

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

Оригинальная статья / Original article
УДК 631.358:633.526.41

doi: 10.15507/2658-4123.034.202403.350-369



Результаты камеральных работ по отделению семенных коробочек льна-долгунца при очесе на корню гребенками однороторного очесывающего барабана

С. В. Соловьёв✉, В. Г. Черников,
Р. А. Ростовцев, В. Ю. Романенко
ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур»
(г. Тверь, Российская Федерация)
✉ s.solovyov@fncl.ru

Аннотация

Введение. Низкая чистота очеса семенных коробочек растений льноуборочными машинами является проблемой в технологической операции при уборке льна-долгунца. Анализ конструкций гребенок очесывающих устройств позволил выявить основные недостатки, не позволяющие в полном объеме обеспечить агротехнические требования при уборке льна-долгунца, поэтому предложена инновационная конструкция съемной гребенки для однороторных жаток барабанного типа.

Цель исследования. Определить чистоту очеса стеблей льна-долгунца при очесе на корню съемными очесывающими гребенками однороторного очесывающего барабана.
Материалы и методы. Изготовлена экспериментальная установка, которая позволяет смоделировать процесс очеса льна на корню гребенками однороторного очесывающего барабана. За период с 2018 по 2023 год были исследованы и обоснованы конструктивные параметры и режимы работы очесывающего устройства. Разработана методика проведения многофакторного эксперимента по определению чистоты очеса льна-долгунца очесывающим устройством барабанного типа с размещенными на нем съемными гребенками.

Результаты исследования. Представлены результаты камеральных работ по отделению семенных коробочек от стеблей льна-долгунца на корню съемными очесывающими гребенками с целью определения качества очеса. Установлено, что чистота очеса растений льна-долгунца на корню составляет до 99,2 %.

Обсуждение и заключение. При очесе растений льна-долгунца сорта Надежда на корню съемными гребенками однороторного барабана в лабораторных условиях были изучены физико-механические свойства стеблей, определены оптимальные режимы работы очесывающего барабана, которые обеспечивают чистоту очеса стеблей выше 98 %, что соответствует агротехническим требованиям, предъявляемым к льнокомбайнам.

© Соловьёв С. В., Черников В. Г., Ростовцев Р. А., Романенко В. Ю., 2024



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Ключевые слова: съемная очесывающая гребенка, лен-долгунец, чистота очеса, установочный зазор, очесывающий барабан

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания ФГБНУ ФНИЦ ЛК (№ FGSS-2022-0005).

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам за ценные замечания и предложения, сделанные при рецензировании статьи.

Для цитирования: Результаты камеральных работ по отделению семенных коробочек льна-долгунца при очесе на корню гребенками однороторного очесывающего барабана / С. В. Соловьёв [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2024. Т. 34, № 3. С. 350–369. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.350-369>

The Results of the Laboratory Study on the Separating Fiber Flax Seed Balls when Combing the Standing Plants with a Single-Rotor Comb-Dresser

S. V. Solovyov[✉], V. G. Chernikov,

R. A. Rostovtsev, V. Yu. Romanenko

Federal Research Center for Bast Fiber Crops (CBFC)

(Tver, Russian Federation)

[✉] s.solovyov@fncl.ru

Abstract

Introduction. The low purity of combing flax seed balls with flax harvesters is a problem for the technological operation when harvesting fibre flax. The analysis of the comb designs of the combing units made it possible to identify the main disadvantages that do not fully meet the agrotechnical requirements for harvesting fiber flax. An innovative design of a removable comb for single-rotor drum-type harvesters is proposed.

Aim of the Study. The study is aimed at determining the purity of combing the standing fiber flax stems using a single-rotor comb-dresser with removable combs.

Materials and Methods. There has been made an experimental setup to simulate the process of combing standing fiber flax plants with combs of a single-rotor comb dresser. During the period from 2018–2023, the design parameters and operating modes of the combing unit were investigated and justified. There has been developed a technique for conducting a multifactorial experiment to determine the purity of combing fiber flax using a combing drum-type unit with removable combs.

Results. The results of laboratory studies on the separating flax balls from the standing fiber flax stems by removable combs are presented to determine the combing quality. It has been found that the purity of combing fiber flax plants is up to 99.2%.

Discussion and Conclusion. When studying the technological process of combing Nadezhda standing fiber flax plants the with single-rotor drum removable combs, the physico-mechanical properties of the flax stems were studied in laboratory conditions, the optimal operating modes of the combing drum were determined, which ensure the purity of the stems above 98% that meets the agrotechnical requirements for flax combines.

Keywords: removable combing comb, flax, combing purity, installation gap, combing drum

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Funding: The work was carried out with the support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of the State Assignment of the Federal State Budgetary Educational Institution FNC LC (No. FGSS-2022-0005).

Acknowledgments: The authors express their gratitude to the reviewers for the valuable comments and suggestions made during the review of the article.

For citation: Solovyov S.V., Chernikov V.G., Rostovtsev R.A., Romanenko V.Yu. The Results of the Laboratory Study on the Separating Fiber Flax Seed Balls when Combining the Standing Plants with a Single-Rotor Comb-Dresser. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(3):350–369. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202403.350-369>

Введение. Наиболее трудоемким и затратным процессом в льноводстве является уборка, на долю которой, в зависимости от принятой технологии, приходится 65–80 % затрат труда, 55–75 % денежных затрат и до 40 % затрат энергии.

Одной из основных технологических операций при уборке льна-долгунца является отделение семенной части – коробочек от стеблей. Очес влияет на показатели потери семян и соломы, выход и качество волокна, состав вороха, трудоемкость и энергоемкость процессов его сушки и переработки.

Процесс очеса растений льна-долгунца заключается в отделении семенных коробочек от стеблей, при этом механические воздействия очесывающих рабочих органов на слой стеблей приводят к деформации семенных коробочек с их частичным или полным разрушением.

