





Исследования и сравнительные испытания плющилки зерна с питающим устройством

В. А. Сысуев, П. А. Савиных , **В. А. Казаков, Ю. В. Сычугов**
*Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока
имени Н. В. Рудницкого (г. Киров, Российская Федерация)*
 peter.savinyh@mail.ru

Аннотация

Введение. В статье приведены результаты экспериментально-теоретических исследований технологического процесса плющилки зерна с питающим устройством ПЗ-1М. Работа выполнена на базе ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока в период 2011–2019 гг. Цель исследования – разработка схемы питающего устройства к плющилке зерна, определение рациональных параметров его рабочего органа (питающего вальца) и испытания усовершенствованной плющилки.

Материалы и методы. Предложена конструктивно-технологическая схема плющилки с питающим устройством, новизна которой подтверждена патентами № 2628297 и 2557780. Разработана структурная схема плющилки с питающим устройством, включающим активный рабочий орган – питающий валец с лопастями. Проведены теоретические исследования движения зерновки по лопастям вальца питающего устройства, которые определили закономерности движения зерна в зависимости от величин параметров вальца.

Результаты исследования. Установлено, что при величине внутреннего радиуса питающего вальца 0,045 м и больше все зерно сходит с лопасти в подводящий канал и через него на плющение под требуемым углом выхода, равным 60°, при частоте вращения вальца не меньше 400 мин⁻¹ и величине коэффициента трения зерна о лопасть вальца меньше 0,4. При соблюдении данных параметров питающий вал и устройство эффективны. С учетом результатов исследований разработана конструкторская документация и изготовлена плющилка ПЗ-1М, включающая питающее устройство. Проведены ведомственные и сравнительные испытания плющилки, которые показали высокую эффективность ее применения: машина надежно и качественно выполняет технологический процесс плющения зерна.

Обсуждение и заключение. Применение в конструкции плющилки питающего устройства в 2,08 раза повышает производительность плющения при снижении энергоемкости процесса в 1,6 раза; годовой экономической эффект от применения плющилки с питающим устройством ПЗ-1М, по сравнению с аналогом, составляет 67 583 руб. при уровне интенсификации 49 %.

Ключевые слова: плющение, производительность, технология, корм, эффективность, зерно, питающее устройство

Финансирование: исследование выполнено в ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока в рамках научной программы № АААА-А19-119042290137-1 на 2013–2023 гг.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Для цитирования: Исследования и сравнительные испытания плющилки зерна с питающим устройством / В. А. Сысуюв [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 2. С. 207–221. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.207-221>

Original article

Research and Comparative Testing of a Grain Flattener with a Feeding Device

V. A. Sysuev, P. A. Savinykh ✉, V. A. Kazakov, Yu. V. Sychugov

*Federal Agricultural Research Center of the North-East
Named after N. V. Rudnitsky (Kirov, Russian Federation)*

✉ peter.savinyh@mail.ru

Abstract

Introduction. The article presents the results of experimental and theoretical research of technological process of the PZ-1M grain flattener with a feeding device. The research was carried out at the Federal Agricultural Research Center of the North-East Named after N. V. Rudnitsky in 2011–2019. The purpose of the research is to design a feeder scheme for the grain flattener, determine rational parameters of its working body (feed roller) and test the improved grain flattener.

Materials and Methods. A constructive and technological scheme of the grain flattener with a feeding device is proposed, the novelty of which is confirmed by patents Nos. 2628297 and 2557780. The structural scheme of grain flattener with a feeding device comprising an active working body – a feeding roller with blades is developed. There was carried out theoretical research of the grain motion along the feeder roller blades to determine the patterns of grain motion depending on the values of the roller parameters.

Results. It is established that with the size of the feed roller inner radius 0.045 m and more all the grain passes down from the roller blade into the feed channel and through it for flattening at the required exit angle of 60°, roller speed of not less than 400 min⁻¹ and the value of the coefficient of the grain friction on the roller blade less than 0.4. When these parameters are observed, the feeding roller and the device are effective. Taking into account the results of researches, we have developed the design documentation and produced the PZ-1M grain flattener comprising a feeder. Departmental and comparative tests of the flattener were conducted, which showed high efficiency of its application: machine reliably and qualitatively performs the technological process of flattening grains.

Discussion and Conclusion. The use of a power device in the design of the flattener increases the conditioning capacity by 2.08 times while reducing the energy intensity of the process by 1.6 times; the annual economic effect of using the PZ-1M grain flattener with feeding device compared to its analogue is 67,583 rub. at the level of intensification of 49%.

Keywords: flattening, productivity, technology, feed, efficiency, grain, feeding device

Funding: The research was conducted at the Federal Agricultural Research Center of the North-East Named after N. V. Rudnitsky under Scientific Program No. AAA-A19-119042290137-1 for 2013–2023.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Sysuev V.A., Savinykh P.A., Kazakov V.A., Sychugov Yu.V. Research and Comparative Testing of a Grain Flattener with a Feeding Device. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(2):207–221. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202202.207-221>

Введение

Эффективность животноводческой отрасли в значительной мере определяется качеством потребляемых животными кормов [1]. Важное место при скармливании как в чистом виде, так и в качестве одного из компонентов комбикормов занимает очищенное от примесей плющеное фуражное зерно, сухое или влажное. Так, скармливание влажного плющеного зернового корма улучшает его усвояемость на 5–8 %, что повышает привесы молодняка и надой коров на 7–11 %. Технологии получения влажного плющеного корма имеют свои положительные стороны, например уборка высоковлажного зерна на плющение позволяет начинать ее на 2–3 недели раньше традиционных сроков [2]. Использование технологий плющения зерна экономически эффективно, поэтому их применение весьма актуально [3].

Для осуществления технологического процесса получения плющеного зернового корма, сухого и влажного, в ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока разработана, изготовлена и испытана плющилка зерна ПЗ-1. Ее конструктивно-технологическая документация передана в ООО «Нолинский ремонтный завод», который успешно освоил серийный выпуск и использует данную машину в течение последних 4 лет. Однако в условиях конкуренции со стороны отечественных и зарубежных производителей требуется модернизация плющилки ПЗ-1 для увеличения производительности плющения зерна и снижения энергозатрат на данный процесс.

