

Механизация, электрификация, автоматизация и цифровизация

УДК 631.358:633.521

DOI: 10.31857/S2500262722060126, EDN: MKUMKC

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫРАВНИВАНИЯ ЛЕНТЫ РАСТЕНИЙ ВО ВТОРОЙ ФАЗЕ РАЗДЕЛЬНОЙ УБОРКИ ЛЬНА-ДОЛГУНЦА**Ю.Ф. Лачуга¹**, академик РАН, **А.Н. Зинцов²**, доктор технических наук, **М.М. Ковалев³**, доктор технических наук, **Г.А. Перов³**, кандидат технических наук¹Российская академия наук,
119334, Москва, Ленинский просп., 32 А²Костромская государственная сельскохозяйственная академия,
156530, Кострома, пос. Караваяево, учебный городок, 34³Федеральный научный центр лубяных культур,
170041, Тверь, Комсомольский проспект, 17/56
E-mail: m.kovalev@fnclk.ru

Для снижения зависимости двухфазной уборки льна-долгунца от метеоусловий целесообразно использовать гребневой очесывающий аппарат. Высокая эффективность процесса очеса может быть обеспечена только после исправления ошибок горизонтального копирования кривизны ленты растений льна подборщиком. Решение этой задачи возможно при помощи выравнивающего устройства, установленного между подбирающей частью и очесывающим аппаратом подборщика-очесывателя. Работа устройства основана на смещениях ленты растений по наклонному столу под действием силы тяжести и (или) выравнивающего конвейера. Цель исследования – обоснование параметров и режимов работы выравнивающего устройства для ориентированной подачи ленты растений в очесывающий аппарат при двухфазной уборке льна-долгунца. Выравнивающее устройство наиболее эффективно работает с сухими растениями при скорости движения конвейеров 1,5 м/с и наклоне стола 60°. При работе с увлажненными растениями активизации исследуемого процесса будет способствовать увеличение ширины конвейеров. Полученные результаты реализованы в конструкции подборщика-очесывателя ПОЛ-1,5К. Оценка эффективности выравнивающего устройства проведена в реальных условиях производства путем видеорегистрации и корреляционно-спектрального анализа процессов изменения ординат вершинной части ленты льна на входе и выходе устройства. Зафиксированы положительные изменения внутренней структуры исследуемых процессов в виде уменьшения средних квадратических отклонений с 7,22 см на входе до 3,33 см на выходе выравнивающего устройства. При этом характер выходных колебаний стал более плавным с увеличением интервала корреляции от 2,1 до 7,8 с и узкополосным с фильтрацией спектра дисперсий в диапазоне частот от 0,3 до 3,3 с⁻¹. Отфильтрованные колебания были следствием ошибок копирования ленты льна подборщиком. Качество работы выравнивающего устройства оценивается положительно, так как фактические значения среднего квадратичного отклонения и коэффициента вариации выходного процесса находятся в допустимых пределах.

INVESTIGATION OF THE PROCESS OF PLANT RIBBON ALIGNMENT IN THE SECOND PHASE OF FIBER FLAX SEPARATE HARVESTING**Lachuga Yu. F.¹, Zintsov A.N.², Kovalev M. M.³, Perov G. A.³**¹Russian Academy of Sciences,
119334, Moscow, Leninskii prosp., 32 A²Kostroma State Agricultural Academy,
156530, Kostroma, pos. Karavaevo, uchebnyi gorodok, 34³Federal Research Center for Bast Crops,
170041, Tver, Komsomolsky prosp., 17/56
E-mail: m.kovalev@fnclk.ru