До начала 2000-х гг. в России и Белоруссии лен-долгунец преимущественно убирался при помощи льноуборочных комбайнов. Данная технология имела ряд недостатков. Анализируя многолетние испытания льнокомбайна ЛК-4 на машиностроительных станциях, определили, что общие невозвратимые потери семян составляют в среднем 6,63 %, что выше допускаемых по агротехническим требованиям норм. Небольшая ширина захвата (1,52 м) и рабочая скорость (до 7 км/ч) снижают производительность агрегата до 1 га/ч. По современным меркам это не допустимо, так как приходится увеличивать сроки уборки, количество задействованной техники и человеческого ресурса. Кроме этого, на выходе мы получаем льноворох с семенами, который нуждается в дальнейшей переработке.

Технология уборки льна-долгунца методом очеса на корню имеет ряд достоинств перед уборкой льнокомбайном. Использование серийных зерноуборочных комбайнов дает большой экономический эффект за счет ухода от узконаправленной льноуборочной техники и позволяет получить первично очищенные семена. Применение серийных очесывающих жаток с шириной захвата от 4 до 8 м обеспечивает высокую производительность и позволяет значительно сократить сроки уборки, что очень актуально при плохих погодных условиях.

В этой связи задача по обоснованию и разработке малозатратной и эффективной технологии уборки льна путем очеса растений на корню серийными жатками, которые агрегируются с зерноуборочным комбайном, является актуальной.

Агротехнические требования к процессу очеса на корню идентичны требованиям, предъявляемым к льноуборочным комбайнам: семенной материал (ворох)

должен быть отделен от растений с чистотой не менее 98 % и содержанием пуха не более 3 % [1], после воздействия рабочих органов льноуборочной техники стебли должны сохранять свою целостность и природную прочность [2].

Цель исследования заключается в определении чистоты очеса стеблей льна-долгунца при очесе на корню съемными очесывающими гребенками однороторного очесывающего барабана.

Обзор литературы. Инновационный способ уборки льна-долгунца разработан ФГБНУ ФНЦ совместно с ПАО «Пензмаш»¹. Новизна технических решений подтверждена патентом на изобретение № 2693728 [3].

Данный способ позволяет осуществлять первичную очистку семян непосредственно в процессе уборки льна, а также производить формирование ленты из очесанных стеблей поперечным транспортером и ее расстил на льнище. Производственные испытания данного способа показали, что очес растений не в полной мере удовлетворяет агротехнические требования, предъявляемые к льнокомбайнам. Это обусловлено применением серийных очесывающих гребенок. Многофункциональный агрегат, состоящий из зерноуборочного комбайна, оснащенного очесывающей жаткой с теребильным аппаратом, представлен на рисунке 1.



Р и с. 1. Общий вид многофункционального агрегата
F i g. 1. General view of the multifunctional unit

Источник: фотография сделана автором при полевых испытаниях инновационного способа уборки льна-долгунца на полях «Шексна», Шекснинского района, Вологодской области в 2019 г.

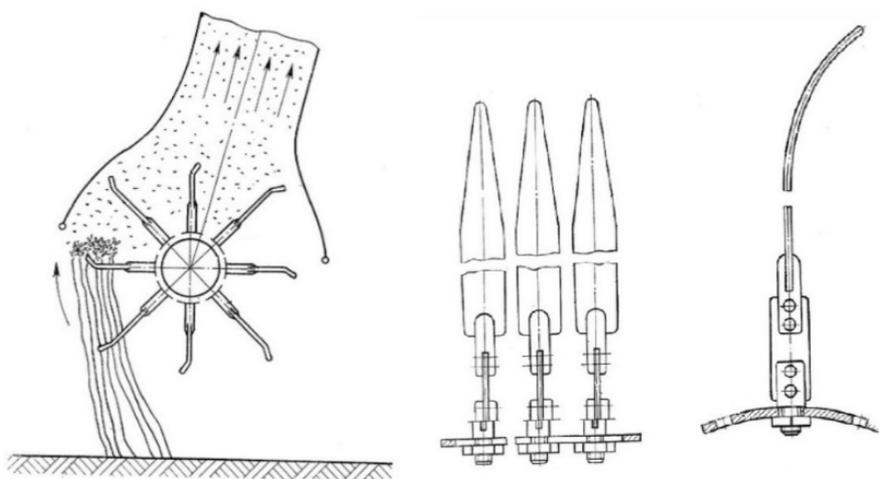
Source: the photo is taken by the author during field testing of an innovative method of harvesting fiber flax in the fields of “Sheksna”, Sheksninsky district, Vologda region in 2019.

¹ Очесывающая жатка «Озон» [Электронный ресурс]. URL: <https://penzmash.ru/root/tehnicheskie-harakteristiki-zhatki-ozon>. (дата обращения: 25.01.2024).

Анализ конструкций очесывающих гребенок позволил выявить основные недостатки, которые влияют на чистоту очеса и не обеспечивают агротехнические требования при уборке льна-долгунца [4–6].

Известен рабочий орган для очесывания верхушек растений [7] (рис. 2). Он содержит барабан, на котором жестко закреплены кронштейны, соединенные с очесывающими пальцами пластинами посредством болтового или заклепочного соединения [8]. Очесывающие пальцы представляют собой пластины с изогнутым профилем.

Основным недостатком данного устройства при уборке лубяных культур льна-долгунца является низкая чистота очеса семенных коробочек, образование намоток на места крепления очесывающих пальцев, а также потери в местах крепления очесывающих пальцев с барабаном [8].



Р и с. 2. Рабочий орган для очеса верхушек растений

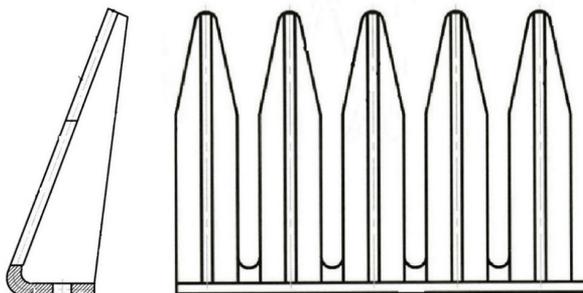
F i g. 2. Working body for combing the tops of plants

Источник: составлено по [8].

