

УДК 631.358:633.521

В. А. ШАРШУНОВ<sup>1</sup>, В. Е. КРУГЛЕНЯ<sup>2</sup>, М. В. ЛЕВКИН<sup>2</sup>

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТРОЙСТВА  
С ЭЛАСТИЧНЫМИ ГРЕБЕНКАМИ ДЛЯ ОБМОЛОТА ЛЕНТЫ ЛЬНА**

<sup>1</sup>Могилевский государственный университет продовольствия, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, Горки, Республика Беларусь,

*e-mail: maksim.levkin@gmail.com*

*(Поступила в редакцию 27.06.2012)*

Льноводство и льнопереработка в Беларуси в комплексе представляют собой систему предприятий, осуществляющих полный производственный цикл получения товарной продукции (от выращивания льна до изготовления изделий), поэтому она рассматривается как потенциально экономически выгодная и перспективная в экспортном плане [1].

Эффективность работы льноводческой отрасли определяют в первую очередь количеством и качеством получаемой волокнистой продукции и высокосортного семенного материала [2]. Вероятность получения качественной льнопродукции зависит от соблюдения агротехнических требований в процессе выращивания льна и его уборки, особенно важно это на последнем этапе, когда необходимо снизить механические повреждения льнопродукции средствами механизированной уборки.

Принимая во внимание изношенное состояние материально-технической базы отрасли, возникла необходимость приобретения современной европейской техники либо техники совместного производства, что экономически нецелесообразно, поскольку на технику совместного производства цена выше на 15–20 % импортных аналогов [3].

Обеспечение технологизации производственного процесса на данном этапе обеспечивается внедрением раздельной уборки льна на основе применения данной техники, однако в природно-производственных условиях Беларуси раздельную технологию нельзя рассматривать как альтернативу комбайновой в связи с тем, что погодная ситуация в разные годы оказывается более благоприятной для одного из этих способов. Поэтому наиболее приемлемой является технология комбинированной уборки, которая предполагает начало уборочных работ по технологии раздельной уборки с подключением в дальнейшем льноуборочных комбайнов [1], что не исключает в неблагоприятных погодных условиях часть посевов убирать и обрабатывать по «заводской технологии», т. е. с очесом семян в линиях переработки льна на льнозаводах.

В настоящее время как за рубежом, так и у нас в стране для отделения головок льна от стеблей широко используются гребневые очесывающие аппараты льноуборочных машин с поступательно-круговым движением гребней, т. е. движением, при котором зубья гребней, совершая круговое движение, не изменяют угла расположения их в пространстве [3, 4].

Преимуществом такого типа очесывающих аппаратов является обеспечение высокой чистоты отделения семян и головок из стеблей независимо от спелости, влажности и качества лент льна, однако при этом повреждаемость стеблей и отход их в путанину часто превышает предусмотренные агротехническими требованиями нормы и достигает 80 % от всей массы льновороха. В результате качество тресты снижается на 0,3–0,5 номера, выход длинного волокна – на 1,2–2,5 %, увеличиваются затраты энергоресурсов (примерно 25 % всех затрат на производство льна) из-за необходимости дополнительной доработки льновороха [1].

Для уменьшения отхода стеблей в путанину и снижения их повреждаемости в Белорусской государственной сельскохозяйственной академии разработано обмолачивающее устройство с четырьмя эластичными гребенками, которое отличается также и меньшей удельной энерго- и материалоемкостью по сравнению с гребневыми [5, 6].

К настоящему времени отсутствует теоретическое обоснование оптимальных параметров и режимов работы разработанного устройства, нет сведений об экспериментальных исследованиях их работы, что обусловило необходимость их проведения.

Цель исследований – определение рациональных кинематических параметров обмолачивающего устройства с эластичными гребенками.

Для лабораторных исследований использовалась опытная экспериментальная установка (рис. 1), на базе которой и проводились опыты в течение 2011–2012 гг.

Экспериментальная установка состоит из рамы 1, на которой установлен зажимной транспортер 2, вращение которому передается мотор-редуктором 3 марки ZG2 KMR90L4, и обмолачивающий барабан 4 с приводом от мотор-редуктора 5 ZG3 KMR100L и цепной передачи 6. Оба привода включаются при помощи пульта управления 11 и снабжены индивидуальными преобразователями частоты вращения 9 серии VFD-M, позволяющими бесступенчато изменять контролируемые параметры: частоту вращения барабана и скорость подачи ленты льна.

