Оригинальное исследование
DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-632390 EDN: BEQLWI

Теоретическое обоснование конструктивных параметров питающего устройства шнекового типа в установке для приготовления жидких кормовых смесей

П.Н. Солонщиков, А.В. Шевченко

Вятский государственный агротехнологический университет, Киров, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Большая часть основной продукции животноводства в предстоящие годы будет производиться на существующих фермах в условиях их коллективной аренды, а также в фермерских индивидуальных хозяйствах, что обеспечит интенсивное развитие отрасли.

Цель работы — получение теоретических и аналитических зависимостей, для обоснования конструктивных параметров питающего устройства в установке для приготовления жидких кормовых смесей.

Материалы и методы. Представлена установка для приготовления жидких кормовых смесей представляет собой многофункциональное техническое средство, способное выполнять 3 функции: дозирование материала (заменитель цельного молока), подача жидкости (функция нагнетания) и приготовление смеси (функция смесителя). Даны соответствующие расчётные схемы для определения параметров.

Результаты. Анализ рабочих органов машин и средств механизации по транспортированию сухих компонентов, что шнековый орган, изготовленный по научно обоснованным рекомендациям, может удовлетворить требованиям и особенностям выполняемого им подачи компонента на смешивание.

Процесс отделения сухого компонента и его перемещение к рабочему колесу заключается в следующем. Сухой компонент находится в загрузочной камере 1 и далее под силой тяжести попадет на питающее устройство 2, которое перемещает корм к рабочему колесу. При наличии поступательного движения машины нижняя кромка кожуха шнека, имеющая форму клина, внедряется в компонент валок и отделяет его от поверхности, который затем поступает в рабочую зону шнека. Шнек витками подстругивает часть сухого корма и перемещает её к рабочему колесу установки.

Заключение. Полученные теоретические и приложенные аналитические зависимости позволяют определить конструктивные параметры шнека в том числе, отношение шага шнека к его диаметру, что необходимо учитывать при проектировании установок для приготовления смесей с подачей сухого компонента к рабочему колесу. Кроме того, данную методику можно использовать для написания программ для ЭВМ.

Ключевые слова: установка; сухой компонент; шнек; методика; угол; сила; перемещение; составляющая; подача; орган; требования.

Как цитировать:
Солонщиков П.Н., Шевченко А.В. Теоретическое обоснование конструктивных параметров питающего устройства шнекового типа в установке для приготовления жидких кормовых смесей // Тракторы и сельхозмашины. 2025. Т. 92, № 1. С. 43–48. DOI: 10.17816/0321-4443-632390 EDN: BEQLWI

Рукопись получена: 30.05.2024 **Рукопись одобрена:** 17.03.2025 **Опубликована online:** 27.03.2025

Статья доступна по лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International
© Эко-Вектор, 2025

Original Study Article
DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-632390 EDN: BEQLWI

Theoretical justification of the design parameters of a screw-type feeding device in the facility for the preparation of liquid feed mixtures

Pavel N. Solonshchikov, Artem V. Shevchenko

Vyatka State Agrotechnological University, Kirov, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Most of the main livestock products in the coming years will be produced on existing farms under collective lease conditions, as well as on individual farms, which will ensure intensive management of the industry.

AIM: Study and obtaining of theoretical and analytical dependencies to justify the design parameters of the feeding device in the facility for the preparation of liquid feed mixtures.

METHODS: The presented facility for the preparation of liquid feed mixtures is a multifunctional technical device capable of performing three functions: dosing the material (a whole milk substitute), supplying liquid (the pumping function) and preparing the mixture (the mixer function). The corresponding calculation schemes for determining the parameters are given.

RESULTS: An analysis of the working bodies of machines and mechanization for transporting dry components shows that a screw body, manufactured according to scientifically based recommendations, can meet the requirements and characteristics of the component supplied for mixing.

The process of separating the dry component and moving it to the impeller is as follows. The dry component is located in the loading chamber 1 and then, under the gravity, it falls on the feeding device 2, which moves the feed to the impeller. In case of translational motion of the machine, the wedge-shaped lower edge of the screw housing is inserted into the roller component and separates it from the surface, which then enters the working area of the screw. The auger mills part of the dry food with its flights and moves it to the impeller of the facility.