Source: is compiled from [8].

Известна гребенка (рис. 3). Она имеет вид пластины с изогнутым профилем, основание которой служит для крепления гребенки с очесывающим барабаном посредством болтового соединения, а отогнутая часть является рабочей поверхностью, которая имеет прорезь для очеса семенной части растений. Для жесткости гребенки установлены ребра [9].

Основной недостаток данной гребенки заключается в том, что прорези не обеспечивают свободный выход растений из них, в результате чего происходит заклинивание и отрыв верхней части. Это приводит к дополнительным энергозатратам процесса очеса, намоткам стеблей на очесывающий барабан и значительный отход стеблей в путанину [10]. Рабочий зазор гребенки выполнен по всей длине боковины, поэтому при транспортировке семян происходят потери.



Р и с. 3. Гребенка

F i g. 3. The comb

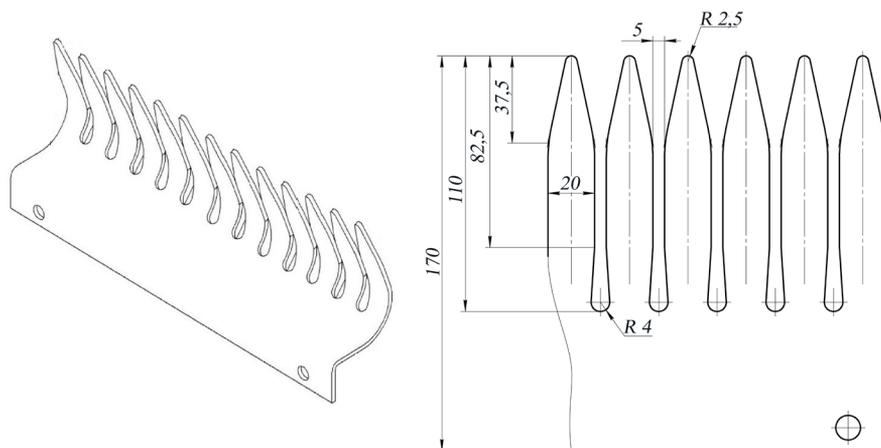
Источник: составлено по [10].
Source: is compiled from [10].

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что применяемые вышеописанные гребенки не в полной мере удовлетворяют агротехническим требованиям и не позволяют полностью обеспечить чистоту очеса льна-долгунца. Это обуславливает необходимость определения оптимальных конструктивных размеров и режимов работы очесывающего аппарата многофункционального агрегата для очеса растений льна на корню, для чего нами и было проведено настоящее исследование.

Материалы и методы. Лабораторные исследования проводились согласно методам и испытаниям комбайнов и льнокомбайнов, ГОСТ 33734-2016 [11].

Для решения поставленной задачи на базе ФГБНУ ФНЦ ЛК в период с 2018 по 2023 г. проводились теоретические исследования процесса очеса льна-долгунца на корню очесывающим устройством барабанного типа [2]. На их основании определены основные конструктивные параметры рабочего органа съемной очесывающей гребенки: ширина установочного зазора – 5 мм; оптимальная длина зуба очесывающей гребенки – 110 мм [12]. Также определены технологические режимы: скорость движения агрегата – 5 км/ч, при частоте вращения очесывающего барабана $6,16 \text{ с}^{-1}$. Определена зависимость установки очесывающего барабана от расположения семенных коробочек растений льна-долгунца.

На основании проведенных научных изысканий предложена конструкция съемной гребенки для однороторных жаток барабанного типа [13]. Съемная очесывающая гребенка представляет собой изогнутую под углом 90° пластину, основание которой служит для крепления гребенки к очесывающему барабану. Отогнутая поверхность имеет прорезы и зубья, при этом прорезы выполнены на расстоянии $\frac{3}{4}$ от вершины зубьев до линии изгиба пластины. Зубья имеют заострение сверху для входа в растительную массу и формирования слоя, далее переходят в прямой профиль, на котором происходит процесс очеса, и плавное расширение у основания, которое позволяет устранить заклинивание растений между зубьями и обеспечивает уменьшение энергозатрат процесса очеса [2]. В то же время прорезь выполнена не по всей длине боковины гребенки, что позволяет транспортировать семена без потерь. Съемная очесывающая гребенка изображена на рисунке 4.



Р и с. 4. Съемная гребенка для однороторной очесывающей жатки барабанного типа
F i g. 4. Removable comb for single-rotor drum-type combing harvester

Источник: схема составлена автором статьи в программе Компас-3D v17.

Source: the diagram was compiled by the author of the article with the use of Compass-3D v17 program.

На базе ФГБНУ ФНЦ ЛК изготовлена лабораторная установка, которая позволяет произвести камеральные исследования по определению качества чистоты очеса растений льна-долгунца на корню съемными гребенками, установленными на очесывающей жатке барабанного типа. Лабораторная установка представлена на рисунке 5, технические характеристики представлены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Технические характеристики лабораторной установки
Technical characteristics of the laboratory installation

№ п/п	Характеристика / Characteristic	Значение / Meaning
1	Диаметр очесывающего барабана по очесывающим гребенкам D, м / The diameter of the combing drum according to the combing combs D, m.	0,75
2	Количество рядов гребенок на барабане z, шт. / The number of rows of combs on the drum z, pcs.	8
3	Частота вращения очесывающего барабана n, с ⁻¹ / The rotation speed of the combing drum n, с ⁻¹	0–10
4	Линейная скорость зажимных-транспортирующих ремней V, м/с / Linear speed of the clamping and transporting belts V, m/s	0–2,5
5	Количество рядов растений, шт. / Number of rows of plants, pcs	1
6	Диапазон регулировки высоты установки растений льна-долгунца, м / The range of adjustment of the height of the installation of flax plants, m.	0–0,9