Согласно анализу уровня техники по рассматриваемому вопросу для повышения эффективности получения корма плющилкой необходимо питающее устройство, обеспечивающее подвод исходного фуражного зерна в зону плющения в нужном количестве, с технологически необходимой скоростью

и направлением [4]. Это приведет к увеличению производительности плющения Q , т/ч, и снизит энергопотребление \mathcal{E} , кВт·ч/т, рабочего процесса плющилки.

Цель исследования – разработать схему питающего устройства к плющилке зерна и найти рациональные конструктивно-технологические параметры его активного рабочего органа (питающего вальца), которые увеличат производительность плющения Q и снизят энергопотребление \mathcal{E} . Также важно провести ведомственные и сравнительные испытания усовершенствованной плющилки.

Обзор литературы

Технологии получения плющеного зерна (сухого или влажного) – относительно новый вид производства концентрированных зерновых кормов для нужд животноводства. Их исследованием и использованием занимаются коллективы ученых как в нашей стране, так и за рубежом [5; 6].

Получают плющенный зерновой корм специальные кормоприготовительные машины – плющилки зерна [7; 8]. Их конструкции могут значительно отличаться друг от друга, но рабочий процесс аналогичен: зерновки исходного зернового материала проходят через зазор, который значительно меньше толщины зерновок и образован вращающимися навстречу друг другу цилиндрическими вальцами [9–11]. Рынок производителей и продавцов плющилок зерна достаточно развит как в Российской Федерации, так и за рубежом. Например, финская фирма Aimo Kortteen Конераја Оу производит и продает плющилки Murska 350 S2, Murska 700 S2 с различной производительностью (от 1 до 40 т/ч). Они оснащены рифлеными вальцами для плющения. В комплект входит оборудование для обработки влажного плющеного зерна консервантом. ROmiLL (Чехия) производит не только плющилки

марок М1–М900 с производительностью 1–40 т/ч, но и упаковщики влажного плющеного зерна в полиэтиленовый рукав с устройствами внесения консерванта во влажное плющеное зерно. Республика Беларусь выпускает плющилки Корм-10. Россия так же имеет своих производителей: ООО «Доза-Агро», ЗАО «Лужская сельхозтехника», ООО «Ремонтный завод» (г. Нолинск Кировской области) и др.

Проблемами технологии получения плющеного зернового корма и технических средств для его осуществления занимались А. Н. Перекопский [6], В. А. Сысуев [12; 13], П. А. Савиных [14], А. Ю. Исупов [15–17], В. А. Казаков [12; 13], А. Марчук, В. Романюк, С. Ивановс [18–20].

В лаборатории механизации животноводства ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока предложены новые конструкции плющилок зерна, в том числе двухступенчатых [9; 12; 13]. Проведены научные исследования рабочего процесса плющилок данного типа. С учетом их результатов изготовлены опытные образцы двухступенчатых плющилок ПЗД-3.1 и ПЗД-6 согласно конструкторской документации [9]. Некоторые из них, например ПЗД-3.1, рекомендованы для массового производства.

Для обеспечения наиболее эффективного функционирования плющилки зерна необходимо питающее устройство, расположенное между питающим бункером и зоной плющения и позволяющее обеспечить следующие технологические параметры поступления зерна в зону плющения (межвальцовый зазор): необходимое и достаточное количество зерна для плющения, непрерывная и равномерная его подача, технологически необходимая скорость подачи исходного зерна, исключение

забивания загрузочного окна питающего бункера [4; 12; 13].

Научными исследованиями рабочего процесса питающего устройства и его влияния на эффективность получения плющеного корма плющилками зерна занимались ученые А. М. Мошонкин и В. А. Одегов [4; 9].

Анализ научных работ позволил сделать вывод, что для плющилки зерна наиболее целесообразно применять питающее устройство (питатель) с активным рабочим органом – питающим вальцем с лопастями. Питающее устройство должно располагаться между питающим бункером плющилки и вальцами для плющения, а вращающийся питающий валец устанавливается горизонтально под загрузочным окном питателя по всей его длине, при этом зерно с лопастей вальца через окно попадает в подводящий канал и через него в зону плющения [12; 13].

Материалы и методы

Учеными ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока совместно с А. М. Мошонкиным проведены научные исследования по усовершенствованию рабочего процесса плющилок зерна. Среди результатов разработка конструктивно-технологической схемы одноступенчатой (с двумя вальцами для плющения) плющилки зерна (рис. 1а), оснащенной питающим устройством, и блок-схемы функционирования ее технологического (рабочего) процесса (рис. 1б)¹. Новизна схемы и рабочего процесса питающего устройства плющилки подтверждена патентами № 2557780 и 2628297 [12; 13].

Технологический процесс питающего устройства заключается в следующем. Вращающийся валец с лопастями 6, смонтированный в питающем устройстве 1, дозировано подает зерно

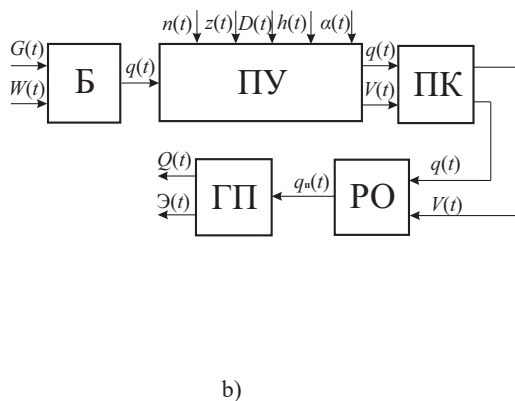
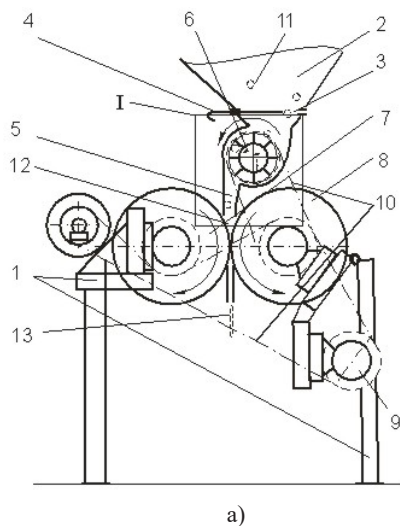
¹ Мошонкин А. М. Совершенствование конструкции и оптимизация конструктивно-технологических параметров питающего устройства плющилки зерна : дис. ... канд. техн. наук. Чебоксары, 2020. 143 с.