CONCLUSION: The obtained theoretical and applied analytical dependencies make it possible to determine the design parameters of the screw, including the screw pitch to diameter ratio, which must be taken into account when designing facilities for preparing mixtures with the supply of a dry component to the impeller. This method can also be used for writing computer programs.

Keywords: facility; dry component; screw; method; angle; force; motion; component; feed; body; requirements.

To cite this article:
Solonshchikov PN, Shevchenko AV. Theoretical justification of the design parameters of a screw-type feeding device in the facility for the preparation of liquid feed mixtures. *Tractors and Agricultural Machinery.* 2025;92(1):43–48. DOI: 10.17816/0321-4443-632390 EDN: BEQLWI

Received: 30.05.2024 **Accepted:** 17.03.2025 **Published online:** 27.03.2025

moscow polytech
The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International license
© Eco-Vector, 2025
ECO•VECTOR

ВВЕДЕНИЕ (АКТУАЛЬНОСТЬ)

Разработка установок для приготовления жидких кормовых смесей, является важным фактором, облегчающим трудовые затраты на фермах и комплексах. Существующие установки имеют много недостатков, так как помимо основного блока для смешивания кормов, необходима дозированная подача сухого компонента (корма). Патентная литература предлагает множество решений проблемы подачи компонента в узел смешивания, но наиболее простым является подача с помощью питающего устройства шнекового типа, так как он наиболее часто встречается для дозировки сухого компонента. Вместе с тем, задача совместного привода рабочего органа смешивания и питающего устройства не решается и во всех конструкциях они имеют раздельный привод, что ведет к неоправданным затратам энергии [1–4].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью работы является обоснование параметров питающего устройства шнекового типа, обеспечивающего перемещение материала в рабочее колесо установки для приготовления жидких кормовых смесей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Установка для приготовления смесей, содержит загрузочный бункер, корпус с рабочим колесом, полый шнек со спиральной навивкой, всасывающий и нагнетательный патрубки, полый шнек со спиральной навивкой, одним концом закреплен в рабочем колесе, а его противоположный конец закреплен в подшипнике. Соответственно питающее устройство перемещает материал из загрузочного бункера, при этом питающее устройство вращается вместе с рабочим колесом установки [5–13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ рабочих органов машин и средств механизации по транспортированию сухих компонентов показал, что шнековый орган, изготовленный по научно обоснованным рекомендациям, может удовлетворять требованиям и особенностям выполняемой им подачи компонента на смешивание.

Процесс отделения сухого компонента и его перемещение к рабочему колесу заключается в следующем. Сухой компонент находится в загрузочной камере 1 (рис. 1) и далее под силой тяжести попадет на питающее устройство 2, которое перемещает корм к рабочему колесу. При наличии поступательного движения машины нижняя кромка кожуха шнека, имеющая форму клина, внедряется в компонент валок и отделяет его от поверхности, который затем поступает в рабочую зону шнека. Шнек витками подстругивает часть сухого корма и перемещает её к рабочему колесу установки (рис. 1).

Рассмотрим поведение частицы сухого компонента в рабочей зоне шнека и определим его конструктивные параметры. Условно допустим, что масса компонента, которая вновь поступает в рабочую зону шнека, выполняет функции крышки кожуха шнека и проследим поведение частицы массой m. Будем полагать, что частица массой m в данный момент времени занимает положение под углом ε по отношению к вертикальной плоскости CA (рис. 2). Разложим силу тяжести G частицы на две составляющие [1]: по радиусу шнека и касательной к нему.

При этом получим:

