

## МЕХАΝІЗАЦЫЯ І ЭНЕРГЕТЫКА

УДК 633.52:631.358

В. А. ШАРШУНОВ<sup>1</sup>, В. Е. КРУГЛЕНЯ<sup>2</sup>, А. С. АЛЕКСЕЕНКО<sup>2</sup>, В. А. ЛЕВЧУК<sup>2</sup>, М. В. ЦАЙЦ<sup>2</sup>

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОБМОЛАЧИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА В ЛИНИИ ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЛЬНА

<sup>1</sup>Могилевский государственный университет продовольствия,  
Беларусь, e-mail: mgur@mogilev.by

<sup>2</sup>Белорусская государственная сельскохозяйственная академия,  
Горки, Беларусь, e-mail: baa-bgd@mail.ru

(Поступила в редакцию 14.05.2015)

**Введение.** Лен-долгунец – важнейшая техническая сельскохозяйственная культура Беларуси. Льноволокно и получаемая из него продукция пользуются широким спросом во многих странах мира, поэтому возделывание льна может служить одним из источников валютных поступлений в республику [1].

Основными научно-производственными направлениями развития льноводства должны стать: повышение урожайности до 10 ц/га волокна и 4 ц/га семян на основе внедрения в производство научных достижений в селекции, семеноводстве, технологии возделывания и уборки льна; повышение эффективности технологических процессов переработки льна; применение ресурсосберегающих технологий и технологических комплексов машин, нетрадиционных и возобновляемых источников энергии [1, 2].

Однако, несмотря на все принимаемые меры, льноводство в течение последних лет является низкорентабельной отраслью. Это обусловлено значительной трудоемкостью возделывания льна, недостаточным уровнем механизации ряда технологических процессов, а также нехваткой семян высоких посевных кондиций, которые приходится закупать за рубежом [2].

Нынешнее кризисное положение в льняном подкомплексе АПК ослабляет позиции Беларуси на мировом рынке льнопродукции и требует принятия мер по дальнейшему развитию льноводства.

Особое место в технологии возделывания льна принадлежит семеноводству. Стратегической задачей семеноводства является исключение потерь семян, а также снижение энергоемкости при переработке льновороха.

В целях сокращения сроков уборки льна, а соответственно, и потерь качественной тресты и семенного материала, в Беларуси по опыту европейских стран внедряется отдельная технология уборки с обмолотом коробочек в заводских условиях, т.е. в линии переработки льнотресты.

Одним из таких предприятий является ОАО «Дубровенский льнозавод», где установлена технологическая линия первичной обработки льна фирмы Van Dommele Engineering с очесом семенных коробочек аппаратом гребневого типа. Однако очесывающее устройство работает недостаточно эффективно. Основной причиной некачественного очеса является то, что работа сопровождается значительным повреждением стеблей с обрывом верхушек и большим (до 12 %) отходом их в путанину [3]. Процесс очеса в устройстве происходит в период принудительного распутывания стеблей и сцепившихся коробочек в обрабатываемой порции льна,

когда система зубьев гребня при своем движении вдоль массы стеблей осуществляет процесс выпрямления. В результате этого коробочки отрываются движущимися параллельно стеблям зубьями. Перепутавшиеся между собой стебли рвутся под действием сил со стороны зубьев гребня, наблюдаются обрыв стебля и другие механические повреждения волокна. Все это ведет к образованию и выходу большого количества путанины, а высокая повреждаемость стеблей сказывается в конечном итоге на качестве и выходе длинного льноволокна. Высокие линейные скорости движения гребня, что обусловлено необходимостью технологического процесса (чистота очеса), приводят к ударному воздействию элементов рабочего органа на льносемя, выделившееся из разрушившихся коробочек, чем и объясняется высокая повреждаемость семян. В противном случае, при более низких скоростях, наблюдаются значительные потери семян от недоочеса и выноса с лентой льна [4]. Поэтому технология заводского обмолота не всегда приемлема, а очесывающее устройство простаивает и не используется в технологическом процессе.