для плющения II через загрузочное окно 3 , регулируемое по высоте, в подводящий канал 5 и через него в зону плющения 12 . Питающий вал обеспечивает технологически необходимую скорость подачи зерна на плющение, а также непрерывность и равномерность его поступления. Величина подачи зерна (производительность плющилки) регулируется заслонкой 4 , а диаметр и частота вращения питающего вальца определяют скорость поступающего зерна в зону плющения 12 .

Блок-схема функционирования технологического (рабочего) процесса плющилки (рис. 1б) заключается в следующем. Подлежащее плющению зерно, имеющее некие свойства среды $W(t)$, загружается в емкость (бункер Б) в количестве $G_n(t)$. Из бункера Б, оснащенного питающим устройством ПУ, зерновой материал со скоростью $V(t)$, придаваемой

ему питающим устройством ПУ, поступает в канал ПК и на выходе из него со скоростью $V(t)$ в зону плющения на рабочие органы РО плющилки. После прохождения зерновым материалом участка РО получается готовый продукт ГП – плющенное зерно. Определяющими параметрами при оценке работы плющилки являются пропускная способность (производительность) $Q(t)$ и удельные энергозатраты $\Xi(t)$ на производство конечного продукта.

С целью повышения эффективности получения корма плющилкой с питающим устройством проведены теоретические и экспериментальные исследования параметров вращающегося вальца данного устройства, оказывающих влияние на выходные показатели рабочего процесса плющения. На первом этапе, с учетом анализа имеющихся научно-технических и патентных литературных



Р и с. 1. а) Схема плющилки зерна с питающим устройством I;

- б) блок-схема технологического (рабочего) процесса; 1 – несущая рама, 2 – питающий бункер, 3 – загрузочное окно; 4 – заслонка для регулировки подачи зерна; 5 – подводящий канал; 6 – питающий валец с лопастями; 7, 8 – вальцы для плющения; 9 – электродвигатель; 10 – клиноременная передача; 11 – исходное зерно; 12 – зона плющения; 13 – готовый продукт

Fig. 1. a) Scheme of grain flattener with a feeding device I; b) block diagram of technological (working) process; 1 – bearing frame; 2 – feeding hopper; 3 – charging door; 4 – flap for adjusting grain feed; 5 – feeding channel; 6 – feeding roller with blades; 7, 8 – rollers for flattening; 9 – electric motor; 10 – V-belt transmission; 11 – source grain; 12 – flattening zone; 13 – finished product

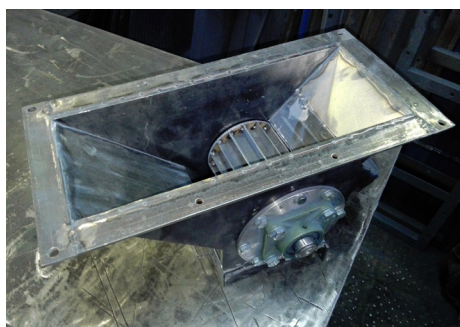
источников, проведены теоретические исследования рабочего процесса плющилки данного типа. В результате выявлены закономерности и связи конструктивно-технологических параметров ее элементов между собой и определено их влияние на рабочий процесс плющения зерна. Величины параметров, оказывающих положительное влияние на процесс плющения, применены при изготовлении экспериментального образца плющилки, затем опробованы и улучшены в реальном рабочем процессе (экспериментальные исследования). Результаты исследований использованы при разработке конструкторской документации на плющилку зерна с питающим устройством.

Изготовлены экспериментальный образец питающего устройства и пи-

тающие вальцы для него (рис. 2а); устройство устанавливалось на экспериментальную плющилку (рис. 2б).

Результаты исследования

Для нахождения рациональных конструктивно-технологических и режимных параметров вальца питающего устройства плющилки проведены теоретические исследования его рабочего процесса. Конструктивно-технологическая схема исследуемого устройства (рис. 1а) соответствует представленной в патентах № 2557780 и 2628297 [12; 13]. Схема движения зерновки (единичного зерна) в рабочей зоне питающего устройства плющилки зерна представлена на рисунке 3а, направление движения по лопасти питающего вальца и действующие на нее силы – на рисунке 3б.



а)



б)

Р и с. 2. а) Экспериментальный образец питающего устройства с вальцами для него; б) установка для исследования рабочего процесса плющения зерна

F i g. 2. а) An experimental sample of a feeding device with rollers for it; б) an installation for studying the working process of grain flattening

Технологический процесс получения плющеного корма плющилкой с питающим устройством заключается в следующем. Зерно для плющения 1 из питающего бункера 2 через загрузочное окно 3 и каналы 8 попадает на лопасти 9 вращающегося вальца 5, под действием центробежных сил движется по ним и сходит в подводящий канал 10 и через него в зону плющения (межвальцовый зазор), образованную вальцами для плющения 6 и 7. В межвальцовом зазоре происходит технологический процесс плющения зерна, получается готовый к скармливанию плющенный зерновой корм.

Движение зерновки по лопасти питающего вальца определяется равнодействующей всех сил, влияющих на нее, и может быть представлено в виде дифференциального уравнения 2-го порядка (с учетом всех действующих сил):

$$m\vec{W} = m\vec{g} + \vec{\Phi}_e + \vec{\Phi}_c + \vec{N} + \vec{F}_{\text{тр}}, \quad (1)$$

где $\vec{W} = \ddot{x}$ – абсолютное ускорение частицы зерна при ее движении по лопасти питающего вальца; $m\vec{g}$ – сила тяжести.

$\vec{\Phi}_e$ – кориолисова сила, Н:

$$\vec{\Phi}_e = 2m\omega\vec{V}_r = 2m\omega\dot{x}, \quad (2)$$

где ω – частота вращения питающего вальца, рад/с.