Р и с. 5. Общий вид лабораторной установки:

1 – энергетическая установка для привода транспортера с регулировкой скорости движения ремней зажимного транспортера через коробку переменных передач (КПП);
 2 – привод очесывающего устройства, включающий электродвигатель 1,1 кВт, 25 с⁻¹ и ременную передачу (передаточное отношение 1:2,5); 3 – карданная передача; 4 – транспортер зажимной (зажимные ремни); 5 – очесывающий барабан, смонтированный на раме с обтекателем;
 6 – приемная камера для сбора вороха; 7 – пульт управления с частотным преобразователем для регулировки частоты вращения очесывающего барабана; 8 – съемная очесывающая гребенка

Fig. 5. General view of the laboratory installation:

1 – power plant for driving a conveyor with speed control of the belts of the clamping conveyor through a variable transmission (gearbox); 2 – drive of the combing device, including an electric motor of 1.1 kW, 1 500 rpm and a belt drive (gear ratio 1:2.5); 3 – gimbal transmission; 4 – clamping conveyor (clamping belts); 5 – a combing drum mounted on a frame with a fairing; 6 – a receiving chamber for collecting piles; 7 – a control panel with a frequency converter to adjust the rotation frequency of the combing drum; 8 – a removable combing comb

Источник: фотографии для рисунков 5–10 сделаны автором при проведении камеральных исследований в научно-производственной лаборатории ФНЦ ЛК города Тверь в 2023 г.

Source: the photos 5–10 are taken by the author while conducting desk research in the research and manufacturing laboratory of the Federal Scientific Center for studying Fiber Corn in the city of Tver in 2023.

Установка имеет схожие технические характеристики с жаткой «Озон» производства ПАО «Пензмаш»² (таблица 2).

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

Технические характеристики жатки «Озон»
Technical characteristics of the header «Ozone»

№ п/п	Характеристика / Characteristic	Значение / Meaning
1	Диаметр очесывающего барабана по очесывающим гребенкам D, м / The diameter of the combing drum according to the combing combs D, m.	0,70
2	Количество рядов гребенок на барабане z, шт. / The number of rows of combs on the drum z, pcs.	10
3	Частота вращения очесывающего барабана n, с ⁻¹ / The rotation speed of the combing drum n, с ⁻¹	6,25–8,83
4	Ширина захвата, м / The width of the capture, m	4–10
5	Ширина установочного зазора между зубьями, мм / Width of installation gap between teeth, mm	7,5–8,0

Стебли льна долгунца устанавливали в зажимных ремнях транспортера 4 (рис. 5), который изготовлен из картера льнокомбайна ЛК-4 с удлиненными теребивильными секциями, привод осуществляется от энергетической установки 1 через карданную передачу 3.



Р и с. 6. Установка стеблей льна-долгунца для проведения эксперимента
F i g. 6. Installation of flax stems for conducting an experiment

² Очесывающая жатка «Озон» [Электронный ресурс]. URL: <https://penzmash.ru/root/tehnicheskie-harakteristiki-zhatki-ozon>. (дата обращения: 25.01.2024).

Регулировка линейной скорости транспортера осуществлялась через КПП, смонтированную совместно с энергетической установкой, диапазон скоростей от 0 до 2,5 м/с.

При проведении лабораторных работ растительная масса льна-долгунца, зажатая в зажимных ремнях, подавалась к очесывающему устройству 5, имеющему несущую раму, с установленным на нем очесывающим барабаном и закрепленными съемными гребенками 8 (рис. 5).

Привод очесывающего барабана осуществляется от электродвигателя 2 через ременную передачу. Диапазон регулировки частоты вращения очесывающего барабана от 0 до 10 с⁻¹ регулируется с пульта управления 7 частотным преобразователем ВЕСПЕР Е2-8300 (рис. 5) [2]. Замер частоты вращения очесывающего барабана производился цифровым универсальным тахометром марки МЕГЕОН-1800Х, показания снимались механическим путем с оси вращения барабана. Влажность материала для опытов была определена влагомером ИВЛТ-1, разработанным ФНЦ ЛК для оценки влажности тресты (рис. 7) [14]. Технические характеристики влагомера представлены в таблице 3. Влажность материала составила 43 %.



Р и с. 7. Измерение влажности стеблей
F i g. 7. Measuring the moisture content of stems

Отбор материала для проведения исследования проводился путем применения типичных, общепринятых методик с использованием приборов и оборудования в соответствии с ГОСТ. Растения собирались вручную с опытных делянок обособленного подразделения ОП НИИЛ г. Торжок, после чего материал связывали в снопы и доставляли в научно-производственную лабораторию ФНЦ ЛК.

Т а б л и ц а 3

T a b l e 3

Технические характеристики влагомера ИВЛТ-1
Technical characteristics of the IVLT-1 moisture meter

Наименование параметра / Name of the parameter	Значение / Meaning	
Диапазон измерения влажности льняной тресты (W – весовая влажность) / The humidity measurement range of linen trusts (W is the weight humidity)	1–55 %	
Пределы допускаемой погрешности измерения влажности / Limits of permissible error of humidity measurement	±2 % (в диапазоне влажности от 5 до 35 %) / (in the humidity range from 5 to 35%)	
Длительность периода одного измерения / The duration of the period of one measurement	1 с / s	
Габаритные размеры влагомера, мм: / Overall dimensions of the moisture meter, mm:	длина / length	180
	ширина / width	320
	высота / height	600
Масса влагомера, г / Moisture meter weight, g	850	

Подготовка навесок осуществлялась следующим образом: в 2023 году исследовали биологическую урожайность льна-долгунца (табл. 4) на опытных делянках, после чего определили средний вес одного растения, который составил 0,5 г. Взвешивание производилось на электронных весах ВЛТЭ-1100Т, класс точности по ГОСТ 24104-88. Вес одной навески для опытов 300 г (рис. 8).