Барабан 4 оснащен четырьмя гребенками 7, выполненными из эластичного материала, рабочая поверхность которых имеет зубчатую форму, и установленных под углом  $\alpha$  относительно плоскости зажимного транспортера 2. Барабан сверху закрыт кожухом 8. Установка снабжена колесами 10, которые вращаются в полуосях, приваренных к раме.

Опыты проводили со свежевытербленным льном желтой спелости, влажностью стеблей от 40 до 56 %, головок – 10–35 %. Пробы брали из 10 рулонов. Они формировались по 1 м п. с различной толщиной слоя.

В опытах варьировали следующие факторы: частота вращения барабана ( $n$ ,  $c^{-1}$ ), скорость подачи ленты льна ( $V$ , м/с), угол установки гребенки относительно плоскости зажимного транспортера ( $\alpha$ , град), зазор между гребенкой и подбарабаньем ( $\Delta$ , мм), смещение ленты льна относительно обмолачивающего устройства ( $\delta$ , мм) и влажность льна ( $\xi$ , %)

Основным параметром оптимизации для изучения процесса обмола ленты льна устройством с эластичными гребенками была принята степень обмола –  $E$ , %.

Исследуемый погонный метр ленты льна укладывали на расстилочный стол в виде слоя равной толщины в горизонтальном положении. Средняя длина стеблей составляла 0,7 м (средневзве-

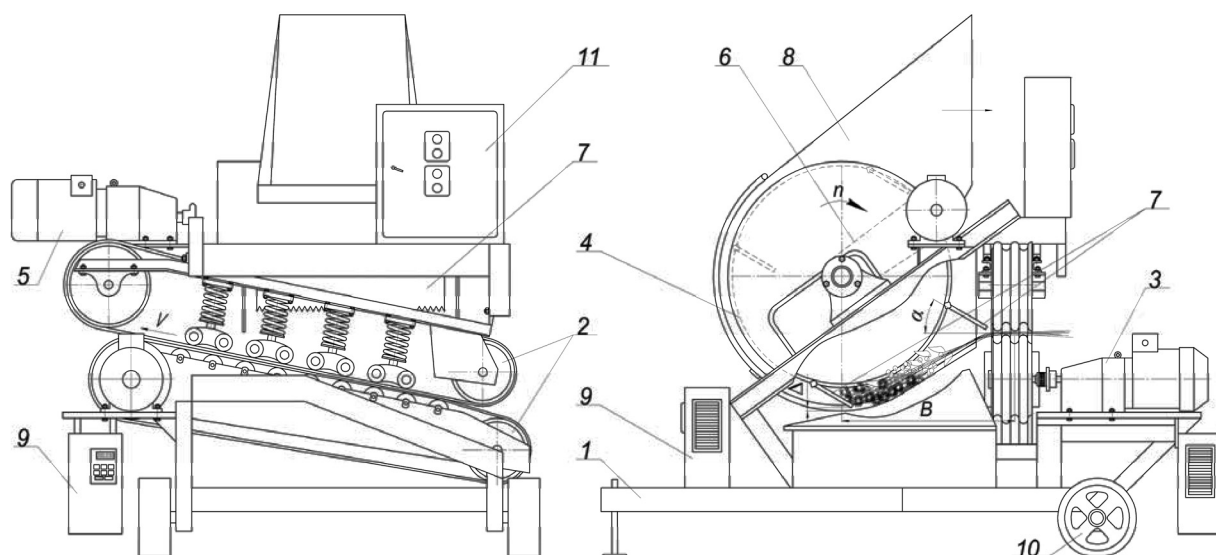


Рис. 1. Схема лабораторной установки: 1 – рама; 2 – зажимной транспортер; 3, 5 – мотор-редуктор; 4 – барабан; 6 – цепная передача; 7 – эластичные гребенки; 8 – кожух; 9 – преобразователь частоты; 10 – колеса; 11 – пульт управления;  $\alpha$  – угол установки гребенки относительно плоскости зажимного транспортера;  $\Delta$  – зазор между гребенкой и подбарабаньем;  $n$  – частота вращения барабана;  $B$  – смещение ленты льна

шенный номер 0,8–1,0). После запуска установки лента льна подавалась в зажимной транспортер 2, приводимый в действие мотор-редуктором 3, с одновременным обмолотом эластичными гребенками 7 обмолочивающего барабана 4. Далее обмолоченная лента укладывалась на пол, а полученный льноворох за счет потока воздуха, создаваемого гребенками, выбрасывался в мешок.