$\vec{\Phi}_c$ – центробежная сила, Н:

$$\vec{\Phi}_c = m\omega^2 r = m\omega^2 x. \quad (3)$$

$\vec{F}_{\text{тр}}$ – сила трения, Н:

$$\vec{F}_{\text{тр}} = f\vec{N}. \quad (4)$$

\vec{N} – прижимающая сила, Н:

$$N = -mg \sin \omega t + 2m\omega\dot{x}. \quad (5)$$

Проецируя силы на оси координат X и Y (плоскость лопасти и перпендикуляр к ней) (рис. 3б), решаем (1), с учетом (2)–(5), по известным методикам. Получаем решение дифференциального уравнения:

$$\begin{aligned} x &= c_1 \cdot e^{\lambda_1 t} + c_2 \cdot e^{\lambda_2 t} + A \cos \omega f + B \sin \omega t, \\ \dot{x} &= \lambda_1 c_1 \cdot e^{\lambda_1 t} + \lambda_2 c_2 \cdot e^{\lambda_2 t} - A \omega \sin \omega f + \\ &\quad + B \omega \cos \omega t, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\lambda_1 = -f\omega + \omega\sqrt{(f^2 + 1)}, \quad (7)$$

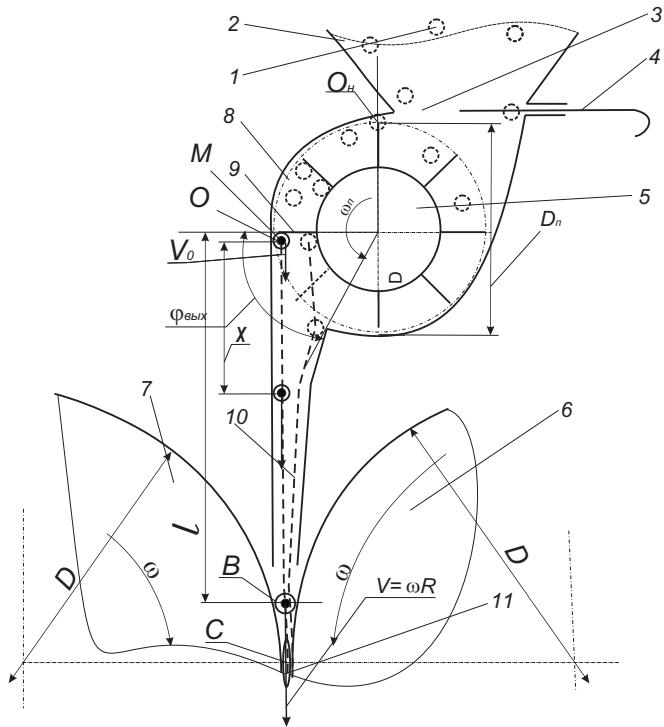
$$\lambda_2 = -f\omega - \omega\sqrt{(f^2 + 1)}, \quad (8)$$

$$\begin{cases} c_2 = \frac{\lambda_1 r - \lambda_1 A + B\omega}{\lambda_1 + \lambda_2} \\ c_1 = r - \frac{\lambda_1 r - \lambda_1 A + B\omega}{\lambda_1 + \lambda_2} - A \end{cases}, \quad (9)$$

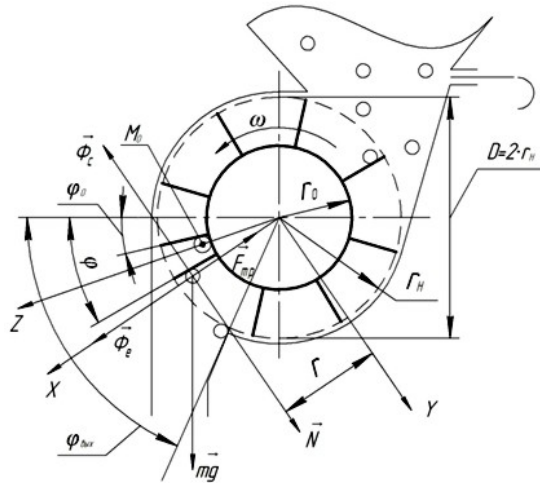
$$\begin{cases} B = \frac{gf}{-2\omega^2 - 2f\omega^2 + gf} \\ A = \frac{gf^2}{-2\omega^2 - 2f\omega^2 + gf} - \frac{g}{2\omega^2} \end{cases}. \quad (10)$$

Уравнение (6), с учетом (7)–(10), определяет параметры движения зерновки по лопасти вальца: расстояние от центра вращения вальца до зерновки, ее скорость и направление в момент времени t при заданных ранее ω и f .

Выражение (6) с помощью разработанной компьютерной программы в приложении Microsoft Excel позволяет определить и представить графически расположение r , м, частицы зерна на лопасти вальца, в любой момент времени t в зависимости от угла поворота вальца φ , град, при различных фиксированных значениях частоты его вращения



а)



б)

Р и с. 3. а) Схема перемещения зерновки в питающем устройстве плющилки зерна;
 б) действующие на нее силы при движении по лопасти вальца

Fig. 3. а) Scheme of movement of the grain in the feeding device of the grain flattener;
 б) the forces acting on grains when moving along the blade of the roller

n , мин⁻¹, коэффициента трения f зерновки о материал лопасти вальца, а также от величины r_0 , м, начала движения зерновки по лопасти вальца. Полученные зависимости позволяют определить степень влияния различных факторов на параметры движения зерновки по лопасти вальца.

