

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 633.521:631.358

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-14-22>

Анализ динамической модели впускивателя лент льна

Г.А. Перов^{1✉}, М.М. Ковалев², Р.А. Ростовцев³, М.Г. Перов⁴, И.Л. Абрамов⁵^{1, 2, 3, 4, 5} Федеральный научный центр лубяных культур; г. Тверь, Россия¹ g.perov@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5830-6817>² m.kovalev@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2424-4205>³ r.rostovcev@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0368-1035>⁴ mexanikuspost@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0007-3847-3785>⁵ i.abramov@vniiml.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5777-2798>

Аннотация. Получение высококачественной льнотресты зависит от функционирования рабочих органов впускивателя лент льна и его конструкционных особенностей. Для более успешной модернизации агрегата предложили рассмотреть впускиватель лент льна как модель функционирования динамических систем, используя принцип системного анализа. Цель исследований – разработка динамической модели впускивателя лент льна как сложной динамической системы. Методика предполагала сравнительный анализ влияния структурных параметров микрорельефа поля на колебания впускивателя в горизонтальной и продольно-вертикальной плоскостях. Получена динамическая модель впускивателя и проведен глубокий анализ его динамики в полевых условиях. Тензометрирование провели на лентах вылежавшейся льнотресты при рабочей скорости разработанного экспериментального агрегата 2,2...5,0 м/с. Статистический анализ входного воздействия неровностей поверхности поля $Z(t)$ показал, что указанный процесс подчинен нормальному закону распределения и имеет низкочастотный характер: $\omega_c = 0...5 \text{ с}^{-1}$, причем процесс изменения входных воздействий $Z(t)$ вызывает колебания впускивателя в горизонтально-продольной и вертикально-продольной плоскостях, что изменяет высоту заглубления концов зубьев впускивающего барабана в поверхность льнища и выходные параметры качества работы. Разработаны устройства, обеспечивающие снижение влияния неровностей почвы $Z(t)$ на показатели качества работы за счет повышения плавности хода впускивателя. Изготовлен впускиватель лент льна с разработанными устройствами. Аprobация впускивателя с повышенной плавностью хода на площади 22 га при скоростях агрегата 4,2...5,5 м/с показала повышение надежности выполнения технологического процесса на 27% и показателей качества (полнота впускания – 98,8%, увеличение растянутости стеблей в ленте – 1,3%, увеличение неравномерности расстила ленты – 5,2%).

Ключевые слова: впускиватель лент льна; динамическая модель впускивателя; микрорельеф поля; повышение плавности хода; колебания впускивателя; корреляционная функция; спектральная плотность; полнота впускания

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания ФГБНУ ФНЦ ЛК № FGSS-2022-0005.

Для цитирования: Перов Г.А., Ковалев М.М., Ростовцев Р.А., Перов М.Г., Абрамов И.Л. Анализ динамической модели впускивателя лент льна // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 5. С. 14-22. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-14-22>

ORIGINAL ARTICLE

Analysis of the dynamic model of a flax stem strip fluffer

G.A. Perov¹✉, M.M. Kovalev², R.A. Rostovtsev³, M.G. Perov⁴, I.L. Abramov⁵^{1, 2, 3, 4, 5} Federal Research Center for Bast Fiber Crops; Tver, Russia¹ g.perov@fncl.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-5830-6817>² m.kovalev@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2424-4205>³ r.rostovtsev@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0368-1035>⁴ mexanikuspost@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0007-3847-3785>⁵ i.abramov@vniiml.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5777-2798>

Abstract. Obtaining a high-quality flax press depends on the work of the working tools of the flax stem strip fluffer and its design features. To improve the design of the unit, the authors proposed to consider a flax stem strip fluffer as a model for the functioning of dynamic systems using the principle of system analysis. The study purpose was to develop a dynamic model of a flax stem strip fluffer as a complex dynamic system. The methodology involved a comparative analysis of the effect of the structural parameters of the microrelief field on the oscillations of the fluffer in the horizontal and longitudinal-vertical planes. The authors obtained a dynamic model of the fluffer and carried out an in-depth analysis of its dynamics in field conditions. Strain gauge measurements were performed on flax stem strips that had been stored for some time at the working speed of the developed experimental unit, ranging from 2.2 to 5.0 m/s. Statistical analysis of the input surface irregularities $Z(t)$ showed that this process obeys a normal distribution law and has a low-frequency character: $\omega_c = 0$ to 5 s^{-1} . Moreover, the process of changing the input impacts $Z(t)$ causes horizontal-longitudinal and vertical-longitudinal oscillations of the fluffer, which alters the depth of engagement of the teeth ends of the fluffing drum with the flax surface and affects the output quality parameters. Devices were developed to reduce the influence of soil irregularities $Z(t)$ on quality indicators by increasing the smoothness of the fluffer operation. As a result, the authors manufactured a flax stem strip fluffer having the considered units. Testing the fluffing device with improved smoothness over an area of 22 hectares at speeds of 4.2 to 5.5 m/s demonstrated a 27% increase in process reliability and improvements in quality indicators (fluffing completeness – 98.8%, an increase in stem strip stretch – 1.3%, an increase in retting unevenness of stem strip – 5.2%).

Keywords: flax stem strip fluffer; dynamic model of the fluffer; field microrelief; increased smoothness of operation; fluffer oscillations; correlation function; spectral density; fluffing completeness

Funding: The research was funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the State assignment – Federal State Budgetary Scientific Institution – Federal Research Center for Bast Fiber Crops No. FGSS-2022-0005.