В результате проведения поисковых и отсеивающих экспериментов были определены наиболее значимые факторы и интервалы их варьирования.

Для выявления оптимального сочетания выделенных факторов реализован полный факторный эксперимент типа  $2^3$ , а также выполнена программа крутого восхождения по поверхности отклика, алгоритм которых приведен в таблице.

#### Результаты экспериментальных исследований

Номер опыта	$X_1$	$X_3$	$X_6$	$Y_1$	$Y_3$	$Y_6$	$\bar{Y}$	$\hat{Y}$
1	–	–	–	93,85	93,65	92,92	93,47	93,13
2	+	–	–	90,32	92,17	88,94	90,48	90,08
3	+	+	–	83,59	86,34	84,97	84,97	86,75
4	+	+	+	93,78	94,06	93,94	93,93	93,03
5	–	+	+	96,44	95,11	96,16	95,90	96,07
6	–	–	+	98,47	97,83	98,23	98,18	99,41
7	–	+	–	90,61	89,48	92,40	90,83	89,79
8	+	–	+	96,92	96,43	97,23	96,86	96,37
$b_i$	–1,52	–1,67	3,14	$\sum_{i=1}^N S_{y_i}^2 = 8,39; S_R^2 = 0,002$				
Проверка значимости коэффициентов регрессии и крутое восхождение по поверхности отклика								
$t_{\text{табл}} = 2,447$	$F_{\text{табл}} = 3,01$	$q_{\text{зн}} = 5\%$		$f = N(m - 1) = 16$			$S_{\hat{Y}}^2 = 0,96$	
$t_i$	4,17	–2,87	–3,89	$\Delta b_i = 0,43$			$S_{b_i} = 0,2$	
Обозначение фактора		Уровень фактора			Интервал варьирования			
		нижний (–1)	основной (0)	верхний (+1)				
$x_1$	$V, \text{ м/с}$	1,4	1,5	1,6	0,1			
$x_3$	$\alpha, \text{ град}$	27,2	33,6	40,0	6,4			
$x_6$	$n, \text{ с}^{-1}$	4,83	5,13	5,43	0,3			
Проверка адекватности модели второго порядка								
$q_{\text{ад}} = 5\%$		$f_1 = N - k - 1 = 5$		$F_{\text{табл}} = 2,5$		$F_{\text{расч}} = 2,37$		
$t_{\text{табл}} = 2,571$		$f_2 = N(m - 1) = 30$		$F_{\text{расч}} \leq F_{\text{табл}}$ – описание адекватно				

Для оценки качества полученной модели и полноты набора объяснительных факторов, входящих в нее, в своих исследованиях мы использовали критерии Фишера ( $F$ -критерий) и Стьюдента ( $t$ -критерий), при этом использовали стандартные методики их определения, рассмотренные в работе [7].

Анализ таблицы показывает, что гипотеза об адекватности линейной модели отвергается, так как расчетное значение критерия Фишера  $F_{\text{расч}} = 5,698$  больше табличного при уровне значимости 0,05, поэтому в дальнейших исследованиях для изучения и описания области оптимума использовали модели более высокого порядка.

Несмотря на то что линейная модель для рассматриваемой зависимости оказалась неадекватной, нами было проведено крутое восхождение по поверхности отклика с учетом полученных коэффициентов линейной регрессии в кодированном виде, предполагая, что при удачном движении можно установить более благоприятные условия для проведения следующей стадии эксперимента. Результаты крутого восхождения приведены в средней части таблицы.

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 [7].

Для описания области оптимума уравнениями второго порядка в условиях неоднородностей использовали трехуровневые планы Бокса-Бенкина. Их отличительной особенностью является то, что во всех строках плана некоторые факторы находятся на нулевых уровнях [7]. 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 результатам эксперимента получено следующее уравнение регрессии:

$$y = 98,011 + 0,539x_1 - 0,055x_3 + 0,169x_6 + 0,053x_1x_3 + 0,017x_3x_6 - 0,041x_1x_6 + 0,072x_1^2 - 0,043x_3^2 - 0,074x_6^2. \quad (1)$$

Проверку адекватности проводили по вышеизложенной методике с использованием  $F$ -критерия (нижняя часть таблицы).

После получения адекватной математической модели второго порядка переходим к описанию области оптимума.

Чаще всего для описания области оптимума прибегают к каноническому преобразованию математической модели. После канонического преобразования и определения вида поверхности отклика начинается ее анализ, который проведем по поверхностям отклика [7].