$$ac = G\sin\varepsilon, \quad ac = G\cos\varepsilon.$$

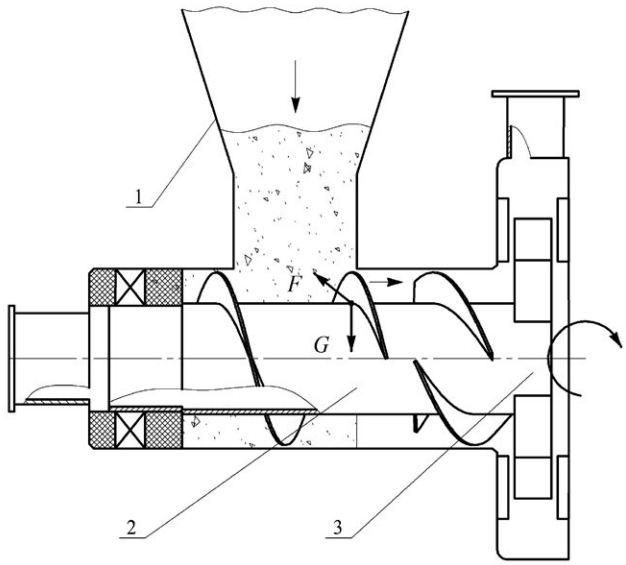

Рис. 1. Схема установки для приготовления смесей: *1* — загрузочная камера; *2* — питающее устройство шнекового типа; *3* — рабочее колесо.
Fig. 1. Scheme of the facility for mixtures preparation: *1* — a loading chamber; *2* — a screw-type feeding device; *3* — an impeller.

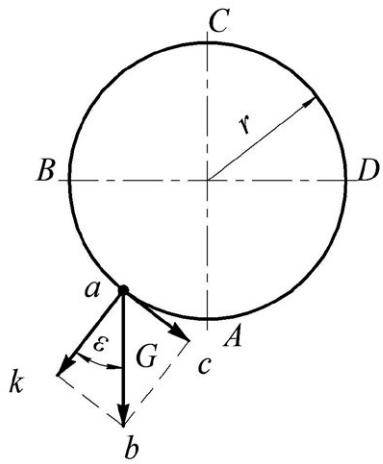

Рис. 2. Схема сил, действующих на частицу в зоне шнека.
Fig. 2. Diagram of forces acting at a particle in the screw area.

DOI: https://doi.org/10.17816/0321-4443-632390

Развернув на плоскости винтовую линию и поверхность кожуха (рис. 3), рассмотрим схему сил, действующих на винтовую линию шнека и поверхность кожуха, и векторов скоростей.

Реакция поверхности R будет направлена под углом $\alpha+\varphi_1$, где $\varphi_1=\mathrm{arctg}\, f_1$, а f_1 — коэффициент трения сухого компонента о винтовую поверхность.

Направление силы трения F проходит по линии, вдоль которой располагается вектор абсолютной скорости V, наклоненный в данном положении к AC под углом β, и является искомой величиной, причем сила трения направленна обратно к V.

На рис. 2 составляющая сила, направленная по радиусу и равная $ak=G\cdot\cos\varepsilon$, проектируется в точку. Отсюда очевидно, что

$$F=N_k f_2, \tag{1}$$

где f_2 — коэффициент трения корма о кожух; N_k — нормальная составляющая реакции.

$$N_k=G\cos\varepsilon+\frac{V^2\cos^2\beta}{r}\frac{G}{g}, \tag{2}$$

причём из рис. 3 видно

$$V\sin\beta=V_r\sin\alpha;\;\; V_r=\frac{V\sin\beta}{\sin\alpha};\;\; V_r\cos\alpha+V\cos\beta=\omega r;\;\; V\left(\cos\beta+\frac{\sin\beta}{\sin\alpha}\cos\alpha\right)=\omega r;\;\; V=\frac{\omega r\sin\alpha}{\sin(\alpha+\beta)}. \tag{3}$$

Из условия равновесия сил имеем:

$$\sum x=0: G\sin\varepsilon+F\cos\beta-R\sin(\alpha+\varphi_1)=0, \tag{4}$$

На основании формул (1)–(4):

$$\frac{f_2\left[\omega^2r^2\cdot\sin^2\alpha\cdot\cos^2\beta+rg\cdot\cos\varepsilon\cdot\sin^2(\alpha+\beta)\right]\cdot\left[\cos\beta-\sin\beta\cdot\mathrm{tg}\left(\alpha+\varphi_1\right)\right]}{rg\sin^2(\alpha+\beta)\left(-\sin\varepsilon\right)}=1. \tag{5}$$

Определим положение частицы, имеющую осевую скорость при $\beta=0^\circ$, $V_0=V\cdot\sin\beta=0$.

Из уравнения (5) следует

$$f_2\left(\frac{\omega^2r}{g\sin\varepsilon}+\mathrm{ctg}\,\varepsilon\right)+1=0. \tag{6}$$

Из формулы (6) может быть определено положение частицы сухого компонента и угол ε, в котором ее осевая скорость равна нулю, и согласно (3) $V=\omega r$.