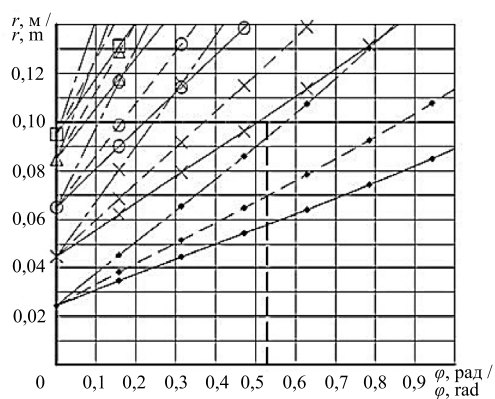
На рисунке 4 приведены полученные зависимости для частоты вращения питающего вальца $n = 600$ мин⁻¹ (рис. 4а), $n = 900$ мин⁻¹ (рис. 4б). Разработанная программа позволяет получить графики и для других n , например $n = 400$ мин⁻¹. Но питающий валец с частотой вращения $n < 600$ мин⁻¹ и своим радиусом от центра вращения до наружных кромок своих лопастей $r = 0,1$ м (принятый нами для дальнейших исследований) не обеспечивает подачу необходимого количества зерна в рабочую зону плющилки, вследствие этого пришлось ограничиться величинами $n = 600$ мин⁻¹ (рис. 4а) и $n = 900$ мин⁻¹ (рис. 4б).

Проведена проверка эффективности исследуемого устройства.

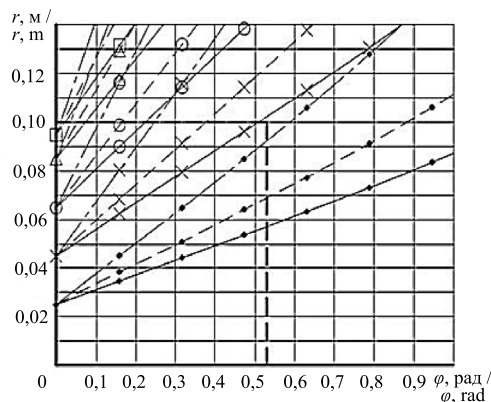
Установлено, что при величине внутреннего радиуса питающего вала $r_0 \geq 0,045$ м все зерно сходит с лопасти в подводящий канал под требуемым углом $\varphi_{\text{вых}} = 60^\circ$ при $n \geq 600$ мин⁻¹ и коэффициенте трения зерновки о лопасть вальца $f = 0,4$. Следовательно, питающий вал и устройство эффективны.

Результаты данных исследований использованы при разработке конструкторской документации на изготовление плющилки зерна с питающим устройством, согласно которой в ПКБ НИИСХ Северо-Востока совместно с ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока изготовлен опытный образец данной кормоприготовительной машины – плющилка сухого и влажного зерна ПЗ–1М.

В период с 03.07.2019 г. по 06.07.2019 г. на базе комплекса «Зиново» ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока проведены ведомственные испытания плющилки зерна с питающим устройством ПЗ–1М (рис. 5а). Также плющилку сравнивали с серийно выпускаемой плющилкой ПЗ-1 ООО «Ремонтный завод» (г. Ноллинск Кировской обл.) (рис. 5б).



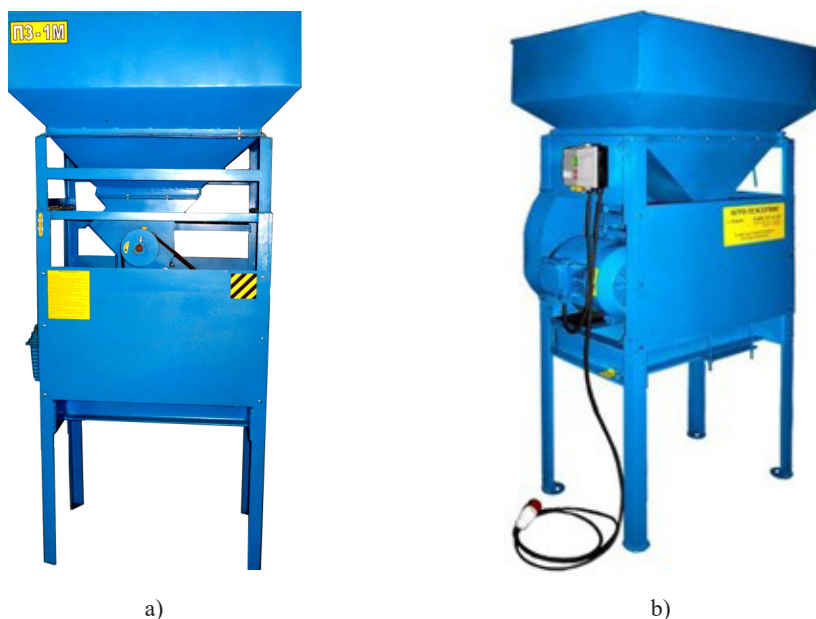
а)



б)

Р и с. 4. Зависимость параметров движения зерновки по лопасти питающего вальца от величины угла его поворота φ при различной частоте вращения вала: а) $n = 600$ мин⁻¹; б) $n = 900$ мин⁻¹

F i g. 4. The dependence of the parameters of the grain motion along the blade of the feed roller on the value of its rotation angle φ at different shaft speeds: а) $n = 600$ мин⁻¹; б) $n = 900$ мин⁻¹



Р и с. 5. Общий вид: а) плющилка фуражного зерна с питающим устройством ПЗ-1М; б) серийно выпускаемая плющилка ПЗ-1

F i g. 5. General view: а) PZ-1M grain flattener with a feeding device; б) PZ-1 series-produced grain flattener

Исходным зерном для плющения выбран ячмень сорта Абава влажностью 12 %. Испытания проведены согласно ГОСТу Р 54783-2011, ОСТу 10.2.2-2002 и показали, что качество произведенного плющилкой ПЗ-1М зернового корма соответствует требованиям СТО АИСТ 1.14.2-2020: средневзвешенная толщина хлопьев готового продукта 1,0–1,3 мм, их однородность 7,5–8,9 %, целых зерен в плющеном зерновом корме нет². При осуществлении технологического процесса производительность плющилки ПЗ-1М составила 1,2–1,4 т/ч при затратах энергии 3,6–4,2 кВт·ч/т получаемого плющеного зерна (корма).

Сравнительные испытания плющилок ПЗ-1 и ПЗ-1М показывают высокую

эффективность применения плющилки ПЗ-1М с питающим устройством: более чем в 2 раза выросла пропускная способность (производительность) плющилки ПЗ-1М по сравнению с аналогом – серийно выпускаемой ПЗ-1 (0,59–1,22 т/ч). При этом энергоёмкость технологического процесса плющения новой кормоприготовительной машиной уменьшилась в 1,6 раза (с 6,2 до 3,75 кВт·ч/т) при одинаковом качестве производимого продукта – плющеного зерна.