For citation: Perov G.A., Kovalev M.M., Rostovtsev R.A., Perov M.G., Abramov I.L. Analysis of the dynamic model of a flax stem strip fluffer. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(5):14-22 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-5-14-22>

Введение

Вспушиватель лент льна при работе в полевых условиях подвергается воздействию непрерывно изменяющихся нагрузок, обусловленных неровностью поверхности поля, исходными параметрами лент льнотресты, физико-механическими свойствами почвы и другими факторами, влияющими на показатели качества его работы.

Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные отечественными и зарубежными

учеными, определили широкий круг задач по эффективной вылежке стеблей льна в тресту, а также перечень необходимых технических средств^{1,2} [1, 2]. Процесс вспушивания лент льна является неотъемлемым элементом современных способов получения высококачественной льнотресты [3-6]. Процесс вспушивания зависит от конструктивных особенностей агрегата, функционирования его рабочих органов и взаимодействия их со стеблями льна [7-9]. Возникает необходимость глубокого анализа рабочих органов

¹ Ковалев М.М., Лачуга Ю.Ф. Ресурсосберегающая технология комбинированной уборки льна-долгунца // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2006. № 1. С. 77-80. URL: <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=33832400>.

² Инновационные технологии и технические средства нового поколения для производства и глубокой переработки лубяных культур / В.Г. Черников и др. М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2010. 149 с. EDN: OUKGXC.

вспушивателя [10] с целью выявления влияния их параметров на показатели эффективности его работы и обоснования путей их улучшения.

Применение принципа системного анализа сложных технических систем и изучение вспушивателя лент льна как модель функционирования динамических систем будут способствовать более успешной модернизации агрегата^{3, 4, 5, 6} [11]. В данных исследованиях все свойства вспушивателя рассматриваем в единой системе. При этом важнейшими условиями будут являться сбор и обработка информации.

Цель исследований: разработка динамической модели вспушивателя лент льна как сложной динамической системы.

Материалы и методы

Заменяем систему вспушивателя лент льна микроуровневыми составляющими, то есть проведем декомпозицию сложной системы (рис. 1).

Отдельные элементы системы (микроуровни) объединены общим блоком (А-В), показывающим их неразрывную связь. Качество работы как вспушивателя в целом, так и его отдельных рабочих органов, оценивается как абсолютной, так и относительной растянутостью лент, углом перегиба стеблей в ленте и другими параметрами, от которых зависит выход длинного волокна при переработке на льнозаводе.

На этапе теребления стебли льна взаимодействуют с рабочими органами уборочных машин, в результате

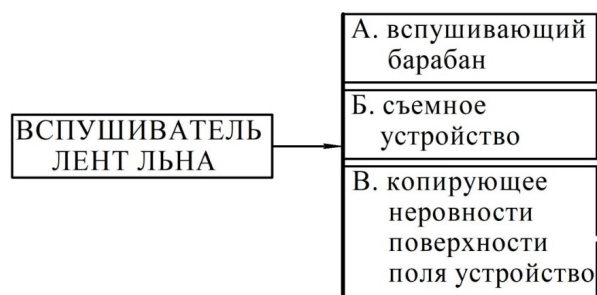


Рис. 1. Графическое изображение вспушивателя лент льна

Fig. 1. Graphic representation of a flax stem strip fluffer

чего появляется неоднородность лент. Вытеребленные ленты льна характеризуются растянутостью стеблей в ленте (1,14 раза), что на 0,02% больше ярсности стеблестоя (1,12 раза), углом отклонения стеблей в ленте до 12° и неравномерностью расстила ленты – более 20% [3]. Все эти показатели являются исходными, так как при выполнении последующих операций по приготовлению льнотресты происходит их увеличение по отношению к исходным [3].

При вспушивании должна сохраняться прямолинейность ленты и должны быть исключены перепутывание и сгуживание стеблей. Согласно ГОСТ⁷ контролируются следующие показатели: полнота вспушивания (P_B) – не менее 95%; увеличение угла отклонения стеблей в ленте (α_n) – не более 8,0°; увеличение растянутости стеблей в ленте (λ_n) – не более 5,0%; увеличение неравномерности расстила стеблей в ленте (H_n) – не более 10,0%; увеличение разрывов в ленте (P_n) – не более 2,5%; повреждение стеблей, влияющих на выход длинного волокна (P_d), – не более 1,5%.

В технологическом процессе эти показатели вспушивателя могут изменяться на всех микроуровнях (А-В) (рис. 1) в сторону как увеличения, так и уменьшения. При прохождении ленты льна через микроуровни Б и В (рис. 1) получаем дополнительное увеличение угла отклонения стеблей и неравномерности расстила. Увеличение этих показателей отрицательно влияет на выход длинного волокна⁸ [12, 13].

Модель объекта исследований содержит рабочие органы вспушивателя лент льна (Р.О.), рабочую среду (ленты льна) (Р.С.), с которой они взаимодействуют по технологии (С) и их взаимосвязи (рис. 2).

В векторе входных воздействий $X(t)$ учитываются исходные показатели лент, полученных при тереблении льна. В векторе выходных характеристик $Y(t)$ подразумевается выход длинного волокна, зависящий от показателей качества работы вспушивателя ($Y_1(t)$, $Y_2(t)$, $Y_3(t)$, $Y_4(t)$, $Y_5(t)$, $Y_6(t)$).