Нами предлагается устройство для отделения семенных коробочек от стеблей льна в технологической линии, которое оснащено сепарирующей решеткой, рабочая поверхность которой расположена ниже оси зажимного транспортера и полиуретановым эластичным рабочим органом с зубчатой рабочей поверхностью, траектория движения которого копирует форму решетки [5]. За счет эластичности рабочего органа исключается возможность обрыва и выдергивания перепутанных стеблей льна, что позволит увеличить выход и номерность получаемого волокна. Такая конструкция позволяет увеличить зону обмолота, уменьшить толщину обмолачиваемого слоя в зоне обмолота, а за счет зубчатой поверхности рабочего органа частично выравнивать верхушечную часть стеблей и снизить потери семян сходом с лентой льна. Зубья имеют клиновидную форму с углом  $60^\circ$  и высотой 20 мм. Такая форма зубьев способствует более интенсивному внедрению во внутренние слои ленты льна [6].

К настоящему времени отсутствует теоретическое обоснование оптимальных параметров и режимов работы обмолачивающего устройства с эластичным рабочим органом, и нет сведений об экспериментальных исследованиях их работы. Это обстоятельство обусловило необходимость их проведения.

Основным условием, определяющим 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 конструктивного исполнения рабочего органа. При определении границ интервалов изменения факторов необходимо учитывать априорную информацию о влиянии факторов на значение параметра оптимизации. В качестве оптимизирующего параметра принимали степень обмолота –  $E$  (%).

$$E = \frac{n_2}{n_1} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  – количество коробочек на 1 п.м. до и после обмолота соответственно, шт.

Для изучения процесса обмолота лент льна обмолачивающим устройством с эластичным рабочим органом, на основании теоретических исследований и априорной информации [7–9], нами были выделены следующие факторы.

1. Скорость подачи ленты льна в зажимном транспортере оказывает значительное влияние на процесс обмолота. С увеличением скорости снижается число воздействий на ленту льна, что вызывает снижение степени обмолота. Снижение скорости ниже определенного предела (1,41 м/с) уменьшает производительность линии, которая предусматривается заводом-изготовителем. Нижняя и верхняя границы устанавливались из условия обеспечения производительности технологической линии, поэтому значение границ принималось от 1,41 до 1,61 м/с. Шаг изменения скорости – 0,1 м/с.

2. Смещение ленты льна относительно обмолачивающего устройства оказывает влияние на технологический процесс, так как смещение ленты льна в сторону от оси эксцентрика рабочего органа приведет к тому, что бич не полностью будет захватывать верхушечную часть стеблей,

что приведет к недомолоту коробочек и выносу их с лентой льна. Значительное выдвигание ленты льна к оси эксцентрика приведет к тому, что основной удар будет приходиться не на верхушечную часть, а на стебель, что приведет к его повреждению. Нижний и верхний пределы варьирования устанавливали из условия обеспечения максимального воздействия рабочего органа на верхушечную часть стеблей льна и принимали равным  $-0,05$  и  $+0,15$  м, при этом отрицательное значение соответствует смещению ленты льна в сторону удаления от оси эксцентрика, а положительное – в сторону приближения к ней. Шаг изменения –  $0,05$  м.

3. Зазор между рабочим органом и сепарирующей решеткой также имеет важное значение для получения семян высоких посевных кондиций. С увеличением зазора снижается глубина проникновения зубьев в ленту льна, вследствие чего в нижнем слое ленты будут находиться недомолоченные коробочки. Малый зазор приведет к чрезмерному травмированию семян и повреждению стеблей. Пределы варьирования устанавливали исходя из возможной минимальной и максимальной толщины обмолачиваемого слоя, которая определялась соответствующей урожайностью льна. Нижняя граница принималась равной  $0,01$  м, верхняя –  $0,02$  м. Шаг изменения –  $0,005$  м.