Т а б л и ц а 4

T a b l e 4

Характеристики исходного материала льна-долгунца
Characteristics of the source material of long-lived flax

№ п/п	Характеристика / Characteristic	Значение / Meaning
1	Сорт льна-долгунца / A variety of long-lived flax	Надежда / Hope
2	Фаза спелости льна-долгунца / The ripeness phase of flax	Ранняя желтая / Early Yellow
3	Влажность стеблей, % / Humidity of the stems, %	43
4	Густота стеблестоя, шт./м ² / Stem density, pcs/m ²	1 750
5	Урожайность льносоломы, т/га / Yield of flax straw, t/ha	3,2–3,6
6	Урожайность семян, т/га / Seed yield, t/ha	0,50–0,65

Перед установкой в зажимные ремни растения распределялись на участке длиной 1 м, выравнивалась верхушечная часть, после чего растения заводили в зажимные ремни, тем самым образовывая рядок растений. В момент закрепления растений в зажимные ремни устанавливали необходимую высоту. Высоту установки растений регулировали измерительной линейкой ГОСТ 427-75.

Лен-долгунец, взаимодействуя с обтекателем очесывающего устройства 5 (рис. 5), отклонялся и попадал к очесывающим гребенкам 8. Съемные очесывающие гребенки, перемещаясь вместе с барабаном снизу вверх, захватывали верхушечную часть стеблей льна-долгунца, на которых расположены семенные коробочки, и поступали в установочный зазор между зубьями гребенки. После взаимодействия зубьев гребенки со стеблями образовывался семенной ворох, который состоял из семенных коробочек, свободных семян и путанины. Эта масса попадала в приемную камеру 6 для сбора вороха [2].



Р и с. 8. Навески для проведения эксперимента

F i g. 8. Attachments for the experiment

После проведения опыта очесанный ворох собирался в тару и нумеровался. Ворох разделяли на семенные коробочки, включающие свободные семена от стеблей, и производили взвешивание на электронных весах марки ВЛТЭ-1100Т. Производили подсчет неочесанных семенных коробочек со стеблей для определения чистоты очеса растений льна-долгунца (рис. 9).



Р и с. 9. Материал после проведения опытов

F i g. 9. The material after the experiments

Выбор факторов влияния и интервалов их варьирования проводили при помощи метода планирования эксперимента [15]. В качестве критерия оптимизации работы очесывающего аппарата на основании проведенных теоретических исследований была выбрана чистота очеса растений [16].

По проведенным ранее исследованиям были выявлены наиболее существенные факторы, влияющие на качество очеса [17]. К ним относятся: x_1 – ширина установочного зазора гребенки (t , м); x_2 – расстояние от поверхности почвы до очесывающей гребенки при захвате растений (h_2 , м); x_3 – частота вращения очесывающего барабана (n_0 , с⁻¹).

На рисунке 10 представлена съемная очесывающая гребенка для проведения эксперимента. В условиях научно-производственной лаборатории ФНЦ ЛК было изготовлено три комплекта гребенок с различной шириной установочного зазора (3, 5 и 7 мм).



Р и с. 10. Съемная гребенка очесывающего барабана

F i g. 10. Removable comb of the comb-dresser

Корреляционная зависимость была представлена в виде:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i + \sum_{i < j}^k b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} \cdot x_i^2,$$

где y – критерий оптимизации (отклик); b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – коэффициенты регрессии; i, j – номера факторов.

Используем линейную часть корреляционной зависимости:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3,$$

а при ее адекватности – квадратичную:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3.$$

Для реализации уравнения был принят некомпозиционный план второго порядка Бокса-Бенкина [18]. Матрица планирования некомпозиционного плана второго порядка для трех факторов представлена в таблице 5.

Т а б л и ц а 5

T a b l e 5

Матрица плана эксперимента
The matrix of the experiment plan

Обозначение / The designation	Факторы / The factor		
	Ширина установочного зазора t_0 , мм / The width of the installation gap t_0 , mm	Расстояние от поверхности почвы до очесывающей гребенки при захвате растений h_1 , м / The distance from the soil surface to the combing comb when capturing plants h_1 , m	Частота вращения барабана n_6 , с ⁻¹ / The rotation speed of the drum rotor n_6 , с ⁻¹
1	7	0,50	6,16
2	3	0,40	6,16
3	7	0,40	6,16
4	3	0,50	6,16
5	7	0,45	7,83
6	3	0,45	4,50
7	7	0,45	4,50
8	3	0,45	7,83
9	5	0,50	7,83
10	5	0,40	4,50
11	5	0,50	4,50
12	5	0,40	7,83
13	5	0,45	6,16
14	5	0,45	6,16
15	5	0,45	6,16

После обработки данных многофакторного эксперимента программным пакетом Statgraphics 18 были получены значения функций отклика. Уравнение с учетом значимости коэффициентов имеет вид:

$$y = -101,062 + 14,5525 \cdot x_1 + 0,64278 \cdot x_2 + 0,0765961 \cdot x_3 - \\ - 1,2198 \cdot x_1^2 - 0,00674083 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,00870833 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,0067095 \cdot x_2^2 + \\ + 0,0000147 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,0000968292 \cdot x_3^2.$$

Результаты многофакторного эксперимента отражены в таблице 6.

Т а б л и ц а 6
T a b l e 6Результаты многофакторного эксперимента
The results of a multifactorial experiment

Фактор / The factor	Сумма квадратов факторов / The sum of the squares of the factors	Средний квадрат факторов / The average square of the factors	F-Ratio	P-Value
x_1	12,216500	12,216500	7,51	0,0104
x_2	6,827730	6,827730	4,20	0,0497
x_3	60,763500	60,763500	37,34	0,0000
$x_1 \cdot x_1$	163,246000	163,246000	100,33	0,0000
$x_1 \cdot x_2$	5,452660	5,452660	3,35	0,0775
$x_1 \cdot x_3$	0,364008	0,364008	0,22	0,6398
$x_2 \cdot x_2$	19,293200	19,293200	11,86	0,0018
$x_2 \cdot x_3$	0,064827	0,064827	0,04	0,8432
$x_3 \cdot x_3$	6,429180	6,429180	3,95	0,0564

Вариабельность чистоты очеса на отдельные части для каждого из факторов. Затем они были проверены на статистическую значимость каждого фактора путем сравнения среднеквадратичного значения с оценкой экспериментальной ошибки. В результате пять факторов имеют Р-значения менее 0,05, что указывает на значительное их отличие от нуля при уровне достоверности 95,0 % и влияние их на чистоту очеса.