In order to reduce the dependence of the two-phase harvesting of fiber flax on weather conditions, it is advisable to use a comb comber to separate the seeds from the stems. The high efficiency of the seed collection process can be ensured only after correcting the errors of horizontal copying of the curvature of the flax plant ribbon by the picker. The solution to this problem is possible with the help of a leveling device installed between the pick-up part and the ridge apparatus of the pick-up stripper. The operation of the device is based on the displacement of the plant belt on an inclined table under the action of gravity and (or) a leveling conveyor. The purpose of the study is to substantiate the parameters and modes of operation of the leveling device for the oriented feeding of the plant strip into the stripper during two-phase harvesting of fiber flax. It has been analytically established that the leveling device works most effectively with dry plants at a conveyor speed of 1.5 m/s and with a table tilt of 60 degrees. When working with moistened plants, an increase in the width of the conveyors will contribute to the activation of the process under study. The obtained results are implemented in the design of the pick-up stripper POL-1.5K. Evaluation of the effectiveness of the leveling device was carried out in real production conditions by video recording and correlation-spectral analysis of the processes of changing the ordinates of the top part of the flax tape at the input and output of the device. Positive changes in the internal structure of the processes under study were recorded in the form of a decrease in standard deviations from 7.22 cm at the input to 3.33 cm at the output of the leveling device. At the same time, the nature of the output oscillations became smoother with an increase in the correlation interval from 2.1 to 7.8 s, and narrow-band with dispersion spectrum filtering in the frequency range from 0.3 to 3.3 s⁻¹. The filtered fluctuations were the result of errors in copying the flax sliver by the pick-up. The quality of the leveling device is assessed positively, since the actual values of the standard deviation and the coefficient of variation of the output process are within acceptable limits.

Ключевые слова: лен, технология двухфазной уборки, лента растений, очесывающий аппарат, выравнивающее устройство, смещение, систематическая ошибка.

Key words: flax, two-phase harvesting technology, plant belt, combing machine, leveling device, displacement, systematic error.

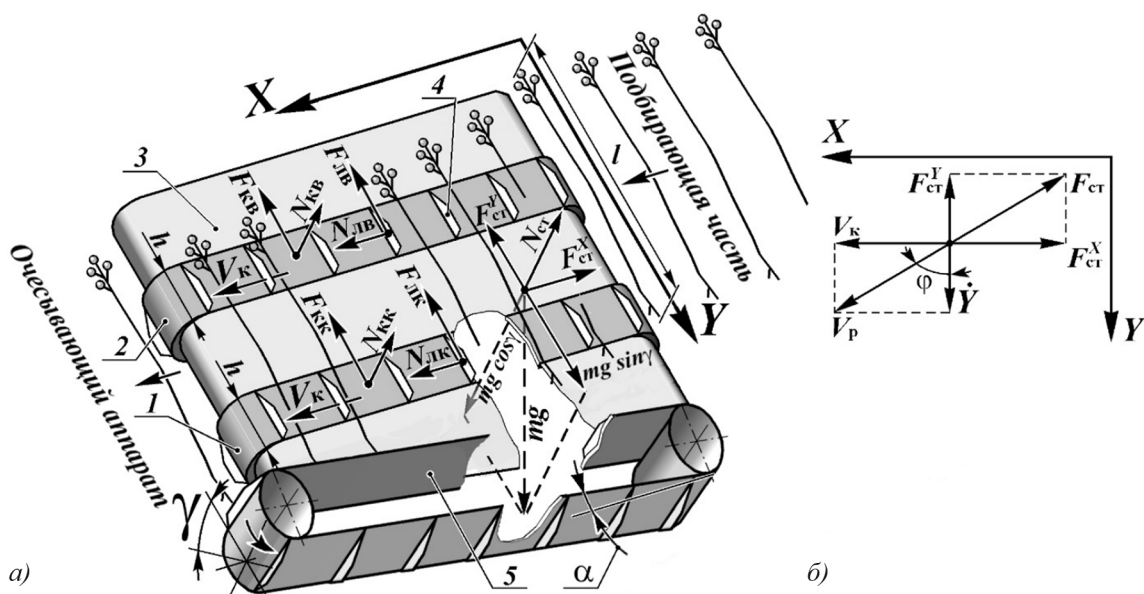


Рис. 1. Выравнивающее устройство: 1 – конвейер транспортирующий, комлевой; 2 – конвейер транспортирующий, верхний; 3 – стол; 4 – лопасти; 5 – конвейер выравнивающий; а – распределение сил, действующих на растение; б) распределение скоростей движения растения по поверхности стола ВУ (V_k – скорость конвейеров 1 и 2; \dot{Y} – проекция скорости растения V_p на ось Y , $N_{лв}$ и $N_{лк}$ – силы воздействия лопастей верхнего и комлевого конвейеров на растении).

На протяжении многих веков лен был особенно важен для экономики России на самых разных этапах ее политической истории. До 1936 г. Россия была главным поставщиком льняного сырья на мировой рынок и производила около 80 % мирового урожая [1]. Наряду с высокой экономической значимостью, возделывание льна-долгунца – высокозатратное производство. При этом уборка всегда была наиболее трудоемким и энергоемким процессом, который коренным образом влиял на жизнеспособность отрасли [2].