Обсуждение и заключение

Проведена экономическая и энергетическая оценка технического средства для получения зернового корма – плющилки зерна с питающим устройством ПЗ-1М. Аналогом для расчета

² ГОСТ 54783-2011. Испытания сельскохозяйственной техники. Основные положения. М. : Стандартинформ, 2020 ; ОСТ 10.2.2-2002. Испытания сельскохозяйственной техники. Методы энергетической оценки. М. : Изд-во стандартов, 2002 ; СТО АИСТ 1.14.2-2020. Испытания сельскохозяйственной техники. Машины для кормопроизводства. Показатели назначения и надежности. М., 2020.

экономической эффективности выбрана серийно выпускаемая плющилка ПЗ-1. Принято, что годовая нагрузка в хозяйстве на данные машины составляет 300 т получаемого плющеного корма.

Результаты проведенных исследований показали, что применение плющилки ПЗ-1М эффективно. Получаемый годовой экономический эффект составляет 67 583 руб., при этом удельные капитальные вложения снижаются в 1,48 раза (с 616 до 415 руб./т), удельные эксплуатационные затраты – в 1,48 раза (с 258,4 до 161,9 руб./т).

Энергетическая эффективность применения новой машины, по сравнению с аналогом, оценивается с помощью уровня интенсификации И, %. В нашем случае при использовании плющилки ПЗ-1М вместо ПЗ-1 И = 49 %. Общие (совокупные) затраты энергии на производство единицы продукции плющилкой ПЗ-1М на 49 % меньше, чем у серийно выпускаемой ПЗ-1.

Подводя итог, стоит отметить следующее:

1. Ученые ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока разработали схему питающего устройства к плющилке зерна. Ее активный рабочий орган – питающий валец

с лопастями. Новизна технических решений подтверждена патентами.

2. Найдены рациональные параметры вальца питающего устройства, повышающие эффективность получения корма. Установлено, что при величине внутреннего радиуса питающего вальца $r_0 \geq 0,045$ м все зерно сходит с лопасти в подводящий канал и через него на плющение под требуемым углом $\varphi_{\text{вых}} = 60^\circ$ при частоте оборотов $n \geq 600$ мин⁻¹ и коэффициенте трения зерна о лопасть вальца $f \leq 0,4$. Таким образом, определены величины параметров, при которых питающий вал и устройство эффективны.

3. Ведомственные и сравнительные испытания плющилки зерна ПЗ-1М с питающим устройством показали высокую эффективность ее применения: плющилка ПЗ-1М надежно и качественно выполняет технологический процесс. Производительность плющения Q возрастает в 2,08 раза по сравнению с аналогом. Энергоемкость процесса Э снижается в 1,6 раза. Годовой экономический эффект от применения плющилки с питающим устройством ПЗ-М составляет 67 583 руб. при уровне интенсификации И = 49 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Разработка и создание кормоприготовительного оборудования модульного типа с использованием методов математического и физического моделирования / В. Г. Мохнаткин [и др.] // Пермский аграрный вестник. 2021. № 1. С. 14–25. URL: <https://clck.ru/fbKQj> (дата обращения: 01.03.2022).

2. Горбунов Б. И., Денцов М. Н., Тюльнев А. В. Оптимизация энергетических ресурсов при реализации агротехнологий в складывающихся условиях производства // Вестник НГИЭИ. 2016. № 8. С. 102–109. URL: <https://clck.ru/fbKXa> (дата обращения: 01.03.2022).

3. Savinykh P. A., Kazakov V., Borek K. Tekhnologii proizvodstva zernovykh kormov plyushcheniyem // Woda-Srodowisko-Obszary Wiejskie. 2019. Vol. 19, Issue 3. P. 45–62. URL: https://www.itp.edu.pl/old/wydawnictwo/woda/zeszyt_67_2019/Savinykh%20i%20in.pdf (дата обращения: 01.03.2022).

4. Мошонкин А. М., Чернятьев Н. А., Герасимова С. П. Исследования и оптимизация конструктивно-технологических параметров питающего устройства плющилки зерна // Вестник НГИЭИ. 2020. № 4. С. 5–15. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42686505> (дата обращения: 01.03.2022).

5. Солонщиков П. Н., Мошонкин А. М., Доронин М. С. Совершенствование машин и оборудования в производстве кормов в животноводстве // Вестник НГИЭИ. 2017. № 9. С. 64–76. URL: <https://clck.ru/fbL2Y> (дата обращения: 01.03.2022).

