,02	10,14	22,16
«Беларус-920»	43201	40,58	1300	1348,49	10	14,9	134,85	200,93	335,78
2ПТС-4	600	40,58	130	187,29	10	5,8	18,73	10,86	29,59
СКУ-10	15000	10,82	150	1082,10	10	7	108,21	75,75	183,96
ПЛИ-500	22300	77,91	180	9652,33	10	7	965,23	675,66	1640,90
Всего	377907,8	385,0		44464,01			5401,63	4015,26	9416,89
Предлагаемый вариант									
«Беларус-820»	42075	92,82	1300	3004,10	10	14,9	300,41	447,61	748,02
«Двина-4М» (р)	27242,9	92,82	130	19451,06	14,2	7	2762,05	1361,57	4123,62
КЗС-1218 «Палессе GS12»	224487,9	3,73	240	3490,09	10	15,6	349,01	544,45	893,46
ПЗ-3,4	1087,9	3,7	100	40,59	16,6	14	6,74	5,68	12,42
«Беларус-920»	43201	41,1	1300	1365,96	10	14,9	136,60	203,53	340,12
2ПТС-4	600	41,10	130	189,71	10	5,8	18,97	11,00	29,97
СКУ-10	15000	11,0	150	1096,17	10	7	109,62	76,73	186,35
ПЛИ-500	22300	78,9	180	9777,81	10	7	977,78	684,45	1662,23
Всего	375994,7	365,193		38415,48			4661,17	3335,03	7996,20

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	3
ВВЕДЕНИЕ	6
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ	9
1.1. Состояние льноводческой отрасли Республики Беларусь	9
1.2. Анализ применения механизированных технологий уборки льна-долгунца в Республике Беларусь	13
1.3. Анализ устройств для отделения семенной части от стеблей льна	23
1.4. Обоснование конструкции роторно-бильного аппарата для отделения семенной части от стеблей в льноуборочном комбайне	32
1.5. Обзор исследований физико-механических и технологических характеристик стеблей и лент льна	35
1.6. Обзор теоретических и экспериментальных исследований устройств для отделения семенной части от стеблей льна	41
2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РОТОРНО-БИЛЬНОГО АППАРАТА	47
2.1. Обоснование рациональной схемы расположения элементов роторно-бильного аппарата	48
2.2. Определение конструктивных параметров роторно-бильного аппарата	62
2.3. Определение геометрических параметров бича	66
2.4. Обоснование углов рабочих поверхностей бича	80
2.5. Определение кинематических параметров роторно-бильного аппарата	86
3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	95
3.1. Программа исследований	95
3.2. Методика определения параметров подаваемой на обмолот ленты льна	96
3.3. Методика определения удлинения стеблей в ленте льна	99
3.4. Методика определения деформации семенной коробочки льна при различных схемах нагружения	100
3.5. Методика проведения лабораторных исследований	105
3.5.1. Обоснование и выбор основных факторов и интервалов их варьирования	105
3.5.2. Устройство лабораторной установки и методика проведения исследований	109
3.6. Методика проведения производственных испытаний предлагаемого роторно-бильного аппарата	117
3.7. Изучение размерно-массовых характеристик вороха	124
4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	127
4.1. Результаты определения параметров подаваемой на обмолот ленты льна	127
4.2. Результаты определения удлинения стеблей в ленте льна	129
4.3. Результаты определения усилия разрушения семенной коробочки	131
4.4. Результаты поисковых исследований	132
4.5. Оптимизация процесса отделения семенной части от стеблей льна	144
4.5.1. Выбор параметров оптимизации и уровней варьирования факторов при проведении отсеивающих экспериментов	144
4.5.2. Оценка существенности факторов при проведении отсеивающих экспериментов	146
4.5.3. Движение в область оптимума	155
4.5.4. Описание области оптимума	161

4.5.5. Анализ математических моделей процесса.....	169
5. РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ ВНЕДРЕНИЯ.....	174
5.1. Условия и результаты проведения полевых испытаний	174
5.2. Методика выбора параметров и режимов работы льноуборочного комбайна с роторно-бильным аппаратом.....	184
5.3. Реализация результатов исследований	186
5.4. Экономическая эффективность применения роторно-бильного аппарата на льноуборочном комбайне.....	187
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	197
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	199
ПРИЛОЖЕНИЯ	214

Научное издание

Цайц Максим Валерьевич
Шаршунов Вячеслав Алексеевич
Левчук Виталий Анатольевич и др.

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ
И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ
РОТОРНО-БИЛЬНОГО
ОБМОЛАЧИВАЮЩЕГО АППАРАТА
ДЛЯ ЛЬНУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

Монография

Редактор *О. Г. Ковалевская*
Технический редактор *Н. Л. Якубовская*

Подписано в печать 10.06.2026. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Ризография. Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 12,79. Уч.-изд. л. 10,86.
Тираж 100 экз. Заказ .

Белорусская государственная сельскохозяйственная академия.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/52 от 09.10.2013.
Ул. Мичурина, 13, 213407, г. Горки.

Отпечатано в Белорусской государственной сельскохозяйственной академии.
Ул. Мичурина, 5, 213407, г. Горки.