Из всех известных способов уборки льна особого внимания заслуживает двухфазная (раздельная) технология. Ее привлекательность состоит в возможности одновременного получения высококачественной волокнистой продукции и семенного материала при минимальных затратах энергоносителей и времени на сушку и переработку льновороха. Главный недостаток раздельной уборки – зависимость ее второй фазы от погодных условий, что связано с низкой технологической надежностью существующих подборщиков-очесывателей или подборщиков-молотилок при отделении семян с увлажненных растений [3]. Поэтому при раздельной уборке существует определенная вероятность потери семенной части урожая даже при незначительном количестве осадков. Снизить такую зависимость и приравнять обозначенную вероятность к уровню комбайновой уборки возможно при использовании гребневого очесывающего аппарата, надежно работающего в широком диапазоне влажности и спелости растений [4]. Однако это сопряжено с появлением дополнительных помех, сгенерированных ошибками горизонтального копирования ленты растений льна подбирающим рабочим органом. Такие помехи мешают эффективной работе подборщика-очесывателя со снижением чистоты очеса семян до 88,4 % [5]. Поэтому для обеспечения нормальных условий функционирования гребневого очесывающего аппарата при выполнении второй фазы раздельной уборки следует исправлять указанные ошибки перед отделением семян от растений. С учетом этого было предложено [5] использование в конструкции подборщиков-очесывателей

выравнивающего устройства для ориентированной подачи растительной массы в очесывающий аппарат (далее выравнивающее устройство или ВУ), выполненного на основе известного выравнивателя стеблей льна [6, 7] и установленного между подбирающей частью и очесывающим аппаратом машины (рис. 1).

Принцип действия ВУ основан на смещениях ленты растений льна по наклонному столу 3 в двух противоположных направлениях – вниз или вверх. Смещение растений вниз до упора комлями в поверхность выравнивающего конвейера 5 обусловлено влиянием силы тяжести. Сдвигание растительной массы вверх происходит под воздействием того же конвейера, поверхность которого выполнена с подъемом на угол α относительно направления движения конвейеров 1 и 2. Смещение ленты растений вниз необходимо для исправления ошибок копирования, возникших в результате отклонений подбирающего рабочего органа от ленты льна в сторону ее комлевой части, а вверх – при отклонениях в сторону вершин. Все указанные смещения происходят в процессе передачи ленты растений лопастями 4 конвейеров 1 и 2 от подбирающей части к очесывающему аппарату подборщика-очесывателя. В любом случае величина этих смещений должна быть достаточной для устранения помех, характеризующихся систематической ошибкой горизонтального копирования ленты растений льна подбирающим рабочим органом $m_{\Delta} = -11,0 \dots +11,4$ см [8].

Возможность сдвигания растительной массы вверх под влиянием рабочей ветви выравнивающего конвейера 5 сомнений не вызывает, так как сила этого воздействия несоизмеримо больше силы тяжести и возникающих при этом сил трения. Для обеспечения такого движения ведущий шкив на входе выравнивающего конвейера 5 за счет угла α установлен ниже его выходного шкива на 15 см. Обозначенный размер гарантированно превышает возможный диапазон систематических отклонений подбирающего рабочего органа от ленты растений в сторону ее верхинной части.

Однако поведение стеблевой массы в ВУ под комбинированным влиянием силы тяжести, конструкционных

элементов и множества технологических факторов малоизучено и поэтому нуждается в изучении и обосновании.

Цель исследования – обоснование параметров и режимов работы выравнивающего устройства для ориентированной подачи ленты растений в очесывающий аппарат при двухфазной уборке льна-долгунца.

Методика. Поскольку состояние структурных параметров ленты растений льна зависит от множества случайных факторов, значения которых невозможно предсказать с высокой степенью точности, то допускаем проведение теоретических исследований поведения ленты льна в ориентирующем устройстве на примере единичного растения.