На основании (6) имеем:

$$\omega^2=-\frac{g}{r\cdot f_2}\cdot\left(f_2\cos\varepsilon+\sin\varepsilon\right). \tag{7}$$

Чтобы правая часть была положительной, необходимо:

$$\left(f_2\cos\varepsilon+\sin\varepsilon\right)<0,\;\; \mathrm{tg}(-\varepsilon)>f_2.$$

При $\varepsilon=180^\circ$ $f_2\cos\varepsilon\cdot\sin\varepsilon=-f_2$.

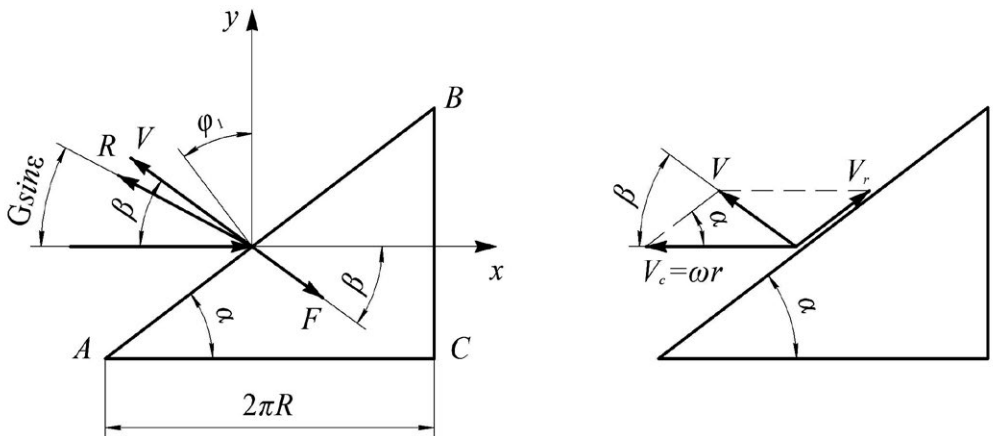

Рис. 3. Схема разложения сил и скоростей.
Fig. 3. Diagram of forces and velocities decomposition.

Это соответствует условию, при котором нормальное давление $N_k = 0$, так как при $\varepsilon = 180^\circ$ и $\beta = 0^\circ$ $N_k = G + \omega^2 r \frac{G}{g} = 0$. Тогда $\omega = \sqrt{\frac{g}{r}}$.

Большую практическую ценность представляет вопрос о выявлении режима, при котором $\beta = 90^\circ$, и частица сухого компонента будет иметь вектор скорости V, параллельный оси шнека.

При этих условиях из (5) получаем

$$\frac{f_2(rg\cos\varepsilon\cdot\cos^2\alpha)\cdot\left[-\mathrm{tg}\left(\alpha+\varphi_1\right)\right]}{rg\cos^2\alpha\cdot(-\sin\varepsilon)} = 1;$$

$$\mathrm{ctg}\,\varepsilon = \frac{\mathrm{ctg}(\alpha+\varphi_1)}{f_2}. \quad (8)$$

Следовательно, частица сухого компонента, оказавшаяся на образующей под углом ε и определяемая из уравнения (8), будет перемещаться вдоль образующей шнека с поступательной скоростью V_0. При $\beta = 90^\circ$ из уравнения (3) получаем

$$V_0 = \omega r\cdot\mathrm{tg}\,\alpha. \quad (9)$$

При $\varepsilon = 0^\circ$ на основании (5) имеем:

$$f_2\left[\omega^2 r^2\sin^2\alpha\cdot\cos^2\beta + rg\sin^2(\alpha+\beta)\right]\cdot$$
$$\cdot\left[\cos\beta - \sin\beta\cdot\mathrm{tg}(\alpha+\varphi_1)\right] = 0.$$

Сомножитель $f_2 \neq 0$ второй сомножитель тоже не может быть равен нулю.