4. Угол установки рабочего органа относительно плоскости зажимного транспортера в значительной степени влияет на процесс обмолота и является условием параллельности движения зубчатой гребенки к стеблям, находящимся в ленте, он обеспечивает необходимый контакт рабочего органа со стеблями, их максимальное выравнивание и способствует повышению степени выделения коробочек и семян. Нижняя граница принималась равной  $30^\circ$ , верхняя –  $70^\circ$ , шаг изменения –  $10^\circ$ .

5. Толщина слоя ленты льна оказывает влияние на качество обмолота, так как с увеличением толщины происходит забивание устройства в зоне обмолота, что приводит к образованию путаницы и намотку ее на рабочий орган. Недостаточная толщина приведет к большому травмированию стеблей. Пределы варьирования значения толщины слоя ленты льна принимались исходя из возможной минимальной и максимальной урожайности: нижний –  $0,01$  м, верхний –  $0,05$  м, шаг изменения –  $0,01$  м.

6. Частота вращения рабочего органа оказывает существенное влияние на параметр оптимизации процесса обмолота. Низкая частота очеса приводит к недостаточному числу ударов по верхушечной части ленты льна, вследствие чего будут образовываться пропуски и недомолот. Высокая частота вращения приводит к многократному воздействию на один и тот же участок ленты, вследствие чего повреждаются стебли и снижается номерность волокна. Значение нижней границы устанавливали исходя из условия хотя бы однократного воздействия рабочего органа на ленту льна, и принималось равным  $1,83$  с<sup>-1</sup>, шаг изменения –  $0,4$  с<sup>-1</sup>. Значение верхней границы устанавливали в ходе проведения эксперимента по максимальному значению параметра оптимизации исходя из обеспечения максимальной степени обмолота, согласно допустимым агротребованиям повреждения стеблей и отхода их в путанину, оно составило  $2,92$  с<sup>-1</sup>.

Цель исследований – определение качественных и кинематических показателей процесса обмолота, необходимых для выбора основных конструктивных параметров и расчета конструкции обмолачивающего устройства.

По методике исследований  $3$  п. м ленты льна укладывали на расстилочный стол в виде слоя равной толщины в горизонтальном положении. Средняя длина стеблей составляла  $0,64$  м. Подсчитывали число коробочек на  $2$ -м п. м. После запуска установки лента льна подавалась в зажимной транспортер, приводимый в действие мотор-редуктором с одновременным обмолотом рабочим органом. Далее обмолаченную ленту льна укладывали на расстилочный стол и определяли степень выделения семян и коробочек в средней части ленты длиной  $1$  м, после подсчета необорванных коробочек. Первый и последний метры в расчет не принимались из-за неустановившегося режима. Опыты проводили в трехкратной повторности.

Для лабораторных исследований использовали опытную экспериментальную установку (рисунок).

Устройство содержит ленточно-дисковый зажимной транспортер и аппарат для отделения семенных коробочек от стеблей льна, состоящий из полиуретанового рабочего органа 1, нижняя рабочая часть которого имеет зубчатую поверхность, и кривошипного привода 2, свободно вращающегося на эксцентрике 3, сепарирующей решетки 4. Устройство работает следующим образом: лента льна 5, зажатая ремнем 6 зажимного транспортера и обрезиненным диском 7, поступает в зону обмолота обмолачивающего аппарата. Обмолот происходит за счет удара эластичного бича 1 по верхушечной части стеблей, содержащей семенные коробочки, при протаскивании массы через молотильный зазор между бичом 1 и решеткой 4. В результате силы отрыва коробочек  $P$ , отклоненной на угол  $\alpha$  (рисунок), происходит нарушение механических связей между стеблями и частичное их выравнивание в слое за счет сил трения между стеблями и зубьями эластичного бича 1, с отделением семенных коробочек. Так как рабочая поверхность бича имеет зубчатую форму, это обеспечивает внедрение зубьев на всю толщину слоя и вычесывание коробочек льна с нижней его части, а также происходит частичное выравнивание стеблей, что увеличивает выход длинного волокна [10].