Известно, что движение любого физического тела по наклонной поверхности под действием силы тяжести зависит от угла наклона этой поверхности к горизонту и коэффициента трения скольжения, а путь, пройденный телом, ограничивается отрезком времени такого движения. Кроме того, движение растений в выравнивающем устройстве происходит также под воздействием элементов его конструкции и возникающих при этом дополнительных внешних сил (см. рис. 1). Для обоснования параметров и режимов работы ВУ спроецируем все эти силы на оси X и Y . Сгруппировав полученные проекции по обозначенным направлениям, имеем систему дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{X} &= N_{лв} + N_{лк} - F_{ст}^X; \\ m\ddot{Y} &= mg \cdot \sin\gamma - F_{ст}^Y - (F_{лв} + F_{лк}) - (F_{кв} + F_{кк}) \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где m – масса растения, г; \ddot{X} – ускорение растения в горизонтальном направлении, m/c^2 ; $N_{лв}$ и $N_{лк}$ – силы воздействия лопастей вершинного и комлевого конвейеров на растение, Н; $F_{ст}^X$ – проекция силы трения растения по металлической поверхности стола на ось X , Н; \ddot{Y} – ускорение растения в направлении наклона стола (ось Y), m/c^2 ; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; γ – наклон стола к горизонту, град.; $F_{ст}^Y$ – проекция силы трения растения по металлической поверхности стола на ось Y , Н; $F_{лв}$ и $F_{лк}$ – силы трения растения по металлической поверхности лопастей вершинного и комлевого конвейеров, Н; $F_{кв}$ и $F_{кк}$ – силы трения растения по резиновой поверхности вершинного и комлевого конвейеров, Н.

Далее следует раскрыть физическую сущность всех слагаемых системы уравнений (1).

Сила трения растения по металлической поверхности неподвижного стола ВУ определяется по выражению:

$$F_{ст} = N_{ст} \cdot f_{ст}, \quad (2)$$

где $N_{ст}$ – реакция поверхности стола, Н; $f_{ст}$ – коэффициент трения скольжения растения по металлической поверхности стола.

С учетом того, что стебель растения контактирует с поверхностью стола только частью своей длины, реакция опоры будет пропорциональна указанной части:

$$N_{ст} = mg \frac{l-H}{l} \cos\gamma, \quad (3)$$

где l – длина льняного стебля, м; H – суммарная ширина рабочих поверхностей вершинного и комлевого конвейеров выравнивающего устройства, $H=2h$, м (см. рис. 1).

Коэффициент пропорциональности $\frac{l-H}{l}$ определяет часть длины растения, контактирующую с поверхностью стола.

Выражение (2) в развернутом виде будет иметь следующий вид:

$$F_{ст} = mg \frac{l-H}{l} \cos\gamma \cdot f_{ст}. \quad (4)$$

Проекции силы трения $F_{ст}$ на оси X и Y будут равны (см. рис. 1б) соответственно:

$$F_{ст}^X = F_{ст} \cdot \sin\varphi, \quad (5)$$

$$F_{ст}^Y = F_{ст} \cdot \cos\varphi, \quad (6)$$

где φ – направление движения растения по отношению к оси Y , град.

Сила трения растения о металлическую поверхность лопастей будет равна:

$$F_{л} = N_{л} \cdot f_{л}, \quad (7)$$

где $N_{л} = N_{лв} + N_{лк}$ – суммарная сила воздействия лопастей вершинного и комлевого конвейеров на растение льна, Н; $f_{л}$ – коэффициент трения скольжения растения по металлической поверхности лопастей.

Поскольку движение транспортирующих конвейеров происходит только в направлении оси X с постоянной скоростью V_k , то ускорение \ddot{X} растений под воздействием лопастей этих конвейеров в указанном направлении будет равно нулю. Тогда из первого уравнения системы (1) имеем:

$$N_{лв} + N_{лк} = N_{л} = F_{ст}^X. \quad (8)$$

С учетом (4), (5) и (8) выражение (7) примет вид:

$$F_{л} = mg \frac{l-H}{l} \cos\gamma \cdot f_{ст} \cdot \sin\varphi \cdot f_{л}. \quad (9)$$

Сила трения стебля по рабочим поверхностям транспортирующих конвейеров пропорциональна доле $\frac{H}{l}$ длины растения, которая находится в контакте с указанными рабочими органами:

$$F_{кв} + F_{кк} = mg \frac{H}{l} \cos\gamma \cdot f_k, \quad (10)$$

где f_k – коэффициент трения скольжения растений по резиновой поверхности транспортирующих конвейеров.