6. Перекопский А. Н. Моделирование уборки зерновых культур в зависимости от погодных условий // Международный журнал экспериментального образования. 2013. № 10. С. 397–399. URL: <https://expeducation.ru/ru/article/view?id=4257> (дата обращения: 01.03.2022).
7. Коновалов В. В. Терюшков В. П., Терехин М. А. Результаты исследований плющилки зерна // Вестник ВНИИМЖ. 2016. № 4. С. 56–60. URL: <https://clck.ru/fbLPT> (дата обращения: 01.03.2022).
8. Дисксовая плющилка зерна / В. Ф. Некрашевич [и др.] // Сельский механизатор. 2009. № 9. С. 23. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12860245> (дата обращения: 01.03.2022).
9. Одегов В. А., Комкин А. С., Шилин В. В. Исследование влияния окружной скорости валцов и влажности материала на основные показатели рабочего процесса двухступенчатого вальцового станка // Пермский аграрный вестник. 2018. № 1. С. 28–33. URL: <http://agrovest.psa.ru/wp-content/uploads/2018/05/1-2018-28-33.pdf> (дата обращения: 01.03.2022).
10. Production and Use of Rapeseed Oil in Power Plant Machinery in the Northeast of European Part / A. Marczuk [et al.] // Jokull Journal. 2017. Vol. 67, Issue 8. P. 8–21.
11. Saitov V. E., Farafonov V. G., Suvorov A. N. Theoretical Motivation of the Technical Decisions of Division of the Corn Mixtures [Электронный ресурс] // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2014. Issue 1. URL: https://www.science-sd.com/456-24505?sd_com=00cdab8c43688528fd43c378b3273f55 (дата обращения: 01.03.2022).
12. Двухступенчатая плющилка зерна для производства зерновых кормов : патент 2628297 Российская Федерация / Сысуев В. А. [и др.] ; № 2015137568 ; заявл. 02.09.2015 ; опубл. 10.03.2017. 4 с. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/50/6f/bc/323f60b6e4f612/RU2015137568A.pdf> (дата обращения: 01.03.2022).
13. Двухступенчатая плющилка зерна для ресурсоэнергосберегающей технологии производства зерновых кормов : патент 2557780 Российская Федерация / Сысуев В. А. [и др.] ; № 201352556/13 ; заявл. 26.11.2013 ; опубл. 27.07.2015. 6 с. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/ef/d5/c0/3326dfb8638022/RU2557780C2.pdf> (дата обращения: 01.03.2022).
14. Prospects for the Use of Microwave Energy in Grain Crop Seeding / F. A. Kipriyanov [et al.] // Journal of Water and Land Development. 2021. Issue 49. P. 74–78. doi: <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.137098>
15. Research Results of Experimental Automated System for Dosing Bulk Materials / S. Bulatov [et al.] // Proceedings of International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” (26–28 May 2021). Vol. 20. Jelgava, 2021. P. 199–204. doi: <https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF043>
16. Результаты экспериментальных исследований микронизации зерна ржи / П. А. Савиных [и др.] // Вестник НГИЭИ. 2021. № 6. С. 26–36. doi: <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2021-6-26-36>
17. Савиных П. А., Исупов А. Ю., Киприянов Ф. А. Термическая обработка зерна как способ повышения его усвояемости // Международный технико-экономический журнал. 2021. № 2. С. 31–40. doi: <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2021-77-2-31-40>
18. Modeling and Simulation of Particle Motion in the Operation Area of a Centrifugal Rotary Chopper Machine [Электронный ресурс] / A. Marczuk [et al.] // Sustainability. 2019. Vol. 11, Issue 18. doi: <https://doi.org/10.3390/su11184873>
19. The Application of Similarity Theory and Dimensional Analysis to the Study of Centrifugal-Rotary Chopper for Forage Grain / W. Romaniuk [et al.] // Energies. 2021. Vol. 14, Issue 15. doi: <https://doi.org/10.3390/en14154501>
20. Research in Centrifugal Rotary Grinder of Forage Grain / P. Savinyh [et al.] // Proceedings of International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” (26–28 May 2021). Jelgava, 2021. P. 205–211. URL: <https://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2021/Papers/TF044.pdf> (дата обращения: 01.03.2022).

Поступила 05.03.2022; одобрена после рецензирования 11.04.2022; принята к публикации 15.04.2022

Об авторах:

Сысуйев Василий Алексеевич, главный научный сотрудник Федерального аграрного научного центра Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого (610007, Российская Федерация, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а), доктор технических наук, профессор, академик РАН, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1172-005X>, Researcher ID: B-8519-2019, Scopus ID: 56728483000, sisuev@mail.ru

Савиных Петр Алексеевич, главный научный сотрудник Федерального аграрного научного центра Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого (610007, Российская Федерация, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а), доктор технических наук, профессор, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5668-8479>, Researcher ID: V-6933-2017, Scopus ID: 56728791200, peter.savinyh@mail.ru

Казаков Владимир Аркадьевич, старший научный сотрудник лаборатории механизации животноводства Федерального аграрного научного центра Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого (610007, Российская Федерация, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3512-317X>, Researcher ID: CAH-0362-2022, Scopus ID: 56727628500, kazakov.vladimir.263@mail.ru

Сычугов Юрий Вячеславович, старший научный сотрудник лаборатории механизации животноводства Федерального аграрного научного центра Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого (610007, Российская Федерация, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а), доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6694-9575>, Researcher ID: CAH-1230-2022, Scopus ID: 57202650179, yuri.sychugov@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

В. А. Сысуйев – научное руководство, разработка технического задания, проведение критического анализа исследований.

П. А. Савиных – анализ и доработка программы исследований, непосредственное руководство исследованиями, теоретические исследования.

В. А. Казаков – выполнение экспериментально-теоретических исследований и получение результатов.

Ю. В. Сычугов – практическое применение результатов исследований и проведение испытаний.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Mokhnatkina V.G., Poyarkov M.S., Gorbunov R.M., Yakimov V.A. Development and Manufacturing of Modular Feed Preparation Equipment Using Mathematical and Physical Methods of Modeling. *Perm Agrarian Journal*. 2021;(1):14–25. Available at: <https://clck.ru/fbKQj> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

2. Gorbunov B.I., Dentsov M.N., Tyulnev A.V. Optimization of Energy Resources in the Implementation of Agricultural Technologies in the Prevailing Conditions of Production. *Vestnik NGIEI*. 2016;(8):102–109. Available at: <https://clck.ru/fbKXa> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

3. Savinykh P. A., Kazakov V., Borek K. [Technologies of Grain Fodder Production by Ivying]. *Water-Environment-Rural Areas*. 2019;19(3):45–62. Available at: https://www.itp.edu.pl/old/wydawnictwo/woda/zeszyt_67_2019/Savinykh%20i%20in.pdf (accessed 01.03.2022). (In Russ.)

