

#### 4.3.1. ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Научная статья

УДК 681.3:631.333.5

DOI: 10.53914/issn2071-2243\_2024\_1\_100

EDN: EYZZAK

### Теоретическое определение скорости скольжения подстилочного овечьего навоза по поверхности ворошителя конической треугольной формы

Бибигуль Джексенбаевна Сарбалина<sup>1✉</sup>, Анатолий Иванович Завражнов<sup>2</sup>,  
Владимир Юрьевич Ланцев<sup>3</sup>, Михаил Сергеевич Колдин<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Мичуринский государственный аграрный университет, Мичуринск, Россия

<sup>1</sup> rumasa79@mail.ru<sup>✉</sup>

**Аннотация.** В хозяйствах ЦЧР и других регионов России овцеводство во многом зависит от природно-климатических условий. Традиционно наиболее приемлемым способом содержания овец является стойловый на глубокой несменяемой подстилке, исключая ежедневную уборку и транспортирование навоза. В соответствии с технологией содержания на несменяемой подстилке (измельченная солома, торф, опилки) предусмотрено постоянное добавление в стойло свежего материала, который, смешиваясь с продуктами жизнедеятельности животных, уплотняется и его слой увеличивается в высоту. За стойловый период в помещениях и на выгульных площадках накапливается пласт подстилочного навоза толщиной от 70 см до 1 м. Существуют различные способы уборки накопившейся массы, требующие дополнительных затрат, а также различные функциональные машины, предназначенные для выполнения уборочных работ. Представлен анализ технологии уборки и измельчения подстилочного навоза, разработанной с целью приготовления органического удобрения. Для уборки навоза предложено техническое решение – ворошитель-измельчитель погрузчик подстилочного овечьего навоза, выполненный по патенту на полезную модель 215500 РФ. При движении агрегата рабочий орган, состоящий из нескольких трехгранных клиньев, осуществляет отделение подстилки от поверхности пола с последующим ее разрыхлением. В процессе работы за счет формы рабочего органа масса перемещается по рабочей поверхности клина, растягивается за счет увеличения общей длины соприкосновения с рабочей гранью и разрыхляется. Далее навоз поступает к шнековому транспортеру, который при подаче убираемой массы в транспортное средство, установленное за трактором, дополнительно ее разрыхляет. Выполнен анализ движения частицы убираемой массы при перемещении клина, рассчитаны скорости движения частицы, графически показано взаимодействие трехгранного клина с подстилкой. Обоснована необходимость определения параметров углов клиньев для устранения скопления подстилочной массы при движении по поверхности рабочего органа и обеспечения стабильной работы устройства.

**Ключевые слова:** овцеводство, стойловое содержание овец, глубокая несменяемая подстилка, ворошитель-измельчитель, погрузчик подстилочного навоза, рабочий орган, трехгранный клин, геометрические параметры

**Для цитирования:** Сарбалина Б.Д., Завражнов А.И., Ланцев В.Ю., Колдин М.С. Теоретическое определение скорости скольжения подстилочного овечьего навоза по поверхности ворошителя конической треугольной формы // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2024. Т. 17, № 2(81). С. 100–106. [https://doi.org/10.53914/issn2071-2243\\_2024\\_1\\_100-106](https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2024_1_100-106).

#### 4.3.1. TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT FOR AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX (ENGINEERING SCIENCES)

Original article

### Theoretical dimensioning of the farmyard sheep manure sliding velocity along the surface of a conical triangular litter lifter

Bibigul D. Sarbalina<sup>1✉</sup>, Anatoliy I. Zavrazhnov<sup>2</sup>,  
Vladimir Yu. Lantsev<sup>3</sup>, Mikhail S. Koldin<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Michurinsk State Agrarian University, Michurinsk, Russia

<sup>1</sup> rumasa79@mail.ru<sup>✉</sup>

**Abstract.** In the farms of the Central Chernozem Region and other regions of Russia, sheep breeding largely depends on natural and climatic conditions. Traditionally, the most acceptable method of keeping sheep is a stable on a deep, permanent litter, excluding daily cleaning and transportation of manure. In accordance with the technology of keeping on a permanent litter (crushed straw, peat, wood shredding), a constant addition of fresh material to the stall is provided, which, mixing with animal waste products, condenses and increases in height.