Для формализации процесса вспушивания ленты льна с помощью дедуктивного метода построим

³ Черушева Т.В., Зверовщикова Н.В. Динамические системы: Учебное пособие. Пенза: Изд-во ПГУ, 2020. 294 с. URL: https://dep_vipm.pnzgu.ru/files/dep_vipm.pnzgu.ru/books/cherusheva_2020_dinamsist.pdf?ysclid=m9v3xv0duc689349751 (дата обращения: 24.04.2025)

⁴ Чернышов В.Н., Чернышов А.В. Теория систем и системный анализ: Учебное пособие. Тамбов: Изд-во Тамбовского государственного технического университета, 2008. 96 с. EDN: QMTTMV

⁵ Романов В.Н. Техника анализа сложных систем. СПб.: СЗТУ, 2011. 287 с. EDN: QMWEJL

⁶ ГОСТ 21878-76. Случайные процессы и динамические системы. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1976. 33 с. URL: <https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&id=159319&ysclid=mcykw4lou7265631093> (дата обращения: 11.07.2025).

⁷ ГОСТ 33734-2016. Техника сельскохозяйственная. Комбайны и машины для уборки льна. Методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2017. 50 с.

⁸ Ипатов А.М. Теоретические основы механической обработки стеблей лубяных культур. М.: Легпромиздат, 1989. 137 с. URL: https://korobkaknig.ru/promishl_proizvod/legkaya_prom/teoreticheskie-osnovy-mehanicheskoy-obrabotki-steblej-lubyanyh-kultur-60680.html/ (дата обращения: 24.04.2025)

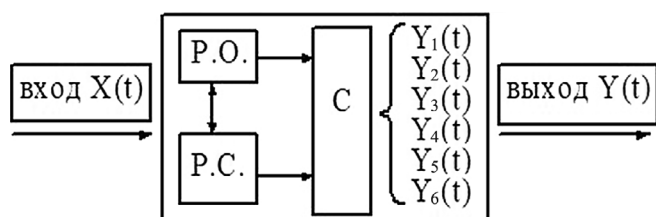


Рис. 2. Модель объекта исследований:

P.O. – рабочие органы вспушивателя лент льна;
P.C. – рабочая среда (ленты льна); C – технология;
 $X(t)$ – вектор входных воздействий;
 $Y(t)$ – вектор выходных характеристик;
 $Y_1(t), Y_2(t), Y_3(t), Y_4(t), Y_5(t), Y_6(t)$ –
выходные характеристики нижнего уровня

Fig. 2. Model of the research object:

P.O. – working tools of the flax stem strip fluffer;
R.S. – working environment (flax stem strips);
C – technology; $X(t)$ – vector of input effects;
 $Y(t)$ – vector of output characteristics;
 $Y_1(t), Y_2(t), Y_3(t), Y_4(t), Y_5(t), Y_6(t)$ –
output characteristics of the lower level

диаграмму воздействий в виде «дерева»^{9, 10, 11}. В диаграмме за главное событие B принят «выход длинного волокна». Предпосылкой этого события является наличие ленты льна, полученной в результате работы вспушивателя на поле, она является предпосылкой первого уровня и обозначена как 1. К возникновению предпосылки 1 приводит выполнение предпосылок второго уровня: F, G, H. Предпосылка F воспроизводится при событиях A или D, C или E. Под событием C закладываем условие – короткостебельный лен на поле, под событием E – длинностебельный лен на поле, A – лен густой, D – лен редкий.

Минимальное пропускное комбинирование, содержащее наименьшее число событий и предпосылок, наглядно показывающих путь к возникновению

главного события на примере увеличения угла $\alpha(t)$ отклонения стеблей в ленте, отображено на рисунке 3.

Алгебра событий, отражая рисунок 3, будет иметь следующий вид:

$$B = 1 = F \cdot G \cdot H,$$

где $F = (A+D)(C+E) = AC + DC + AE + DE$.

Под событиями заложены условия: лен на поле; AC – густой короткостебельный; DC – редкий короткостебельный; AE – густой длинностебельный; DE – редкий длинностебельный.

Полученная аналитическая модель процесса вспушивания ленты ориентирована на совершенствование этого процесса и решение задач, связанных с модернизацией рабочих органов вспушивателя, на уменьшение растянутости ленты льна, поврежденных стеблей, уменьшение угла отклонения в ленте, повышение вспушивания ленты.

Эксперименты проводили на изготовленном опытном вспушивателе лент стеблей льна на полях Федерального научного центра лубяных культур (рис. 4).

На раме средней секции вспушивателя закрепили дополнительные кронштейны 1 с установленными на них тензодатчиками 2 и 3 (рис. 4a). В качестве датчика определения микрорельефа поля использовали ультразвуковой датчик HC-SR04. Для определения углов отклонения $\beta(t)$ и $\theta(t)$ вспушивателя в горизонтальной плоскости $O-X$ и продольно-вертикальной плоскости $O-Y$ использовали 3-осевой акселерометр ADXL345.

Управление прибором осуществляли при помощи программируемого микроконтроллера ATmega 328P Arduino Uno R3. Для управления микроконтроллером разработали собственное программное обеспечение. Прием данных с контроллера и их предварительная

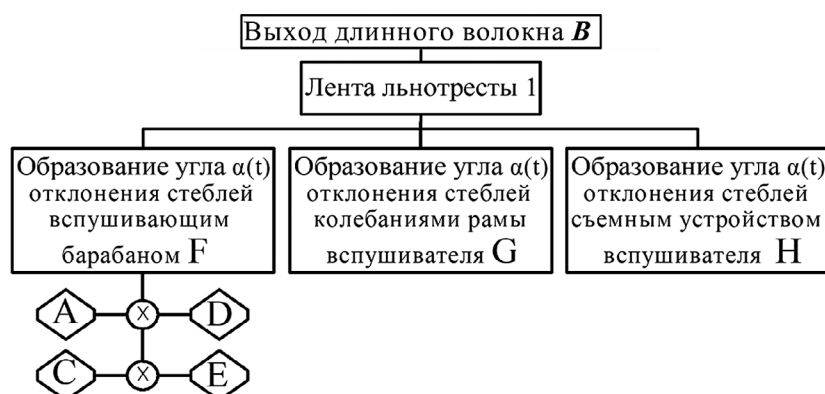


Рис. 3. «Дерево» событий процесса образования угла отклонения ленты

Fig. 3. “Tree” of events in the process of forming the deflection angle of the flax stem strips