Поскольку анализируемое действие ВУ основано на смещении растительной массы вниз по наклонному столу под влиянием силы тяжести, то дальнейшие исследования этого движения будем проводить только в направлении оси Y . При этом сумма проекций всех рассмотренных сил, действующих на растения в указанном направлении, будет равна:

$$m\ddot{Y} = mg \cdot \sin\gamma - \frac{mg}{l} \cdot \cos\gamma [f_{ст} \cdot (l-H)(\cos\varphi + f_{л} \cdot \sin\varphi) + f_k \cdot H]. \quad (11)$$

Направление движения растения по отношению к оси Y с учетом направления скорости транспортирующих конвейеров определяем из треугольника скоростей (см. рис. 1б):

$$\cos\varphi = \frac{\dot{Y}}{\sqrt{\dot{Y}^2 + V_k^2}} \text{ и } \sin\varphi = \frac{V_k}{\sqrt{\dot{Y}^2 + V_k^2}}. \quad (12)$$

Используя полученные выражения (12), представим ускорение растения в направлении оси Y в виде нелинейного дифференциального уравнения второго порядка:

$$\ddot{Y} = g \cdot \sin\gamma - \cos\gamma \left[f_k \frac{gH}{l} + f_{ст} \frac{g(l-H)}{l} \left(\frac{f_{л} \cdot V_k + \dot{Y}}{\sqrt{V_k^2 + \dot{Y}^2}} \right) \right]. \quad (13)$$

Из уравнения (13) видно, что смещение растения в направлении оси Y при работе ВУ зависит от наклона стола – γ , ширины конвейеров – H , коэффициентов трения растений по рабочим поверхностям устройства – f_k , $f_{ст}$, $f_{л}$ и скорости конвейеров – V_k .

Анализ полученной зависимости выполняли с использованием числовых значений исследуемых параметров, представленных в литературных источниках [9, 10].



Рис. 2. Подборщик-очесыватель ПОЛ-1,5К в работе: а) вид спереди; б) процесс выравнивания ленты льна.

При этом угол наклона стола исследовали в диапазоне значений от 40 до 60°. Нижний предел этого параметра обусловлен особенностями конструкции выравнивающего устройства, верхний – условием вертикальной устойчивости стеблевой массы.

Ширину H транспортирующих конвейеров учитывали в долях единицы от длины стебля l . Для реализации

нижнего предела ($H=0$) можно использовать колковый транспортер, тогда подавляющая часть длины растения будет контактировать с неподвижной поверхностью стола. В другом крайнем случае, при $H=1$ – вся поверхность стола служит транспортирующим конвейером, и растение всей своей длиной l и массой m будет воздействовать на его поверхность.

Следует учесть, что при раздельной уборке сбор семян должен быть успешно реализован и в условиях ненастья [11]. Поэтому для практических расчетов необходимо использовать максимальные величины коэффициентов трения скольжения влажных стеблей по резине ($f_k = 0,6 \dots 0,9$) и по стали ($f_n = f_{ст} = 0,4 \dots 1,0$). В связи с тем, что указанные значения различаются несущественно, то было принято решение об использовании в расчетах обобщенного коэффициента f , изменяющегося в пределах от 0,4 до 1,0.

Диапазон исследуемых скоростей движения транспортирующих конвейеров выравнивающего устройства ($V_k = 1,5 \dots 3,0$ м/с) продиктован условием нерастягивания ленты льна в переходных зонах на выходе из подбирающей части подборщика-очесывателя и на входе в зажимной транспортер очесывающего аппарата. При этом скорость ремней зажимного транспортера очесывающего аппарата составляет 1,5 м/с, а ремней подбирающей части подборщика-очесывателя – 3 м/с.

Для практической оценки результатов теоретических исследований использовали корреляционно-спектральный анализ процесса выравнивания ленты льна с помощью ВУ при работе макетного образца подборщика-очесывателя ПОЛ-1,5К (рис. 2).

В ходе выполнения программы исследований решали следующие задачи:

- получить информацию в виде реализаций процессов изменения ординаты вершинной части ленты льна $y_b(t)$ на входе и выходе ВУ при работе подборщика-очесывателя ПОЛ-1,5К;

- выполнить корреляционно-спектральный анализ входного и выходного процессов $y_b(t)$;

- оценить качество работы ВУ.

Объект исследований – процесс выравнивания ленты растений льна при работе подборщика-очесывателя ПОЛ-1,5К.