During the stall period, a layer of litter manure accumulates in the premises and on walking grounds from 70 cm to 1 m. There are various ways to clean up the accumulated mass, which require additional costs, as well as various functional machines designed to perform the cleaning function. The analysis of the technology of cleaning and grinding of litter manure, developed for the purpose of preparing organic fertilizer, is presented. For manure harvesting, a technical solution has been proposed, i.e. litter lifter shredder loader of bedding sheep manure, made in accordance with the utility model patent 215500 RF. When the unit is moving, the working body, consisting of several triangular wedges, separates the litter from the floor surface and then loosens it. During operation, due to the shape of the working body, the mass moves along the working surface of the wedge, stretches due to an increase in the total length of contact with the working face and loosens. Next, the manure goes to the screw conveyor, which, when feeding the harvested mass into the vehicle installed behind the tractor, additionally loosens it. The analysis of the motion of a particle of the removed mass during the motion of the wedge is performed, the velocities of the particle movement are calculated, the interaction of a triangular wedge with a litter is graphically shown. The necessity of determining the parameters of the wedge angles to eliminate the accumulation of litter mass when moving along the surface of the working body and ensure stable operation of the device is substantiated.

**Keywords:** sheep breeding, stable sheep keeping, deep permanent litter, litter lifter & shredder, loader of litter manure, working body, triangular wedge, geometric parameters

**For citation:** Sarbalina B.D., Zavrazhnov A.I., Lantsev V.Yu., Koldin M.S. Theoretical dimensioning of the farm-yard sheep manure sliding velocity along the surface of a conical triangular litter lifter. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2024;17(2):100-106. (In Russ.). [https://doi.org/10.53914/issn2071-2243\\_2024\\_2\\_100-106](https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2024_2_100-106).

**В**ведение  
Овцеводство как подотрасль животноводства в хозяйствах Центрально-Черноземного и других регионов России во многом зависит от природно-климатических условий и зональных отраслевых особенностей. В регионах с достаточно длительными и суровыми зимами, когда животные не имеют возможности пастись из-за высокого снежного покрова и достаточно сильных морозов, традиционно наиболее приемлемыми способами содержания овец являются стойлово-пастбищный и стойловый. Стойловый способ подходит хозяйствам с интенсивными методами разведения овец, при котором концентрация поголовья позволяет не только эффективнее использовать оборудование, но и развивать малозатратные технологии производства продуктов овцеводства [4]. При этом в стойловый период животные могут содержаться как на глубокой несменяемой подстилке, так и на щелевых полах.

Содержание овец на глубокой несменяемой подстилке позволяет исключить ежедневную уборку, погрузку и транспортирование навоза. В соответствии с технологией содержания на глубокой несменяемой подстилке (измельченная солома, торф, опилки) предусмотрено постоянное добавление в стойло свежего материала, который постоянно смешивается с продуктами жизнедеятельности животных, растительными остатками грубых кормов, уплотняется во время их перемещения и его слой увеличивается в высоту. Плотность образовавшейся массы может достигать  $800 \text{ кг/м}^3$ . Навоз из помещений убирают весной после выгона овец в поле, поэтому максимальная толщина пласта навоза, которую необходимо разрушить перед удалением из овчарни, может достигать 70 см и более [9, 11]. Убираемая подстилка может перерабатываться либо на органическое удобрение, либо на биотопливо [14].

В настоящее время существуют различные способы уборки накопившегося подстилочного овечьего навоза, а также различные функциональные машины, предназначенные для выполнения уборочных работ.

Удаление уплотненной массы подстилки из помещения требует больших затрат энергии, времени, так как является весьма трудоемким процессом. В качестве технических средств чаще всего используют трактор с бульдозерной навеской (нож-отвал), который также малоэффективен при работе в овчарне. Наиболее целесообразно в этом случае использовать техническое решение, выполненное по патенту РФ на полезную модель 215500, – ворошитель-измельчитель погрузчик подстилочного овечьего навоза, который предварительно разрыхляет слежавшуюся массу и транспортирует ее в тележку, расположенную за трактором [3, 13].