⁹ Лурье А.Б. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 1981;

¹⁰ Черушева Т.В. Динамические системы: учеб. пособие / Т.В. Черушева, Н.В. Зверовщикова. Пенза: Изд-во ПГУ, 2020. 294 с..

¹¹ Чернышов В.Н. Теория систем и системный анализ учеб. пособие / В.Н. Чернышов, А.В. Чернышов. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. 2008. 96 с. EDN: QMTTMV.



Рис. 4. Полевая установка вдушивателя для тензометрирования:

а) расположение датчиков на средней секции; б) настройка аппаратуры;

1 – кронштейны датчиков; 2 – датчик определения микрорельефа поля;

3 – датчик определения колебаний секции в горизонтальной ОХ и продольно-вертикальной ОУ плоскостях

Fig. 4. Field installation of a strain gauge:

a) location of the sensors on the middle section; b) configuration of the equipment;

1 – sensor brackets; 2 – sensor for determining the field microrelief;

3 – sensor for determining the vibrations of the section in the horizontal OX and longitudinal-vertical OY planes

обработка осуществлялись на ПЭВМ в программном пакете Microsoft Excel 2019. Тензометрирование проводили на лентах вылежавшейся льнотресты при скорости агрегата 2,2...5,0 м/с.

Методика предполагала сравнительный анализ влияния структурных параметров микрорельефа поля $Z(t)$ на колебания $\beta(t)$ вдушивателя в горизонтальной плоскости $O-X$ и $\theta(t)$ продольно-вертикальной плоскости $O-Y$.

Общим для всех льноуборочных агрегатов является модель движения, учитывающая профиль поверхности поля $Z_H(t)$ и сопротивление $R(t)$ движению (компоненты входного вектора)^{12,13} [14, 15].

Динамическая модель вдушивателя представлена на рисунке 5.

Для вдушивателя составляющими входного вектора $\vec{F}_B$ будут: микрорельеф поля $Z(t)$; количество стеблей на 1 м² $U(t)$; ширина ленты $L(t)$; угол отклонения стеблей в ленте $\alpha(t)$; растянутость стеблей в ленте $\lambda(t)$; высота расположения ленты $h(t)$; влажность стеблей в ленте $w(t)$.

Выходными $\vec{Y}_B$ составляющими, определяющими технологические показатели (показатели качества его работы), будут являться полнота вдушивания P_B , увеличение угла отклонения стеблей в ленте $\alpha(t)$,

увеличение растянутости стеблей в ленте $\lambda(t)$, увеличение неравномерности расстила $H(t)$, увеличение разрывов в ленте $P_L(t)$, повреждения стеблей $\Pi_L(t)$.

Вектор $\vec{L}_B$, отражающий динамику технологического процесса вдушивателя, включает толщину ленты на зубьях вдушивающего барабана $L_B(t)$, колебания вдушивателя в горизонтальной плоскости $O-X$ $\beta(t)$, колебания вдушивателя в продольно-вертикальной плоскости $O-Y$ $\theta(t)$, колебания рамы вдушивателя $\alpha(t)$.

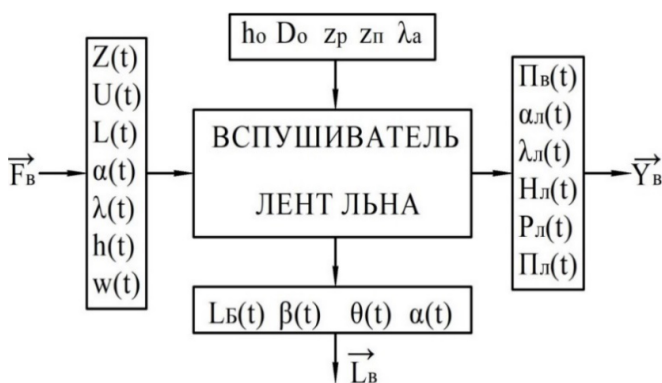


Рис. 5. Динамическая модель вдушивателя лент льна

Fig. 5. Dynamic model of a flax stem strip fluffer

¹² Лурье А.Б. Статистическая динамика сельскохозяйственных агрегатов. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Колос, 1981. 382 с.; Черников В.Г., Перов Г.А., Ростовцев А.А. и др. Информационные параметры автоматизации, сигнализации и контроля режимов работы льноуборочных машин // Внедрение инновационных разработок в целях повышения экономической эффективности в льняном комплексе России: Материалы Международной научно-практической конференции (г. Вологда, 23 июня 2011 г.) Вологда, 2010. С. 136-140.

¹³ Горлач Б.А. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебно-методическое пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2022. 320 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/211082> (дата обращения: 25.04.2025).

В качестве управляемых параметров модели выбраны высота заглабления конца зуба впускающего барабана в поверхность льнища h_o , диаметр впускающего барабана D_o , количество зубьев в ряду z_p и количество рядов зубьев на барабане z_n , показатель кинематического режима λ_a .