4. Moshonkin A.M., Chernyatiev N.A., Gerasimova S.P. Research and Optimization of Constructively and Technological Parameters of the Feed Device of the Grain Flatterer. *Vestnik NGIEI*. 2020;(4):5–15. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42686505> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

5. Solonshchikov P.N., Moshonkin A.M., Doronin M.S. Improvement of Machinery and Equipment in the Production of Fodder. *Vestnik NGIEI*. 2017;(9):64–76. Available at: <https://clck.ru/fbL2Y> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)

6. Perekopskiy A.N. Modeling of Grain Harvesting under Various Weather Conditions. *International Journal of Experimental Education*. 2013;(10):397–399. Available at: <https://expeducation.ru/ru/article/view?id=4257> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
7. Konovalov V.V., Teryushkov V.P., Terekhin M.A. The Results of Grain Flattening Machine Studying. *Bulletin of the Russian Research Institute for Mechanization of Animal Husbandry*. 2016;(4):56–60. Available at: <https://clck.ru/fbLPT> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
8. Nekrashevich V.F., Vorobyova I.V., Ivanova I.A., et al. Grain Disk Crusher. *Rural Mechanic*. 2009;(9):23. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=12860245> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
9. Odegov V.A., Komkin A.S., Shilin V.V. The Influence of Circumferential Velocity of Rollers and Material Moisture Content on the Main Indicators of Workflow of a Two-Step Roller Machine. *Perm Agrarian Journal*. 2018;(1):28–33. Available at: <http://agrovest.psa.ru/wp-content/uploads/2018/05/1-2018-28-33.pdf> (accessed 01.03.2022). (In Russ., abstract in Eng.)
10. Marczuk A., Caban J., Kartashevich A.N., et al. Production and Use of Rapeseed Oil in Power Plant Machinery in the Northeast of European Part. *Jokull Journal*. 2017;67(8):8–21.
11. Saitov V.E., Farafonov V.G., Suvorov A.N. Theoretical Motivation of the Technical Decisions of Division of the Corn Mixtures. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2014;(1). Available at: https://www.science-sd.com/456-24505?sd_com=00cdab8c43688528fd43c378b3273f55 (accessed 01.03.2022).
12. Sysuev V.A., Savinykh P.A., Aleshkin A.V. [Two-Stage Grain Flattener for the Production of Grain Feed]. Patent 2,628,297 Russian Federation. 2017 March 10. 4 p. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/50/6f/bc/323f60b6e4f612/RU2015137568A.pdf> (accessed 01.03.2022). (In Russ.)
13. Sysuev V.A., Savinykh P.A., Kazakov V.A., Sychugov Yu.V. [Two-Stage Grain Conditioner for Energy-Saving Technology of Grain Fodder Production]. Patent 2557780 Russian Federation. 2015 July 27. 6 p. Available at: <https://patentimages.storage.googleapis.com/ef/d5/c0/3326dfb8638022/RU2557780C2.pdf> (accessed 01.03.2022). (In Russ.)
14. Kipriyanov F.A., Savinykh P.A., Isupov A.Yu., et al. Prospects for the Use of Microwave Energy in Grain Crop Seeding. *Journal of Water and Land Development*. 2021;(49):74–78. doi: <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.137098>
15. Bulatov S., Nechaev V., Savinykh P., Rucins A. Research Results of Experimental Automated System for Dosing Bulk Materials. In: Proceedings of International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” (26–28 May 2021). Vol. 20. Jelgava; 2021. p. 199–204. doi: <https://doi.org/10.22616/ERDev.2021.20.TF043>
16. Savinykh P.A., Isupov A.Yu., Kipriyanov F.A., Palitsyn A.V. The Results of Experimental Researches of Micronization of Rye Grain. *Vestnik NGIEI*. 2021;(6):26–36. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2021-6-26-36>
17. Savinykh P.A., Isupov A.Y., Kipriyanov F.A. Thermal Treatment of Grain as a Way to Increase Its Digestibility. *International Technical and Economic Journal*. 2021;(2):31–40. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.34286/1995-4646-2021-77-2-31-40>
18. Marczuk A., Caban J., Aleshkin A.V., et al. Modeling and Simulation of Particle Motion in the Operation Area of a Centrifugal Rotary Chopper Machine. *Sustainability*. 2019;11(18). doi: <https://doi.org/10.3390/su11184873>
19. Romaniuk W., Savinykh P., Borek K., et al. The Application of Similarity Theory and Dimensional Analysis to the Study of Centrifugal-Rotary Chopper of Forage Grain. *Energies*. 2021;14(15). doi: <https://doi.org/10.3390/en14154501>
20. Savinykh P., Isupov A., Ivanov I., Ivanovs S. Research in Centrifugal Rotary Grinder of Forage Grain. In: Proceedings of International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”

(26–28 May 2021). Jelgava; 2021. p. 205–211. Available at: <https://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2021/Papers/TF044.pdf> (accessed 01.03.2022).

Submitted 05.03.2022; approved after reviewing 11.04.2022; accepted for publication 15.04.2022

About the authors:

Vasily A. Sysuev, Senior Researcher, Federal Agricultural Research Center of the North-East Named after N. V. Rudnitsky (166a Lenin St., Kirov 610007, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), Professor, Academician of RAS, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1172-005X>, Researcher ID: B-8519-2019, Scopus ID: 56728483000, sisuev@mail.ru

Petr A. Savinykh, Senior Researcher, Federal Agricultural Research Center of the North-East Named after N. V. Rudnitsky (166a Lenin St., Kirov 610007, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5668-8479>, Researcher ID: V-6933-2017, Scopus ID: 56728791200, peter.savinykh@mail.ru

Vladimir A. Kazakov, Senior Researcher at the Laboratory of Livestock Mechanization, Federal Agricultural Research Center of the North-East Named after N. V. Rudnitsky (166a Lenin St., Kirov 610007, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3512-317X>, Researcher ID: CAH-0362-2022, Scopus ID: 56727628500, kazakov.vladimir.263@mail.ru

Yuri V. Sychugov, Senior Researcher at the Laboratory of Livestock Mechanization, Federal Agricultural Research Center of the North-East Named after N. V. Rudnitsky (166a Lenin St., Kirov 610007, Russian Federation), Dr.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6694-9575>, Researcher ID: CAH-1230-2022, Scopus ID: 57202650179, yuri.sychugov@mail.ru

Contribution of the authors:

V. A. Sysuev – scientific guidance, development of terms of reference, and critical analysis of research.

P. A. Savinykh – analysis and finalization of the research program, direct supervision of research, and theoretical research.

V. A. Kazakov – performing experimental and theoretical research, obtaining results.

Yu. V. Sychugov – practical application of the research results and testing.

All authors have read and approved the final manuscript.