Сепарирующая решетка 4 установлена относительно бича с регулируемым зазором, уменьшающимся по направлению к выходу от  $\Delta_{\text{вх}}$  до  $\Delta_{\text{вых}}$ . Под действием центробежной силы обмолоченный льноворох просыпается через решетку и поступает на ленточный транспортер 8 для дальнейшей очистки [11].

В результате проведения поисковых и отсеивающих экспериментов были определены наиболее значимые факторы и их интервалы варьирования. Интервалы и уровни варьирования факторов приведены в таблице.

Уровни и интервалы варьирования факторов

Фактор	Уровень и интервал варьирования			
	(-1)	(0)	(+1)	$m$
Скорость подачи ленты льна в зажимном транспортере ( $X_1$ ), м/с	1,41	1,51	1,61	0,1
Зазор между рабочим органом и сепарирующей решеткой ( $X_3$ ), м	0,01	0,015	0,02	0,005
Частота вращения рабочего органа ( $X_6$ ), с <sup>-1</sup>	1,83	2,25	2,92	0,40

Для того чтобы определить оптимальное сочетание выделенных факторов, были проведены эксперименты согласно матрице планирования полного факторного эксперимента  $2^3$ , которая включала восемь опытов. После проведения экспериментов проводилось крутое восхождение по поверхности отклика [12]. По их результатам были определены коэффициенты регрессии:  $b_0 = 93,025$ ;  $b_1 = -1,517$ ;  $b_3 = -1,667$ ;  $b_6 = 3,133$ ;  $b_{1,3} = -0,458$ ;  $b_{1,6} = 0,375$ ;  $b_{3,6} = 0,708$  и статическая оценка полученной линейной модели:  $t_{b_0} = 348,844$ ;  $t_{b_1} = -5,687$ ;  $t_{b_3} = -6,25$ ;  $t_{b_6} = 11,75$ ;  $t_{b_{1,3}} = -1,719$ ;  $t_{b_{1,6}} = 1,406$ ;  $t_{b_{3,6}} = 2,656$ .

Проверку адекватности представления результатов экспериментов полиномом первой степени осуществляли путем сравнения табличного критерия Фишера с расчетным. Расчетное значе-

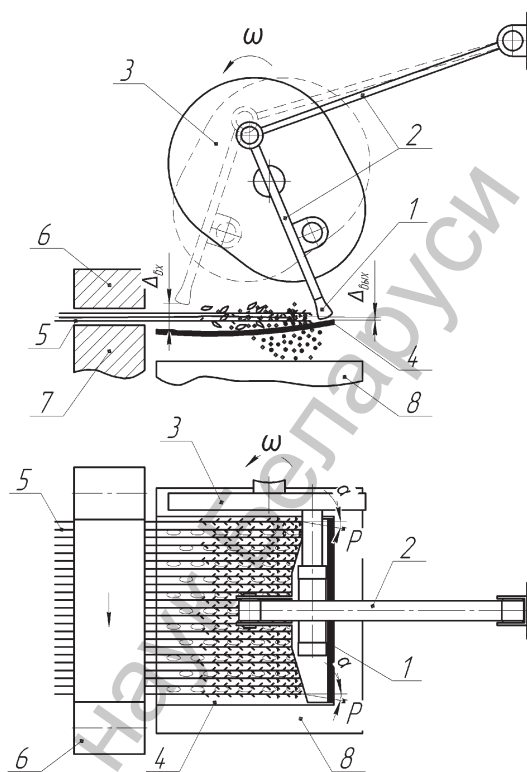


Схема обмолачивающего устройства:  
1 – рабочий орган; 2 – кривошипный привод; 3 – эксцентрик; 4 – сепарирующая решетка; 5 – лента льна; 6 – ремень зажимного транспортера; 7 – обрезиненный диск; 8 – ленточный транспортер



ние критерия Фишера  $F_p = 5,698$  больше табличного, поэтому гипотеза об описании результатов экспериментов линейной моделью отвергается.