Результаты и их обсуждение

В результате лабораторно-полевых опытов получили экспериментальные данные профиля микрорельефа поля и колебаний впускавателя в горизонтальной и продольно-вертикальной плоскостях. После их обработки статистическим пакетом STADIA-8.0¹⁴ получены математическое ожидание m_x , дисперсия D_x , корреляция $\rho(\tau)$ и спектральная плотность $\sigma(\omega)$. Согласно результирующим уровням значимости всех критериев ($P \gg 0,05$) принимаем гипотезу о нормальном распределении неровностей микрорельефа поля.

На основе числовых характеристик m_x , σ_x получили нормированные корреляционные функции $\rho(\tau)$ и спектральные плотности $\sigma(\omega)$ (рис. 6), изучили внутреннюю структуру и характер протекания входного воздействия $Z(t)$. Из характера кривых следует, что неровности поверхности поля как функция воздействия на впускаватель лент льна носят низкочастотный характер с $\omega = 1,0 \text{ с}^{-1}$ и $\omega = 3,0 \text{ с}^{-1}$. Полоса существенных частот ω_c лежит в пределах $0 \dots 5 \text{ с}^{-1}$, что соответствует 1,27 Гц.

Неровности поверхности льнища, являясь входным воздействием на впускаватель лент льна, вызывают его колебания в горизонтальной плоскости $O-X$ и продольно-вертикальной плоскости $O-Y$, изменяя при этом высоту h_o заглабления конца зуба

впускающего барабана в ленту льнотресты, что приводит к нестабильности технологического процесса впускавания.

Анализируя параметры $\beta(t)$ и $\theta(t)$, отражающие динамику технологического процесса впускавателя, видим, что полученные значения носят случайный характер. Среднее значение угла $\beta(t)$ составляет $4,14^\circ$, угла $\theta(t) - 0,914^\circ$ при среднеквадратичном отклонении $\sigma_x = 17,47^\circ$ и $\sigma_y = 17,56^\circ$. Такой значительный разброс колебаний впускавателя в горизонтальной и продольно-вертикальной плоскостях создает условия резкопеременных нагрузок на зубья впускавателя, его раму и отрицательно влияет на технологический процесс. В то же время на основании результирующих уровней значимости всех критериев ($P > 0,05$) можно принять гипотезу о нормальном распределении колебаний впускавателя в горизонтальной $O-X$ и продольно-вертикальной $O-Y$ плоскостях.

Нормированная корреляционная функция $\rho(\tau)$ и спектральная плотность $\sigma(\omega)$ колебаний $\beta(t)$ и $\theta(t)$ представлены на рисунках 7, 8. Характер кривых $\rho(\tau)$ и $\sigma(\omega)$ показывает, что колебания $\beta(t)$ и $\theta(t)$ носят низкочастотный характер, что отрицательно отражается на надежности агрегата и технологического процесса. Статистические характеристики $Z(t)$, $\beta(t)$ и $\theta(t)$ приведены в таблице.

Для более достоверного представления влияния неровностей поверхности поля (льнища) $Z(t)$ на колебания впускавателя в горизонтальной плоскости $\beta(t)$ и продольно-вертикальной плоскости $\theta(t)$ был проведен однофакторный дисперсионный анализ, который показал, что колебания впускавателя в целом различны на уровне значимости $6,64 \cdot 10^{-4}$. Последующий анализ парных сравнений Шеффе выявил

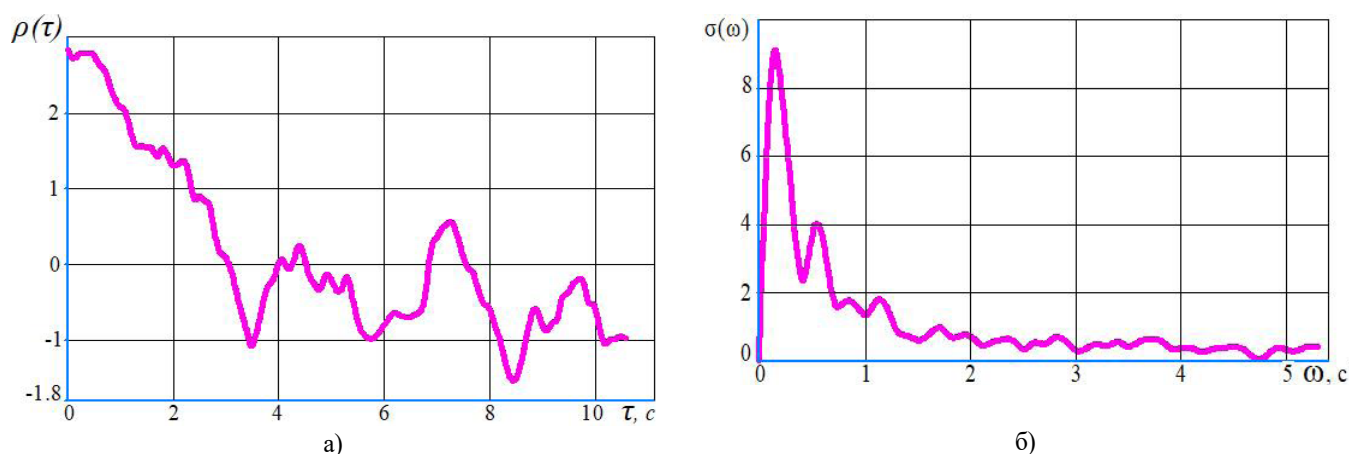


Рис. 6. Графики нормированной корреляционной функции $\rho(\tau)$ (а) и спектральной плотности $\sigma(\omega)$ (б)

Fig. 6. Graphs of the normalized correlation function $\rho(\tau)$ (a) and spectral density $\sigma(\omega)$ (b)

¹⁴ Кулаичев А.П. Полное собрание сочинений: В 3 т. Т. 1. Методы и средства анализа данных в среде Windows. STADIA. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Информатика и компьютеры, 1999. 341 с.