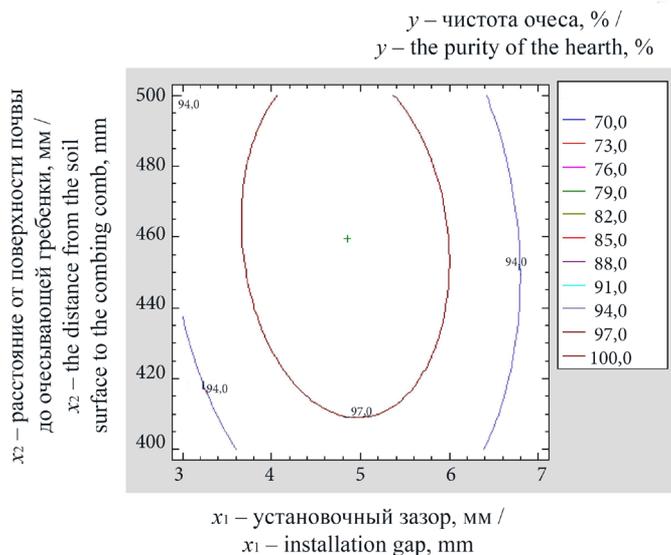
Получены оптимальные значения факторов, при которых возможно достичь чистоту очеса растений льна-долгунца на уровне 99,2 %. Оптимальные значения факторов приведены в таблице 7.

Т а б л и ц а 7
T a b l e 7Оптимальные значения факторов
Optimal values of the factors

Фактор / The factor	Нижний уровень / Lower level	Верхний уровень / Upper level	Точка оптимума / The optimum point
x_1 ,	3,00	7,00	4,85
x_2 ,	400,00	500,00	459,56
x_3	4,50	7,83	6,03

Максимальная чистота очеса достигается при установочном зазоре очесывающих гребенок 4,8 мм, расстоянии от поля до очесывающей гребенки 0,46 м и частоте вращения очесывающего барабана 6,03 с⁻¹.

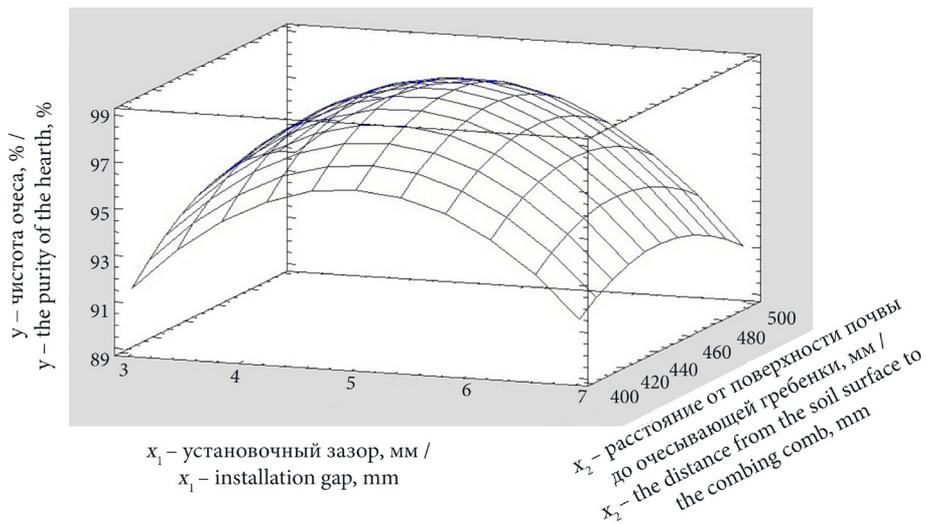
Контуры области и поверхность предполагаемого отклика при частоте вращения барабана 6,16 с⁻¹ представлены на рисунках 11, 12.



Р и с. 11. Область точки оптимума
 F i g. 11. The area of the optimum point

Источник: графики для рисунков 11, 12 построены с помощью программного пакета Statgraphics 18.

Source: the graph is created using the Statgraphics 18 software package.



Р и с. 12. Поверхность точки оптимума
 F i g. 12. The surface of the optimum point

Обсуждение и заключение. Разработана методика проведения многофакторного эксперимента по определению чистоты очеса. Опытным путем подтверждены теоретические исследования конструкции и режима работы очесывающего барабана.