Следовательно, остается положить, что

$$\cos\beta = \sin\beta\cdot\mathrm{tg}\left(\alpha+\varphi_1\right),$$

$$\mathrm{tg}\,\beta = \mathrm{ctg}\left(\alpha+\varphi_1\right) = \mathrm{tg}\left[90^o - \left(\alpha+\varphi_1\right)\right],$$

тогда:

$$\beta = 90^\circ - (\alpha+\varphi_1). \quad (10)$$

Отсюда видно, что из начального положения ($\varepsilon = 0^\circ$) частица корма всегда движется так, что вектор абсолютной скорости V составляет с осью шнека угол $(\alpha+\varphi_1)$ и при $\beta = 90^\circ - (\alpha+\varphi_1)$ находим

$$V_0 = V\sin\beta = \frac{\omega r\sin\alpha\sin\beta}{\sin(\alpha+\beta)} = \frac{\omega r\sin\alpha\cos(\alpha+\varphi_1)}{\cos\varphi_1}. \quad (11)$$

Практически интерес представляет также задача об определении угла наклона периферийной винтовой линии шнека, при котором обеспечивается максимальная осевая скорость и производительность шнека.

Дифференцируя (11), находим:

$$\frac{dV_0}{d\alpha}\cdot\frac{\omega r}{\cos\varphi_1}\left[\cos\alpha\cdot\cos(\alpha+\varphi_1) - \sin\alpha\cdot\sin(\alpha+\varphi_1)\right]$$

и из условия $\frac{dV_0}{d\alpha} = 0$ получим $\mathrm{tg}\,\alpha = \mathrm{ctg}(\alpha+\varphi_1)$ и $\alpha = 45^\circ - \frac{\varphi_1}{2}$.

Получили результат, сходный с тем, который касается винтовой пары в отношении максимального КПД [2,7].

Осевая скорость при $\alpha = 45^\circ - \frac{\varphi_1}{2}$ составит

$$V_0 = \frac{\omega r\sin^2\left(45^\circ - \frac{\varphi_1}{2}\right)}{\cos\varphi_1}. \quad (12)$$

Определим конструктивные параметры шнеков, предназначенных для транспортирования сухого компонента $\mathrm{tg}\,\varphi_1 = 0{,}5...1{,}0$.

При этом пределы $\varphi_1 = 26^\circ 34'$ и $\varphi_2 = 45^\circ$, тогда $\alpha_1 = 45^\circ - \frac{\varphi_1}{2} = 31^\circ 43'$ и $\alpha_2 = 22^\circ 30'$, $\mathrm{tg}\,\alpha_1 = 0{,}618$ и $\mathrm{tg}\,\alpha_2 = 0{,}414$.

Это определяет отношение шага шнека к диаметру в виде

$$\frac{S}{D} = \pi\cdot\mathrm{tg}\,\alpha = 1{,}3...1{,}9.$$

ВЫВОДЫ (ЗАКЛЮЧЕНИЕ)

Полученные теоретическо-аналитические зависимости позволяют определить конструктивные параметры шнека, в том числе, отношение шага шнека к его диаметру, что необходимо учитывать при проектировании установок для приготовления смесей с подачей сухого компонента к рабочему колесу. Кроме того, данную методику можно использовать для написания программ для ЭВМ.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. П.Н. Солонщиков — общее руководство рукописью, разработка математических моделей для определения параметров питающего устройства, А.В Шевченко — разработка задач, написание основного текста, разработка математических моделей, подготовка введения и выводов, а также проведение оптимизационных расчётов. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Раскрытие интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источники финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions. P.N. Solonshchikov — general management of the manuscript, development of the mathematical models for determining the parameters of the supply device; A.V. Shevchenko — task setting, writing the main text, development of the mathematical models, preparing the introduction and conclusions; performing optimization analyses. The authors confirm that their authorship meets the international criteria of the ICMJE (all authors made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Disclosure of interests. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest.

Funding sources. This study was not supported by any external sources of funding

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Mokhnatkin VG, Shulyatyev VN, Filinkov AS, et al. Program and methodology of tests of the device for input and mixing of powdered components with liquid. In: *Improvement of operational indicators of agricultural energy. Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference "Science — Technology — Resource Saving", dedicated to the 60th anniversary of the Faculty of Engineering: Collection of scientific papers.* Kirov: Vyatka State Agricultural Academy, 2012;(13):96–100. (In Russ.) EDN: XYCZEB

2. Mokhnatkin VG, Shulyatyev VN, Filinkov AS, et al. Review of devices and installations for preparation of whole milk substitutes and analysis of their efficiency In: *Improvement of operational indicators of agricultural energy. Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference "Science — Technology — Resource Saving", dedicated to the 60th anniversary of the Faculty of Engineering: Collection of scientific papers.* Kirov: Vyatka State Agricultural Academy, 2012;(13):101–105. (In Russ.) EDN: XYDUKJ.