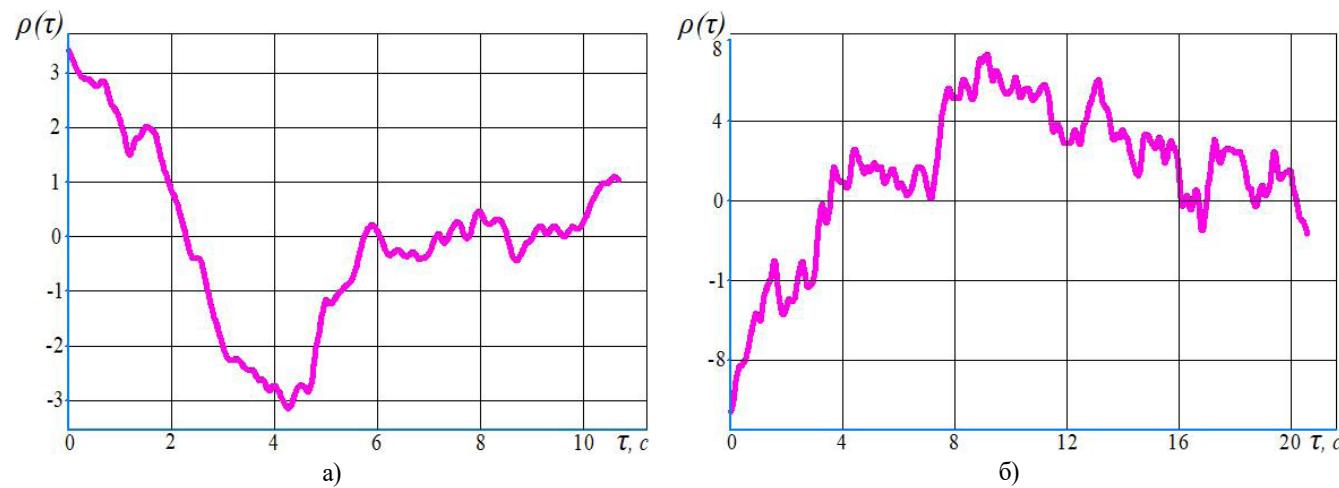


Рис. 7. График нормированной корреляционной функции $\rho(\tau)$ в горизонтальной плоскости O-X (a) и продольно-вертикальной плоскости O-Y (б)

Fig. 7. Graph of the normalized correlation function $\rho(\tau)$ in the horizontal plane O-X (a) and the longitudinal-vertical plane O-Y (b)

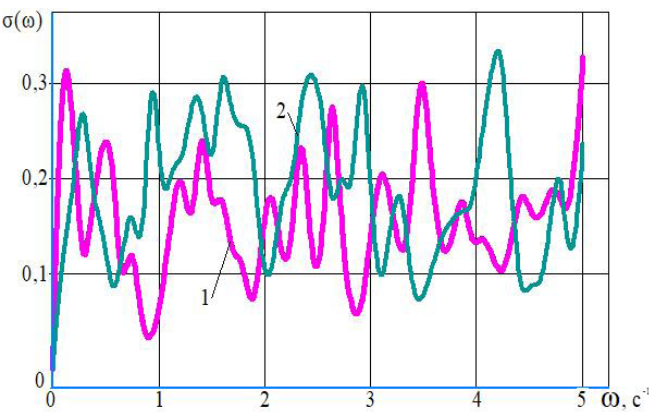


Рис. 8. График спектральной плотности $\sigma(\omega)$:
1 – $\beta(t)$ в горизонтальной плоскости O-X;
2 – $\theta(t)$ в продольно-вертикальной плоскости O-Y

Fig. 8. Graph of the spectral density $\sigma(\omega)$
1 – $\beta(t)$ in the horizontal plane O-X;
2 – $\theta(t)$ in the longitudinal-vertical plane O-Y

значимые отличия колебаний $\theta(t)$ от $Z(t)$. Тем самым эти колебания, видимо, в большей степени вызваны колебаниями $\beta(t)$. Дополнительное сравнение двух групп не выявляет значимых влияний.

По результатам исследований разработаны устройства, обеспечивающие снижение влияния фактора $Z(t)$ за счет повышения плавности хода вспушивателя. Изготовлен вспушиватель лент льна (патент № 231710) [16] с разработанными устройствами (рис. 9).

Апробация вспушивателя в условиях производства на площади 22 га при скорости агрегата 4,2...5,5 м/с показала повышение надежности выполнения технологического процесса на 27% за счет повышения плавности хода и улучшения показателей качества. Полнота вспушивания составила 98,8%, увеличение растянутости стеблей в ленте – 1,3%, увеличение неравномерности расстила ленты – 5,2%.

Статистические характеристики

Таблица

Table

Statistical characteristics

Параметр Parameter	Значение параметра Parameter value		Математическое ожидание, m Mathematical expectation, m	Спектральная плотность, σ Spectral density, σ	$V, \%$
	min	max			
Микрорельеф поля, $Z(t)$, см / Field microrelief, $Z(t)$, cm	-5,5	5,5	0,3237	2,092	15,470
Колебания вспушивателя в горизонтальной плоскости, $\beta(t)$ Fluffer oscillations in horizontal plane, $\beta(t)$,	-41,4	51,9	-4,1390	17,470	23,690
Колебания вспушивателя в продольно-вертикальной плоскости, $\theta(t)$ Fluffer oscillations in longitudinal-vertical plane, $\theta(t)$	-50,5	40,7	0,9100	17,560	5,182



Рис. 9. Высокопроизводительный вспушиватель лент льна: общий вид (а); в работе (б)
Fig. 9. High-performance flax stem strip fluffer: general appearance (a); in operation (b)

Выводы

1. Впервые вспушиватель лент льна рассмотрен как модель функционирования сложных динамических систем, разработана его динамическая модель.