Результатом камеральных работ по отделению семенных коробочек льна-долгунца при очесе на корню гребенками однороторного очесывающего барабана стали выводы о том, что максимальная чистота очеса растений 99,2 % достигается при установочном зазоре очесывающих гребенок 4,85 мм, расстоянии от почвы до очесывающей гребенки 0,46 м и частоте вращения очесывающего барабана 6,03 с⁻¹. Полученные данные могут быть применены для изготовления гребенок серийных очесывающих однороторных жаток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пути повышения надежности льноуборочных машин / В. Г. Черников [и др.] // Техника и оборудование для села. 2017. № 2. С. 30–33. EDN: XXRSML
2. Черников В. Г., Ростовцев Р. А., Соловьёв С. В. Исследование параметров и режимов работы аппарата для очеса льна на корню // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15, № 2. С. 13–18. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-2-13-18>
3. Способ уборки льна и многофункциональный агрегат для его осуществления : патент 2693728 Российская Федерация / Игнатов В. Д. [и др.]. № 2018129503 ; заявл. 13.08.2018 ; опубл. 04.07.2019. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2693728C1_20190704.pdf (дата обращения: 25.01.2024).
4. Алдошин Н. В., Мосяков М. А. Совершенствование конструкции очесывающих устройств для уборки зернобобовых культур // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». 2018. № 2 (84). С. 23–27. <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-23-27>
5. Шишин Д. А. Влияние конструкции очесывающего устройства на характеристики воздушного потока в камере очеса льнокомбайна // Тракторы и сельхозмашины. 2018. № 6. С. 12–16. EDN: YUKBRB
6. Очес растений на корню с предварительной сепарацией свободного зерна / В. Н. Ожерельев [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 1. С. 73–79. <https://doi.org/10.17816/0321-4443-100849>
7. Рабочий орган для очесывания верхушек растений : патент А 482143 СССР / Повиляй В. М., Шабанов П. А. № 198648/30-15 ; заявл. 16.01.74 ; опубл. 30.08.75. URL: https://yandex.ru/patents/doc/SU482143A1_19750830?ysclid=lsltjy3xwm696606053. (дата обращения: 25.01.2024).
8. Гребенка очесывающего устройства : патент 2439871 С1 Российская Федерация / В. П. Колинко [и др.]. № 2010129501/13 ; заявл. 15.07.2010 ; опубл. 20.01.2012. EDN: ZGFPTV
9. Съемная гребенка барабана очесывающего оборудования : патент 2442313 Российская Федерация / Бурьянов А. И. [и др.]. № 2009149613/13 ; заявл. 30.12.2009 ; опубл. 10.07.2011. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2442313C2_20120220.pdf (дата обращения: 25.01.2024).
10. Великанова И. В. Повышение эффективности системы машин при использовании интенсивных технологий выращивания льна-долгунца // Аграрный вестник Урала. 2021. № 1 (204). С. 70–80. EDN: ASKJWN
11. Research on New Technology of Fiber Flax Harvesting / J. Mańkowski [et al.] // Journal of Natural Fibers. 2017. Vol. 15, Issue 1. P. 53–61. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1302390>
12. Романенко В. Ю., Соловьёв С. В. К анализу процесса очеса льна-долгунца на корню // Таврический вестник аграрной науки. 2023. № 3 (35). С. 189–198. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10141680>
13. Научные аспекты повышения эффективности процессов очеса семенных коробочек при двухфазной уборке льна-долгунца / Ю. Ф. Лачуга [и др.] // Российская сельскохозяйственная наука. 2022. № 1. С. 53–58. <https://doi.org/10.31857/S2500262722010094>

14. Уткин А. А., Малышкин А. В. Использование кондуктометрического метода при определении влажности тресты льна // Техника и оборудование для села. 2023. № 11 (317). С. 22–27. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-11-22-27>
15. Романенко В. Ю. Экспериментальное обоснование режимов работы адаптера для подборщика-оборачивателя ленты льна // Техника и оборудование для села. 2017. № 9. С. 20–21. EDN: ZHJXGT
16. Галкин А. В., Фадеев Д. Г., Ушаповский И. В. Исследование качественных характеристик льноволокна в зависимости от конструкции очесывающего аппарата // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28, № 3. С. 389–399. <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.389-399>
17. Effects of Humic Substances Obtained from Shives on Flax Yield Characteristics / S. Belopukhov [et al.] // Journal of Natural Fibers. 2017. Vol. 14, Issue 1. P. 126–133. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1167648>
18. Теория планирования многофакторных экспериментов / сост. А. Ф. Бойко, М. Н. Воронкова. Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2020. 75 с. EDN: RTDZDP
19. Машины и оборудование для уборки и переработки технических культур : каталог / И. Г. Голубев, Н. П. Мишуров, В. Ф. Федоренко [и др.]. М. : ФГБНУ «Росинформагротех», 2021. 80 с. URL: <https://clck.ru/3C4Jj4> (дата обращения: 25.01.2024).

REFERENCES

1. Chernikov V.G., Romanenko V.Yu., Androshehuk V.S., Shishin D.A. Ways to Improve the Reliability of Flax Harvesting Machines. *Machinery and Equipment for the Village*. 2017;2:30–33. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: XXRSML
2. Chernikov V.G., Rostovtsev R.A., Solovyov S.V. Study on Parameters and Operating Modes of the Device for Deseeding Flax in the Field. *Agricultural Machinery and Technology*. 2021;15(2):13–18. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2021-15-2-13-18>.
3. Ignatov V.D., Rostovtsev R.A., Mkrtychyan S.R., Golubev S.V., Perov G.A. [A Method of Flax Harvesting and a Multifunctional Unit for its Implementation]. Patent 2693728 Russian Federation. 2019 July 04. (In Russ.) Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU2693728C1_20190704.pdf (accessed 25.01.2024).
4. Aldoshin N.V., Mosyakov M.A. Improving the Design of Combing Devices for Harvesting Legumes. *Bulletin of the Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "V. P. Goryachkin Moscow State Agroengineering University"*. 2018;2(84):23–27. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-2-23-27>.
5. Shishin D.A. Influence of the Deseeding Device Design on the Air Flow Characteristics in the Combing Chamber of the Flax Harvester. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2018;6:12–16. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: YUKBRB
6. Ozhereliev V.N., Nikitin V.V., Sinyaya N.V., Chaplygin M.Y., Fedina T.O. Combing the Standing Crops with Preliminary Separation of Loose Grains. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022;89(1):73–79. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17816/0321-4443-100849>
7. Povilai V.M., Shabanov P.A. [Working Body for Combing the Tops of Plants]. Patent A 482143 USSR. 1975 August 30. (In Russ.) Available at: https://yandex.ru/patents/doc/SU482143A1_19750830?ysclid=Isltjy3xwm696606053 (accessed 25.01.2024).
8. Kolinko V.P., Ozonov G.R., Sabashkin V.A., Gritsenko N.F., Chemodanov S.I., Kolinko P.V., et al. [Comb of the Combing Device]. Patent 2439871 C1 Russian Federation. 2012 January 20. (In Russ.) EDN: ZGFPTV
9. Bur'janov A.I., Pakhomov V.I., Dmitrenko A.I., Bur'janov M.A., Kolesnikov G.E. [Doffer Comb of Stripping Cylinder]. Patent 2442313 Russian Federation. 2011 October 7. (In Russ.) Available at: https://patents.s3.yandex.net/RU2442313C2_20120220.pdf (accessed 25.01.2024).
10. Velikanova I.V. Increasing the Efficiency of the Machine System Using Intensive Technologies for Growing Flax. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2021;1(204):70–80. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: ASKJWN
11. Mańkowski J., Maksymiuk W., Spsychalski G., Kołodziej J., Kubacki A., Kupka D., et al. Research on New Technology of Fiber Flax Harvesting. *Journal of Natural Fibers*. 2017;15(1):53–61. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1302390>.