Сбор необходимой информации проводили путем видеосъемки при работе подборщика-оборачивателя в производственных условиях опытного поля Кост-

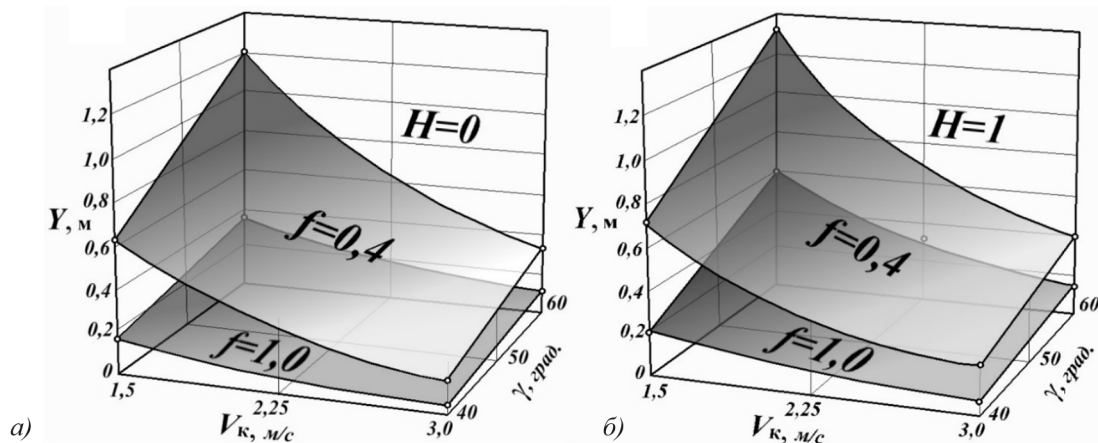


Рис. 3. Зависимость смещения стеблей от исследуемых факторов: а) применение колкового транспортера; б) транспортирующий конвейер вся поверхность стола ВУ.

Числовые характеристики процессов $y_a(t)$ (вход) и $y_b(t)$ (выход)

Процесс	m_y , см	σ_y , см	$\sigma_{\text{доп}}$	V_y , %	$V_{\text{доп}}$, %	τ_0 , с	$\omega_{\text{ор}}$, с ⁻¹	$\omega_{\text{ср}}$, с ⁻¹
$y_a(t)$ (вход)	50,9	7,22	4,06	14,18	8,11	2,1	0...0,84	3,30
$y_b(t)$ (выход)	46,7	3,33		7,13		7,8	0...0,04	0,30

ромской ГСХА. Положения ленты на входе и выходе ВУ регистрировали в режиме покадрового воспроизведения видеозаписи через каждые пять кадров, то есть с интервалом $\Delta t=0,1$ с.

Для анализа использовали 600 ординат с длиной реализации $T=60$ с. Собранную информацию обрабатывали методом оценки временных рядов на ПЭВМ в среде Excel с применением программы STATGRAPHICS Plus 5.0. При этом вычисляли математические ожидания – m_y , дисперсии – D_y , средние квадратические отклонения – σ_y , коэффициенты вариации – V_y , нормированные корреляционные функции – $\rho_y(\tau)$ и спектральные плотности – $\sigma_y(\omega)$. Параметры корреляционных функций оценивали по времени τ_0 исчезновения корреляционной связи, а спектральные плотности – по частоте среза $\omega_{\text{ср}}$ и частоте $\omega_{\text{ор}}$, на которую приходится максимум частотного спектра. Качество работы выравнивающего устройства определяли по вероятности P_{Δ} нахождения ординат выходного процесса в заданном поле допуска β [12, 13]. В нашем случае приняли $\beta=0,1$ и $P_{\Delta}=0,8$. При этом допустимые значения коэффициента вариации и среднего квадратичного отклонения были соответственно равны $V_{\text{доп}}=8,11\%$, $\sigma_{\text{доп}}=4,06$ см.

Результаты и обсуждение. С использованием уравнения (13) и значений исследуемых параметров были построены графические зависимости смещения несцепленных стеблей в направлении наклона стола выравнивающего устройства от исследуемых факторов (рис. 3).

Визуализация зависимости (13) наглядно свидетельствует о заметном смещении растений в ВУ подборщика-очесывателя в направлении оси Y , что следует считать положительным фактом. Причем наибольшее смещение наблюдается в зоне минимальных скоростей движения конвейеров ($V_k = 1,5$ м/с) и коэффициентов трения ($f = 0,4$). Увеличение угла наклона стола до 60° и расширение конвейеров также способствует активизации исследуемого процесса, особенно на пониженных скоростях. При работе машины на более сухой ленте влияние ширины конвейеров уменьшается.