Поверхность отклика, характеризующая показатель степени обмолота в зависимости от скорости подачи ленты льна ( $x_1$ ) и частоты вращения барабана ( $x_6$ ), получим, подставив в уравнение (1) значение угла установки гребенки относительно плоскости зажимного транспортера  $x_3 = 0$ . В результате имеем

$$y = 98,011 + 0,539x_1 + 0,169x_6 - 0,041x_1x_6 + 0,072x_1^2 - 0,074x_6^2. \quad (2)$$

Определяем координаты центра поверхности дифференцированием уравнения (2) и решением системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dy}{dx_1} = 0,539 - 0,041x_6 + 0,144x_1, \\ \frac{dy}{dx_6} = 0,169 - 0,041x_1 - 0,148x_6 \end{cases} \quad (3)$$

( $x_{1s}$ ,  $x_{6s}$  – координаты центра поверхности для факторов  $x_1$  и  $x_6$  при  $x_3 = 0$ ,  $x_{1s} = -3,168$ ;  $x_{6s} = 2,02$ ).

Каноническое преобразование уравнения (1) выполним, решая характеристическое уравнение:

$$f(B_1) = \begin{vmatrix} b_1 - B_1 & -1/2b_{1-6} \\ -1/2b_{1-6} & -b_6 - B_1 \end{vmatrix} = B_1^2 - (b_1 + b_6)B_1 + (b_1b_6 - 1/4b_{1-6}^2) = 0, \quad (4)$$

где  $B_1, B_2, B_3$  – коэффициенты регрессии в канонической форме;  $b_i$  – коэффициент регрессии  $i$ -го фактора.

Для нахождения коэффициентов канонической формы составим и решим характеристическое уравнение поверхности второго порядка с помощью компьютерной программы Mathcad.

$$\begin{vmatrix} 0,072 - B_1 & -0,0205 \\ -0,0205 & -0,074 - B_1 \end{vmatrix} = B_1^2 + 0,002B_1 - 0,0058 = 0. \quad (5)$$

В результате решения корнями (собственными числами) данного характеристического уравнение (5) будут:  $B_{11} = 0,075$ ;  $B_{12} = -0,077$ , а само уравнение в канонической форме примет такой вид:

$$Y - 98,328 = 0,075x_1^2 - 0,077x_6^2 \quad (6)$$

( $Y$  – значение критерия оптимизации).

Аналогичным образом построим поверхности отклика при фиксированных значениях двух других факторов:  $x_6 = 0$  и  $x_1 = 0$ .