На основании проведенных расчетов можно сделать заключение, что линейная модель  $y = 93,025 - 1,517x_1 - 1,667x_3 + 3,133x_6$  для описания результатов эксперимента не может быть принята.

Поэтому в дальнейших исследованиях с целью изучения и описания области оптимума линейного приближения недостаточно, т.е. необходимо использовать планирование второго порядка, позволяющее получить представление о функции отклика с помощью полинома второй степени.

Несмотря на то что линейная модель для рассматриваемой зависимости оказалась неадекватной, мы провели крутое восхождение по поверхности отклика с помощью полученных коэффициентов регрессии в кодированном виде, предполагая, что при удачном движении можно установить более благоприятные условия для проведения следующей стадии эксперимента.

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 5 % обычно достаточным является описание поверхности отклика полиномом второго порядка [12].

Для описания области оптимума уравнениями второго порядка в условиях неоднородностей Боксом и Бенкиным разработаны трехуровневые планы. Их отличительной особенностью является то, что во всех строках плана некоторые факторы находятся на нулевых уровнях. По сравнению с ортогональными и рототабельными трехуровневые планы Бокса и Бенкина более экономичны и к тому же обладают свойствами вышеназванных планов [12].

В результате анализа нами был выбран трехуровневый план второго порядка Бокса–Бенкина для трех факторов, включающий 15 опытов. Опыты проводили в трехкратной повторности в рандомизированном порядке. С учетом данных крутого восхождения центр эксперимента был выбран в новой точке.

По вышеприведенной методике для критерия  $E$  была получена следующая адекватная модель:

$$E = 87,5436 - 13,0767v + 60,667\Delta + 7,189n_6 - 41,667v\Delta - 9,921vn_6 + 0,972\Delta n_6 + 1,542v^2 - 983,33\Delta^2 - 0,64n_6^2 \quad (2)$$

где  $v$  – скорость подачи ленты льна, м/с;  $\Delta$  – зазор между рабочим органом и декой, м;  $n_6$  – частота вращения рабочего органа,  $s^{-1}$ .

В результате ее решения были получены рациональные параметры исследуемых факторов:  $v = 1,41$  м/с;  $\Delta = 0,01$  м;  $n_6 = 2,92$   $s^{-1}$ . После их подстановки в уравнение (2) получили значение степени обмолота  $E = 99,26$  %. В результате экспериментов, проведенных при этих же уровнях факторов, значение степени обмолота составило 98,81 %. Разность между расчетным и экспериментальными значениями не превышает 5 %. На основании этого можно сделать вывод, что экспериментальные данные согласуются с расчетными и подтверждаются ими.

**Заключение.** На ОАО «Дубровенский льнозавод» в технологической линии первичной обработки льна фирмы Van Dommle Engineering были произведены испытания экспериментальной установки, определена функция отклика, степень отделения коробочек, факторы и их границы, влияющие на степень обмолота, с учетом работоспособности конструкции и возможности конструктивного исполнения рабочего органа.

В результате проведения полнофакторного эксперимента получена математическая модель процесса обмолота ленты льна обмолачивающим устройством предлагаемой конструкции. Результаты приведенных исследований показывают, что степень обмолота  $E = 98,81$  % может быть достигнута при скорости подачи ленты льна  $v = 1,41$  м/с, зазоре между рабочим органом и декой  $\Delta = 0,01$  м, частоте вращения рабочего органа  $n_6 = 2,92$   $s^{-1}$ . Полученные значения лягут в основу методики расчета и проектирования обмолачивающего устройства.

В результате испытаний установлено, что по сравнению с гребневым типом рабочего аппарата при очесе ленты льна обеспечивается уменьшение повреждения стеблей, влияющих на выход

длинного волокна – с 5,0 до 1,9 %; снижение степени травмирования семян – с 1,5 до 1,0 %, при этом потери семян снизились с 3,0 до 0,9 %; отход стеблей в путанину снизился в 4 раза и составил 2,0 %. Расчетный годовой экономический эффект от внедрения разработанного устройства по сравнению с гребневым типом аппарата составил 54 984,35 у. е. на одну линию, что составляет 10,78 у. е. на 1 т переработанной льнотресты.