2. Статистический анализ входного воздействия (неровности поверхности поля $Z(t)$) показал его низкочастотный характер ($\omega_c = 0 \dots 5 \text{ с}^{-1}$) и подчинение нормальному закону распределения. Установлено, что изменение $Z(t)$ вызывает колебания вспушивателя

в горизонтальной и продольно-вертикальной плоскостях, что изменяет высоту заглубления концов зубьев вспушивающего барабана в поверхность льнища и выходные параметры качества работы.

3. Разработанные устройства, снижающие влияние неровности почвы $Z(t)$ за счет повышения плавности хода вспушивателя, позволили повысить надежность выполнения технологического процесса на 27% и увеличить полноту вспушивания до 98,8%.

Список источников

1. Поздняков Б.А., Великанова И.В. Актуальные проблемы формирования организационно-экономического механизма модернизации льняного подкомплекса // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. 2019. № 10. С. 53-55. <https://doi.org/10.31442/0235-2494-2019-0-10-53-55>
2. Ростовцев Р.А., Черников В.Г., Ущеповский И.В., Попов Р.А. Основные проблемы научного обеспечения льноводства // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2020. Т. 14, № 3. С. 45-52. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-3-45-52>
3. Перов М.Г. Анализ состояния и пути повышения качества льнотресты // Наука в центральной России Science in the central Russia. 2022. Т. 58, № 4. С. 53-61. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-4-53-61>
4. Перов М.Г., Ковалев М.М., Перов Г.А. Совершенствование технологии приготовления льнотресты росяной мочкой // Наука в центральной России Science in the Central Russia. 2025. Т. 75, № 3. С. 43-52. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2025-3-43-52>
5. Зинцов А.Н., Ковалев М.М., Перов Г.А. Анализ процессов формирования и сохранения прямолинейности лент растений при уборке льна // Инженерные технологии и системы. 2025;35(2):284-297. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.284-297>
6. Mańkowski J., Maksymiuk W., Spychalski G. et al. Research on new technology of fiber flax harvesting. Journal of Natural Fibers. 2018;15(1):53-61. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1302390>
7. Новиков М.А., Павлов С.Б. Анализ процесса работы ворошилки лент льна // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2021. № 1 (62). С. 190-198. <https://doi.org/10.24412/2078-1318-2021-1-190-198>
8. Зинцов А.Н., Соколов В.Н. Новый процесс вспушивания лент льнотресты // Тракторы и сельхозмашины. 2020. № 6. С. 91-100. <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2020-6-91-100>
9. Ковалев М.М., Перов М.Г., Перов Г.А., Галкин А.В. Инновационный вспушиватель лент стеблей

References

1. Pozdnyakov B.A., Velikanova I.V. Actual problems of formation of organizational and economic mechanism for modernization of flax subcomplex. *Economika selskokhozyaystvennykh i pererabatyvayushchikh predpriyatiy*. 2019;10:53-55. (In Russ.) <https://doi.org/10.31442/0235-2494-2019-0-10-53-55>
2. Rostovtsev R.A., Chernikov V.G., Ushchapovsky I.V., Popov R.A. The main problems of scientific support of flax growing. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020;14(3):45-52. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-3-45-52>
3. Perov M. Analysis of the state and ways to improve the quality of flax. *Science in the Central Russia*. 2022;58(4):53-61. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2022-4-53-61>
4. Perov M., Kovalev M., Perov G. Analysis of flax seed preparation technologies and their features. *Science in the Central Russia*. 2025;75(3):43-52. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2025-3-43-52>
5. Zintsov A.N., Kovalev M.M., Perov G.A. Analyzing the process of formation and retaining of straightness of flax stem strips during flax harvesting. *Engineering Technologies and Systems*. 2025;35(2):284-297. (In Russ.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.035.202502.284-297>
6. Mańkowski J., Maksymiuk W., Spychalski G. et al. Research on new technology of fiber flax harvesting. *Journal of Natural Fibers*. 2018;15(1):53-61. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1302390>
7. Novikov M.A., Pavlov S.B. Analysis of the operating process of the flax tedder. *Izvestiya Saint-Petersburg State Agrarian University*. 2021;1(62):190-198. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2078-1318-2021-1-190-198>
8. Zintsov A.N., Sokolov V.N. New process for fluffing rotted straw. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2020;6:91-100. (In Russ.) <https://doi.org/10.31992/0321-4443-2020-6-91-100>
9. Kovalev M.M., Perov M.G., Perov G.A., Galkin A.V. Innovative fiber flax stalk fluffer. *Selskiy Mekhanizator*. 2023;8:10-12. (In Russ.) <https://doi.org/10.47336/0131-7393-2023-8-10-11-12>

льна-долгунца // Сельский механизатор. 2023. № 8. С. 10-12. <https://doi.org/10.47336/0131-7393-2023-8-10-11-12>

10. Зинцов А.Н., Билан М.М. О необходимости совершенствования процесса вспушивания лент тресты льняной // Аграрный вестник Нечерноземья. 2022. № 2 (6). С. 38-44. https://doi.org/10.52025/2712-8679_2022_02_38