3. Patent RUS / 20.12.2010 Bul. № 13. Mokhnatkin VG, Shulyatyev VN, Filinkov AS, et al. Device for preparation of mixtures. (In Russ.) EDN: TGUFJE

4. GOST 6134-2007. Dynamic pumps. Test methods. Moscow: Standartinform; 2008. (In Russ.)

5. Mokhnatki VG, Filinkov AS, Solonshchikov PN. Multipurpose pumps for mixing intensification. *Rural mechanizer.* 2013;(8):25. (In Russ.) EDN: RCFKDH

6. Filinkov AS, Solonshchikov PN, Oblasov AN, et al. Device for mixing components with liquid for the preparation of nutrient media. *Bulletin of N.I. Vavilov Saratov State Agrarian University.* 2013;(9):50–53. (In Russ.) EDN: RELJTJ

7. Bulatov SYu, Semenov SV. Analysis of designs of technical means for the preparation of grain molasses. In: *Actual directions of development of engineering and technology in Russia and abroad — realities, opportunities, prospects: Materials and reports, Knyaginino, March 25, 2021.* Knyaginino: Nizhny Novgorod State Engineering and Economic Institute; 2021:26–30. (In Russ.) EDN: BWIXWT

8. Bulatov SYu, Semenov SV. Cause-effect diagram with positive and negative feedbacks of the process of grain molasses production. In: *Problems of modern science and society: preservation and development of the Great Victory heritage, Knyaginino, May 08–13, 2021.* Knyaginino: Nizhny Novgorod State Engineering and Economic Institute; 2021:105–112. (In Russ.) EDN: MGLRBA

9. Patent RUS 146974 / 20.10.2014 Mokhnatkin VG, Shulyatyev VN, Filinkov AS, et al. Installation for preparation of mixtures. (In Russ.) EDN: LALGBF

10. Solonshchikov P, Savinykh P, Ivanovs S. Determination and optimization of feeding device parameters in the plant for preparing liquid feed mixtures. *Ural sustainability research.* 2021;45(340):13–20. doi: 10.2478/plua-2021-0003 (In Russ.) EDN: HTGYII

11. Solonshchikov P, Barwicki J, Savinyh P, Gaworski M. Optimalization of design parameters of experimental installation concerning preparation of liquid feed. Mixtures. Processes. 2021;9(12),2104. (In Russ.) doi: 10.3390/pr9122104 EDN: PYPPKI

12. Gorbunov RM. *Increase of centrifugal milk pump functioning efficiency by means of working bodies improvement and parameters optimization* [dissertation] Kirov; 2007. (In Russ.) EDN: NJJPYJ

13. Bulatov SYu. *Development and improvement of technological lines and technical means of fodder preparation in the conditions of small forms of farming* [dissertation] Knyaginino; 2018. (In Russ.) EDN: YVBRSX

ОБ АВТОРАХ

*** Солонщиков Павел Николаевич,**
канд. техн. наук, доцент,
и.о. зав. кафедрой эксплуатации машин и технологического оборудования;
адрес: Россия, 610017, Киров, Октябрьский пр-кт, д. 133;
ORCID: 0000-0003-4695-71261;
eLibrary SPIN: 2559-6921;
e-mail: solon-pavel@yandex.ru

Шевченко Артём Васильевич,
ассистент кафедры эксплуатации машин и технологического оборудования;
ORCID: 0009-0002-5119-3327;
eLibrary SPIN: 8795-3826;
e-mail: artiom.shievchienko.2014@mail.ru

AUTHORS' INFO

*** Pavel N. Solonshchikov,**
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Acting Head of the Machinery and Technological Equipment Operation Department;
address: 133 Oktyabrsky ave, Kirov, Russia, 610017;
ORCID: 0000-0003-4695-71261;
eLibrary SPIN: 2559-6921;
e-mail: solon-pavel@yandex.ru

Artem V. Shevchenko,
Assistant of the Machinery and Technological Equipment Operation Department;
ORCID: 0009-0002-5119-3327;
eLibrary SPIN: 8795-3826;
e-mail: artiom.shievchienko.2014@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author