## Литература

1. Комплексный бизнес-план развития льняной отрасли Республики Беларусь на 2011–2015 годы / М-во сельского хозяйства и продовольствия Респ. Беларусь. – Минск, 2010. – 160 с.
2. Казакевич, П. П. Льноводство и переработка Беларуси: проблемы развития / П. П. Казакевич // Белорусское сельское хозяйство. – 2010. – № 7. – С. 4–11.
3. Левчук, В. А. Обмолачивающее устройство в линии первичной переработки льна фирмы «Van Dommele» / В. А. Левчук // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы междунар. науч.-техн. конф. молод. ученых, Могилев, 17–18 нояб. 2011 г. / М-во образования и науки Рос. Федерации, Белорус.-Рос. ун-т; редкол.: И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2011. – С. 220.
4. Кругленья, В. Е. Обоснование параметров бильного аппарата для усовершенствования процесса обмолота ленты льна / В. Е. Кругленья, М. В. Левкин // Энергоресурсосберегающие технологии и технические средства для их обеспечения в сельскохозяйственном производстве: материалы междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, Минск, 25–26 авг. 2010 г. / Науч.-практ. центр Нац. акад. наук Беларуси по механизации сельского хозяйства; редкол.: П. П. Казакевич (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2010. – С. 131–134.
5. Устройство для отделения семенных коробочек от стеблей льна: пат. 7224 Респ. Беларусь, МПК А 01F 11/00 / В. Е. Кругленья, М. В. Лёвкин, В. И. Коцуба, С. Н. Крепочин, В. А. Левчук; дата публ.: 02.02.11.
6. Обмолачивающее устройство ленты льна: пат. 8332 Респ. Беларусь, МПК А01F 11/02 / В. Е. Кругленья, М. В. Лёвкин, В. А. Левчук; дата публ.: 30.06.12.
7. Райлян, Г. А. Повышение эффективности раздельной уборки льна применением двухбарабанного обмолачивающего устройства с эластичными билами: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. / Г. А. Райлян. – Горки, 2006. – 176 л.
8. Улахович, А. Е. Обмолот семенного вороха клевера вальцовым аппаратом с эластичными рабочими поверхностями: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А. Е. Улахович. – Горки, 1989. – 214 л.
9. Кудрявцев, А. Н. Повышение эффективности обмолота льновороха эластичными вальцами молотилки: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / А. Н. Кудрявцев. – Горки, 2001. – 182 л.
10. Устройство для выделения семян из ленты льна: пат. 8183 Респ. Беларусь, МПК А01D 45/06 / В. Е. Кругленья, М. В. Лёвкин, В. А. Левчук; дата публ.: 30.04.12.
11. Устройство для обмолота коробочек льна: пат. 8494 Респ. Беларусь, МПК А01F 11/02 / В. Е. Кругленья, М. В. Лёвкин, В. А. Левчук; дата публ.: 04.08.12.
12. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рошин. – Л.: Колос, 1980. – 168 с.

*V. A. SHARSHUNOV, V. E. KRUGLENYA, A. S. ALEKSEENKO, V. A. LEVCHUK, M. V. TSAITS*

## STUDY OF A THRESHING DEVICE IN THE LINE OF PRIMARY FLAX PROCESSING

### Summary

The paper presents the methods and results of the experimental research into determining the degree of flax heads threshing with a device with an elastic working part in the line of primary flax processing of the firm Van Dommele Engineering.

As a result of the experiment the mathematical model of flax threshing has been obtained. It's established that the threshing degree  $E = 98.81\%$  can be received when the speed of flax band transporting is 1.41 m/s ( $v = 1.41$  m/s), the space between a working part and concave is 0.01 m ( $\Delta = 0.01$  m) and the frequency of cylinder rotation is  $2.92\text{ s}^{-1}$  ( $n_6 = 2.92\text{ s}^{-1}$ ).