11. Зубина В.А., Годжаев Т.З. Сравнительный анализ методов решений оптимизационных задач для сельскохозяйственного машиностроения // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 1. С. 11-16. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-1-11-16>

12. Петраченко Д.А., Коропченко С.П. Влияние подготовительных операций в процессе формирования слоя на выход длинного волокна // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. 2014. № 5-6. С. 56-58. EDN: SKODJP

13. Зинцов А.Н., Ковалев М.М., Перов Г.А. и др. Влияние процессов вспушивания ленты стеблей льна на структурные параметры слоя // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 4. С. 542-557. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.542-557>

14. Черников В.Г., Ростовцев Р.А., Романенко В.Ю. Исследование технологий уборки льна льноуборочными машинами // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2023. Т. 17, № 1. С. 19-24. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-19-24>

15. Абрамов И.Л., Ковалев М.М., Перов Г.А. Моделирование микрорельефа поверхности почвенного слоя для уточненных расчетов рабочих органов на прочность // Наука в центральной России. 2024. № 2 (68). С. 77-85. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-77-85>

16. Вспушиватель лент льна: Патент № 231710 Российская Федерация, МПК A01D45/06 (2006.01) / Г.А. Перов, Р.А. Ростовцев, М.М. Ковалев, М.Г. Перов; завл. 25.07.2024; опубл. 06.02.2025, Бюл. № 4.

Информация об авторах

¹ Перов Геннадий Анатольевич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; g.perov@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5830-6817>; SPIN-код: 4478-4991

² Ковалев Михаил Михайлович, д-р техн. наук, главный научный сотрудник; m.kovalev@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2424-4205>; SPIN-код: 6189-8619

³ Ростовцев Роман Анатольевич, д-р техн. наук, чл.-корр. РАН, профессор РАН; директор; r.rostovtsev@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0368-1035>; SPIN-код: 9513-1220

⁴ Перов Михаил Геннадьевич, научный сотрудник; mexanikuspost@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0007-3847-3785>; SPIN-код: 3839-6192

⁵ Абрамов Игорь Львович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; i.abramov@vniiml.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5777-2798>; SPIN-код: 9735-923

^{1, 2, 3, 4, 5} Федеральный научный центр лубяных культур; 170041, Российская Федерация, г. Тверь, Комсомольский пр-т, 17/56

Вклад авторов

Г.А. Перов – методология, проведение исследований, формальный анализ, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование;
М.М. Ковалев – концептуализация, руководство исследованиями;
Р.А. Ростовцев – методология и администрирование проекта;
М.Г. Перов – проведение исследований, формальный анализ и верификация данных, создание черновика рукописи;
И.Л. Абрамов – разработка программного обеспечения и проведение исследований.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Статья поступила 07.05.2025, после рецензирования и доработки 26.08.2025; принята к публикации 29.08.2025

10. Zintsov A.N., Bilan M.M. On the need to improve the process of fluffing flax linen ribbons. *Agrarian Bulletin of Non-Chernozem Area*. 2022;2(6):38-44. (In Russ.) https://doi.org/10.52025/2712-8679_2022_02_38

11. Zubina V.A., Godzhayev T.Z. Comparative analysis of methods for solving optimization problems in agricultural engineering. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(1):11-16. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-1-11-16>

12. Petrachenko D.A., Koropchenko S.P. Influence of the preparatory operations on the process of layer forming on the output of long fibre. *Austrian Journal of Technical and Natural Sciences*. 2014;5-6:56-58. (In Russ.)

13. Zintsov A.N., Kovalev M.M., Perov G.A., Perov M.G., Dobretsov V.A. Influence of the processes of fluffing the flax stem strips on the structural parameters of the layer. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(4):542-557. (In Russ.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.542-557>

14. Chernikov V.G., Rostovtsev R.A., Romanenko V.Yu. Flax Harvesting Technologies for Flax Harvesting Machines. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2023;17(1):19-24. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2023-17-1-19-24>

15. Abramov I., Kovalev M., Perov G. Modeling the microrelief of the surface of the soil layer for refined calculations of working bodies for strength. *Science in the Central Russia*. 2024;68(2):77-85. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-77-85>

16. Perov G.A., Rostovtsev R.A., Koval M.M., Perov M.G. Flax stem strip fluffer: patent No. 231710 Russian Federation, IPC A01D45/06 (2006.01); applied on July 25, 2024; published on February 2, 2025.

Author Information

Gennady A. Perov¹, CSc (Eng), Lead Research Engineer; g.perov@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5830-6817>

Mikhail M. Kovalev², DSc (Eng), Chief Research Engineer; m.kovalev@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2424-4205>

Roman A. Rostovtsev³, DSc (Eng), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences; Director; r.rostovtsev@fncl.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0368-1035>

Mikhail G. Perov⁴, Research Associate; mexani-kuspost@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0007-3847-3785>

Igor L. Abramov⁵, CSc (Eng), Lead Research Engineer; i.abramov@vniiml.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5777-2798>

^{1, 2, 3, 4, 5} Federal Scientific Center for Bast Crops; 17/56 Komsomolskiy Ave., Tver, 170041, Russian Federation

Author Contribution

G.A. Perov – methodology, research, formal analysis, writing – manuscript review and editing;
M.M. Kovalev – conceptualization, research supervision;
R.A. Rostovtsev – methodology, project administration;
M.G. Perov – investigation, formal analysis and verification of data, writing – original draft;
I.L. Abramov – software, investigation.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism.

Received 07.05.2025; Revised 26.08.2025; Accepted 29.08.2025