12. Romanenko V.Yu., Solovyov S.V. To the Analysis of the Process of Combing Fiber Flax on the Root. *Tauride Bulletin of Agrarian Science*. 2023;3(35):189–198. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.5281/zenodo.10141680>.
13. Lachuga Yu.F., Zintsov A.N., Kovalev M.M., Perov G.A. Scientific Aspects of Improving the Efficiency of Seedpod Combing Processes in Two-Phase Harvesting of Flax. *Russian Agricultural Science*. 2022;1:53–58. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31857/S2500262722010094>
14. Utkin A.A., Malyshev A.V. Use of the Conductometric Method for Measuring the Moisture Content of Flax Straw. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2023;11(317):22–27. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2023-11-22-27>
15. Romanenko V.Yu. Experimental Substantiation of Adapter Operating Modes for Pickup-Turner of Flax Tape. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2017;9:20–21. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: ZHJXGT
16. Galkin A.V., Fadeev D.G., Uschapovsky I.V. Studying Quality Characteristics of Flax Fiber Depending on Deseeding Device Design. *Mordovia University Bulletin*. 2018;28(3):389–399. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/0236-2910.028.201803.389-399>
17. Belopukhov S., Dmitrevskaya I., Grishina E., Zaitsev S., Uschapovsky I. Effects of Humic Substances Obtained from Shives on Flax Yield Characteristics. *Journal of Natural Fibers*. 2017;14(1):126–133. <https://doi.org/10.1080/15440478.2016.1167648>
18. Boyko A.F., Voronkova M.N. [Theory of Planning Multifactorial Experiments]. Belgorod : *Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*, 2020. 75 p. (In Russ.) EDN: RTDZDP
19. Golubev I.G., Mishurov N.P., Fedorenko V.F., Davydova S.A., Solovyov S.A., Popov R.A. [Machines and Equipment for Harvesting and Processing of Industrial Crops : Catalog]. М. : FSBI “Rosinformagrotech”, 2021. 80 p. (In Russ.) Available at: <https://clck.ru/3C4Jj4> (accessed 25.01.2024).

Об авторах:

Соловьёв Сергей Викторович, аспирант, и. о. младший научный сотрудник Федерального научного центра лубяных культур (170041, Российская Федерация, г. Тверь, Комсомольский пр-т, д. 17/56), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8461-3888>, Researcher ID: KAM-7131-2024, s.solovyov@fncl.ru

Черников Виктор Григорьевич, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник Федерального научного центра лубяных культур (17041, Российская Федерация, г. Тверь, Комсомольский пр-т, д. 17/56), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5187-4883>, v.chernikov@fncl.ru.

Ростовцев Роман Анатольевич, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник Федерального научного центра лубяных культур (170041, Российская Федерация, г. Тверь, Комсомольский пр-т, д. 17/56), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0368-1035>, r.gostovcev@fncl.ru

Романенко Владислав Юрьевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Федерального научного центра лубяных культур (170041, Российская Федерация, г. Тверь, Комсомольский пр-т, д. 17/56), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7273-3009>, Researcher ID: KAU-6551-2024, v.romanenko@fncl.ru.

Заявленный вклад авторов:

С. В. Соловьёв – литературный и патентный анализ, проведение исследований и обработка экспериментальных данных, подготовка начального текста с последующей доработкой.

В. Г. Черников – формулирование концепции решения, научное руководство, критический анализ результатов исследования, разработка и доработка решения.

Р. А. Ростовцев – постановка задачи, анализ результатов, визуализация.

В. Ю. Романенко – определение методологии исследования, сбор и анализ материалов по теме исследования, проведение исследований, доработка текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 16.02.2024; поступила после рецензирования 18.04.2024;
принята к публикации 26.04.2024*

*About the authors:*

Sergey V. Solovyov, Postgraduate Student, Acting Junior Researcher, Federal Research Center for Bast Fiber Crops (17/56 Komsomolsky Ave., Tver 170041, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8461-3888>, Researcher ID: **KAM-7131-2024**, s.solovyov@fncl.k.ru

Viktor G. Chernikov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, Federal Research Center for Bast Fiber Crops (17/56 Komsomolsky Ave., Tver 170041, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5187-4883>, v.chernikov@fncl.k.ru

Roman A. Rostovtsev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, Federal Research Center for Bast Fiber Crops (17/56 Komsomolsky Ave., Tver 170041, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0368-1035>, r.rostovcev@fncl.k.ru

Vladislav Yu. Romanenko, Cand.Sci. (Eng.), Leading Researcher, Federal Research Center for Bast Fiber Crops (17/56 Komsomolsky Ave., Tver 170041, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7273-3009>, Researcher ID: **KAU-6551-2024**, v.romanenko@fncl.k.ru

Authors contribution:

S. V. Solovyov – literary and patent analysis, conducting research and processing experimental data, preparing the initial text with subsequent revision.

V. G. Chernikov – formulation of the concept of the solution, scientific guidance, critical analysis of the research results, development and refinement of the solution.

R. A. Rostovtsev – problem statement, analysis of the results, visualization.

V. Yu. Romanenko – definition of the research methodology, collection and analysis of materials on the research topic, conducting research, refining the text.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 16.02.2024; revised 18.04.2024; accepted 26.04.2024