При этом сопоставление возможных значений систематических ошибок копирования ленты растений льна прицепными подборщиками с полученными результатами [8] свидетельствует, что выравнивающее устройство

способно успешно выполнять свои функции во всем диапазоне факторного пространства.

Проверка полученных результатов в реальных условиях функционирования уборочного агрегата подтвердила эффективность нового рабочего органа. Результаты корреляционно-спектрального анализа (см. табл.) и характер реализаций исследуемых процессов (рис. 4) обозначили существенные положительные изменения во внутренней структуре процесса под влиянием работы ВУ подборщика-очесывателя.

При работе ВУ наблюдаются заметные смещения ленты, особенно при тех отклонениях, которые появились в результате подбора ленты за комлевую часть. Вместе с тем, на участке с 23,3 по 23,7 секунды представленного фрагмента отчетливо видна фильтрация противоположных отклонений, возникших в результате подбора ленты за ее верхнюю часть. Таким образом, рабочий процесс ВУ осуществляется как в результате смещения стеблевой массы вниз под действием силы тяжести, так и благодаря сдвиганию вверх рабочей ветвью выравнивающего конвейера, выполненной под наклоном α . Отмеченные положительные изменения подтверждает двукратное сокращение диапазона разброса ординат исследуемого процесса на выходе из ВУ. При этом характер выходных колебаний стал более плавный с увеличением интервала корреляции τ_0 от 2,1 до 7,8 с и узкополосный с фильтрацией спектра дисперсий в диапазоне частот от 0,3 до 3,3 с⁻¹. Отфильтрованные колебания были следствием ошибок копирования ленты льна подборщиком. За пределами фильтрации остались лишь низкочастотные колебания вершинной части ленты льна, которые возникли на этапе возделывания льна в результате формирования стеблестоя, неравномерного по длине гона, из-за несоблюдения агротехнических требований [14].

Поскольку фактические значения среднего квадратичного отклонения и коэффициента вариации выходного процесса $y_b(t)$ (см. табл.) находятся в допустимых пределах, то качество работы выравнивающего устройства оценивается положительно.

Таким образом, принцип действия выравнивающего устройства для ориентированной подачи растительной массы в очесывающий аппарат основан на смещениях ленты льна по наклонной поверхности стола под влия-

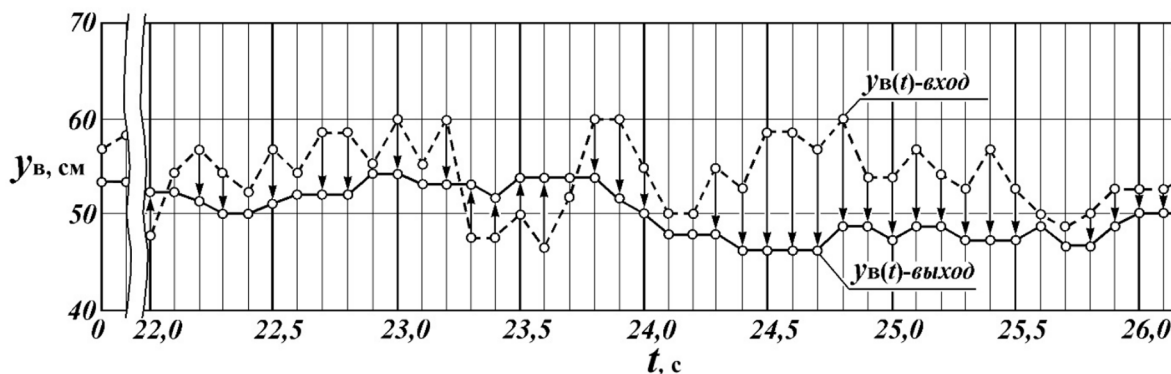


Рис. 4. Фрагмент реализации процесса выравнивания ленты льна в ВУ подборщика-очесывателя ПОЛ-1,5К.

нием силы тяжести и (или) под воздействием рабочей поверхности выравнивающего конвейера. Результаты теоретических исследований показали, что предложенное устройство наиболее эффективно работает с сухими растениями на минимальных скоростях движения конвейеров $V=1,5$ м/с и при максимальных углах наклона стола $\gamma=60^\circ$. При работе на увлажненных лентах активизации исследуемого процесса будут способствовать более широкие конвейеры ($H \rightarrow \max$). Полученные значения смещений во всем факторном пространстве превышают диапазон обозначенных ранее ошибок, что свидетельствует о возможности выравнивания ленты растений льна перед подачей в очесывающий аппарат подборщика-очесывателя. Результаты корреляционно-спектрального анализа процесса выравнивания ленты льна в реальных условиях функционирования уборочного агрегата продемонстрировали существенное сглаживание выходных колебаний с увеличением интервала корреляции τ_0 от 2,1 до 7,8 с и фильтрацией спектра дисперсий в диапазоне частот от 0,3 до 3,3 с⁻¹. Отфильтрованные колебания были следствием ошибок копирования ленты льна подборщиком, что подтверждает эффективность работы выравнивающего устройства.