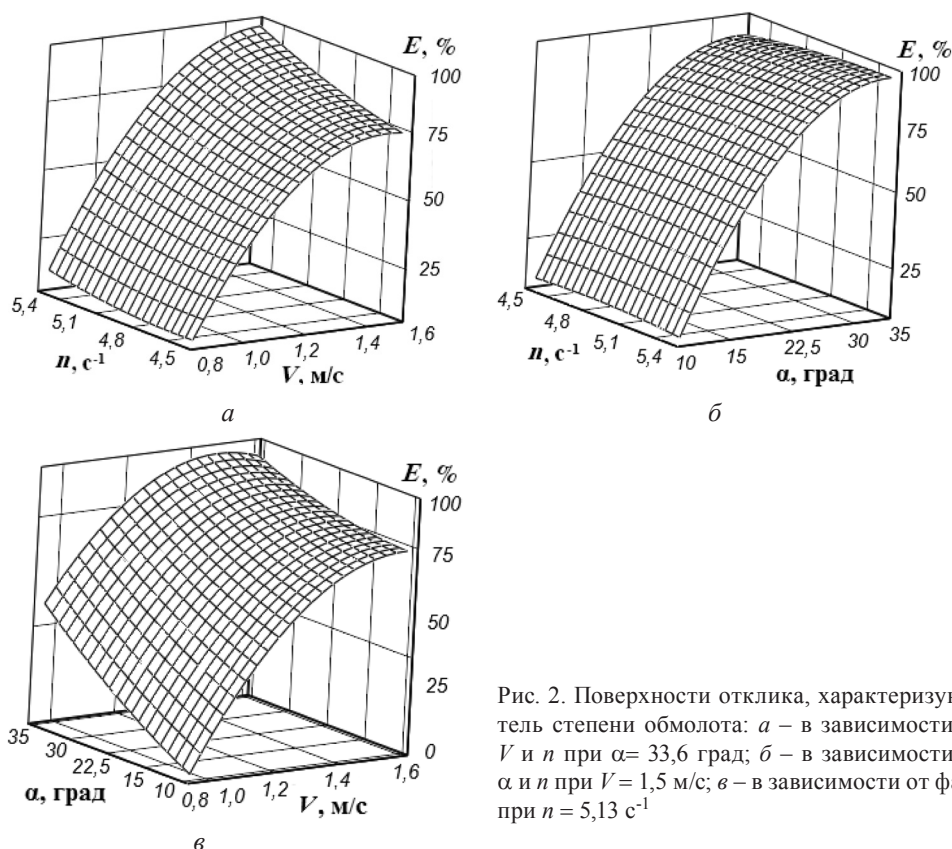


Рис. 2. Поверхности отклика, характеризующие показатель степени обмолота: *а* – в зависимости от факторов  $V$  и  $n$  при  $\alpha = 33,6$  град; *б* – в зависимости от факторов  $\alpha$  и  $n$  при  $V = 1,5$  м/с; *в* – в зависимости от факторов  $V$  и  $\alpha$  при  $n = 5,13$  с<sup>-1</sup>

После необходимых преобразований получим корни (собственные числа):  $B_{21} = 0,078$ ;  $B_{22} = -0,049$  и  $B_{31} = -0,041$ ;  $B_{32} = -0,076$  соответственно, при этом уравнения в канонической форме запишутся следующим образом:

$$Y - 98,307 = 0,078x_1^2 - 0,049x_3^2, \quad (7)$$

$$Y - 98,115 = -0,041x_3^2 - 0,076x_6^2. \quad (8)$$

Анализируя рис. 2, видим, что максимальное значение показателя степени обмолота  $E$  в рассматриваемых сечениях поверхности отклика при прочих факторах ( $V$ ;  $\alpha$  и  $n$ ), последовательно взятых на нулевом уровне, равно 98,2; 98,3 и 98,3 % соответственно.

### Выводы

Проведенные экспериментальные исследования показали, что рациональные значения кинематических параметров обмолочивающего устройства с эластичными гребенками могут находиться в следующих пределах: скорость подачи ленты льна ( $V$ ) – 1,4–1,6 м/с, угол установки гребенки относительно плоскости зажимного транспортера ( $\alpha$ ) – 32–36 град, частота вращения барабана ( $n$ ) = 5,0–5,4 с<sup>-1</sup>, при этом степень обмолота при данных параметрах составит 97,2–98,7 %, что удовлетворяет качественным показателям агротехнических требований.

### Литература

1. Казакевич, П. П. Льноводство и переработка Беларуси: проблемы развития / П. П. Казакевич // Белорусское сельское хозяйство. – 2010. – № 7. – С. 4–11.
2. Голуб, И. А. Льноводство Беларуси / И. А. Голуб, А. З. Чернушок; РУП «Ин-т льна Нац. акад. наук Беларуси». – Борисов: Борисов. укрупн. тип. им. 1 Мая, 2009. – 245 с.
3. Результаты экспериментальных исследований обмолочивающего устройства с эластичными гребенками / В. Е. Кругленья и [др.] // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. – 2011. – № 4. – С. 171–175.
4. Шлыков, М. И. Льноуборочный комбайн / М. И. Шлыков. – М.: Машгиз, 1949. – 296 с.

5. Очишчальнае ўстаноўка: пат. 7068 Респ. Беларусь, МПК А 01F 11/00 / В. Е. Круглень, М. В. Левкін, С. П. Коціц, В. І. Коцуба; заявіцель Беларус. гос. с.-х. акад. – № u 20100161; заявл. 18.02.2010; опубл. 28.02.11 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 1. – С. 162.

6. Устаноўка для выдзялення сям'янаў з ленты льна: пат. 8183 Респ. Беларусь, МПК А01D 45/06 / В. Е. Круглень, М. В. Левкін, В. А. Левчук; заявіцель Беларус. гос. с.-х. акад. – № u 20110743; заявл. 29.09.11; опубл. 30.04.12 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 2. – С. 197.

7. Мельніков, 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, M. V. LEVKIN*

## **THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE DEVICE WITH ELASTIC COMBS FOR FLAX DESEEDING**

### **Summary**

The article presents the methodology and results of experimental studies on the threshing degree detection of flax tape by means of device with flexible combs, the mathematical model is obtained and three-dimensional cross-sections of the response surface characterizing threshing rate depending on the selected factors and their variation intervals are constructed.