Литература

1. Akin D.E. *Linen Most Useful: Perspectives on Structure, Chemistry, and Enzymes for Retting Flax* / *International Scholarly Research Notices*. Vol. 2013, Article ID 186534. 2013. URL: <https://www.hindawi.com/journals/isrn/2013/186534/> (дата обращения: 04.06.2022). doi: 10.5402/2013/186534.
2. Основные проблемы научного обеспечения льноводства / Р.А. Ростовцев, В.Г. Черников, И.В. Уцаповский и др. // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т.14. №3. С. 45-52. doi: 10.22314/2073-7599-2020-14-3-45-52.
3. Поздняков Б.А. Актуальные направления совершенствования системы машин для уборки льна-долгунца // *Техника и оборудование для села*. 2019. № 8 (266). С. 2–6. doi: 10.33267/2072-9642-2019-8-2-6.
4. Галкин А.В., Фадеев Д.Г., Уцаповский И.В. Исследование качественных характеристик льноволокна в зависимости от конструкции очесывающего аппарата // *Вестник Мордовского университета*. 2018. Т. 28. №3. С. 389-399. doi: 10.15507/0236-2910.028.201803.389-399.
5. Научные аспекты повышения эффективности процессов очеса семенных коробочек при двухфазной уборке льна-долгунца / Ю.Ф. Лачуга, А.Н. Зинцов, М.М. Ковалев и др. // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2022. №1. С. 53-58. doi: 10.31857/S2500262722010094.
6. Зинцов А.Н., Ковалев М.М., Перов Г.А. Вероятностная модель кинематики устройства для уменьшения растянутости стеблей льна-долгунца в ленте // *Инженерные технологии и системы*. 2022. Т. 32. № 1. С. 126–144. doi: 10.15507/2658-4123.032.202201.126-144.
7. Исследование инновационного процесса комлеподбивания стеблей в слое при оборачивании лент льна-долгунца / А.Н. Зинцов, М.М. Ковалев, В.Н. Соколов и др. // *Наука в центральной России*. 2021. №4(52). С. 40-50. doi: 10.35887/2305-2538-2021-3-40-50
8. Зинцов А.Н. Ошибки копирования ленты стеблей льна-долгунца прицепными подборщиками // *Вестник АПК Верхневолжья*. 2017. №2. С.84-87.
9. Контактное и трение стеблей льна в льноуборочных машинах / И.И. Беркович, М.В. Крюков, Л.В. Родионов и др. // *Механика и физика фрикционного контакта: Межвуз. сб. науч. тр. / под ред. Н.Б. Демкина*. Тверь: ТГТУ, 2003. С. 10 – 104.
10. Ковалев Н.Г., Хайлис Г.А., Ковалев М.М. *Сельскохозяйственные материалы (виды, состав, свойства)*. М.: ИК «Родник», 1998. 208 с.
11. Льноуборочные машины / Г.А. Хайлис, Н.Н. Быков, В.Н. Бухаркин и др. М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
12. Лурье А.Б., Громбчевский А.А. Расчет и конструирование сельскохозяйственных машин. Л.: «Машиностроение» (Ленингр. отд-ние), 1977. 528 с.
13. Горлач Б. А. *Теория вероятностей и математическая статистика: учебно-методическое пособие*. Санкт-Петербург: Лань, 2022. 320 с.
14. Goudenhoofit C., Bourtaud A., Baley C. Flax (*Linum usitatissimum* L.) Fibers for Composite Reinforcement: Exploring the Link Between Plant Growth, Cell Walls Development, and Fiber Properties. Review article // *Front. Plant Sci*. 2019. No. 3. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2019.00411/full> (дата обращения: 10.06.2022). doi: 10.3389/fpls.2019.00411

Поступила в редакцию 07.07.2022

После доработки 01.09.2022

Принята к публикации 15.10.2022