### Методика эксперимента

Технологический процесс удаления навоза реализуется следующим образом. При движении агрегата рабочий орган, состоящий из нескольких трехгранных клиньев (например, четырех), осуществляет отделение подстилки от поверхности пола и ее разрыхление. За счет работы клиньев масса перемещается по рабочей поверхности клина, растягивается за счет увеличения общей длины соприкосновения с рабочей гранью и разрыхляется. Далее навоз поступает к шнековому транспортеру, где он дополнительно разрыхляется и подается в транспортное средство, установленное за трактором.

Для повышения качества выполнения технологического процесса необходимо определить оптимальную форму трехгранного клина.

Основными геометрическими параметрами трехгранного клина являются углы крошения  $\alpha$  и сдвига  $\gamma$ , длина рабочего органа в направлении движения  $l$  (рис. 1) [1, 2].

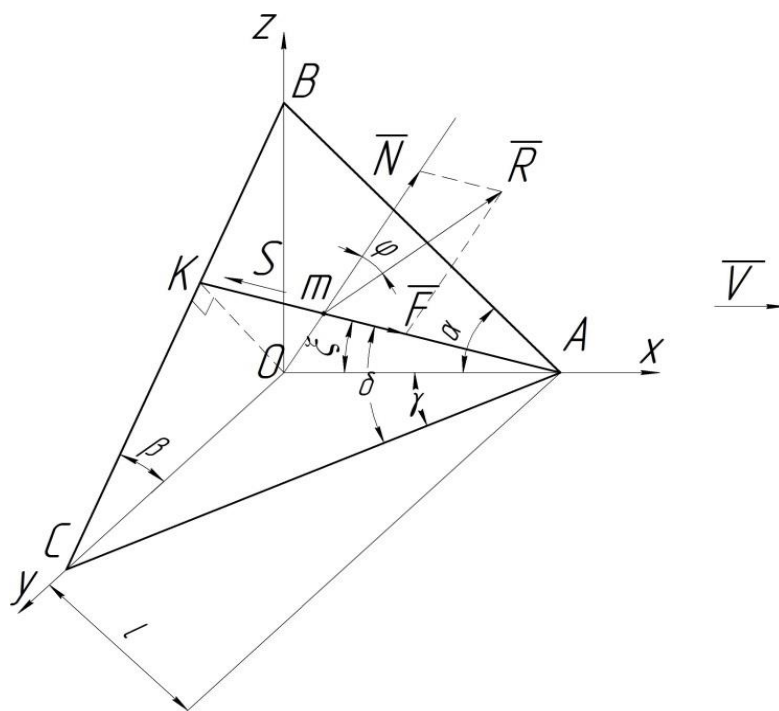


Рис. 1. Взаимодействие трехгранного клина с подстилочным материалом

Для моделирования процесса работы трехгранного клина на первом этапе необходимо определить угол вхождения материала на клин  $\delta$  (рис. 1).

Рассмотрим треугольники, образующие поверхность клина  $ABC$ :

$$\text{из } \triangle OAB \text{ следует } \operatorname{tg} \alpha = \frac{OB}{OA} \rightarrow OB = OA \cdot \operatorname{tg} \alpha;$$

$$\text{из } \triangle OAC \text{ следует } \operatorname{tg} \gamma = \frac{OC}{OA} \rightarrow OC = OA \cdot \operatorname{tg} \gamma; \operatorname{sin} \gamma = \frac{CO}{AC} \rightarrow AC = \frac{CO}{\operatorname{sin} \gamma};$$

$$\text{из } \triangle OCB \text{ следует } \operatorname{tg} \beta = \frac{OB}{OC} = \frac{OA \cdot \operatorname{tg} \alpha}{OA \cdot \operatorname{tg} \gamma} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \gamma}; \operatorname{cos} \beta = \frac{CK}{CO} \rightarrow CK = CO \cdot \operatorname{cos} \beta.$$

Найдем угол траектории движения частицы навоза по поверхности ножа, из  $\triangle ACK$

$$\operatorname{sin} \delta = \frac{KC}{AC} = \frac{CO \cdot \operatorname{cos} \beta}{\frac{CO}{\operatorname{sin} \gamma}} = \operatorname{cos} \beta \cdot \operatorname{sin} \gamma = \operatorname{cos} \left( \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \gamma} \right) \operatorname{sin} \gamma.$$

На рисунке 2 представлена диаграмма изменения угла  $\delta$  в зависимости от геометрических параметров рабочего органа ворошителя-измельчителя, имеющего коническую треугольную форму.

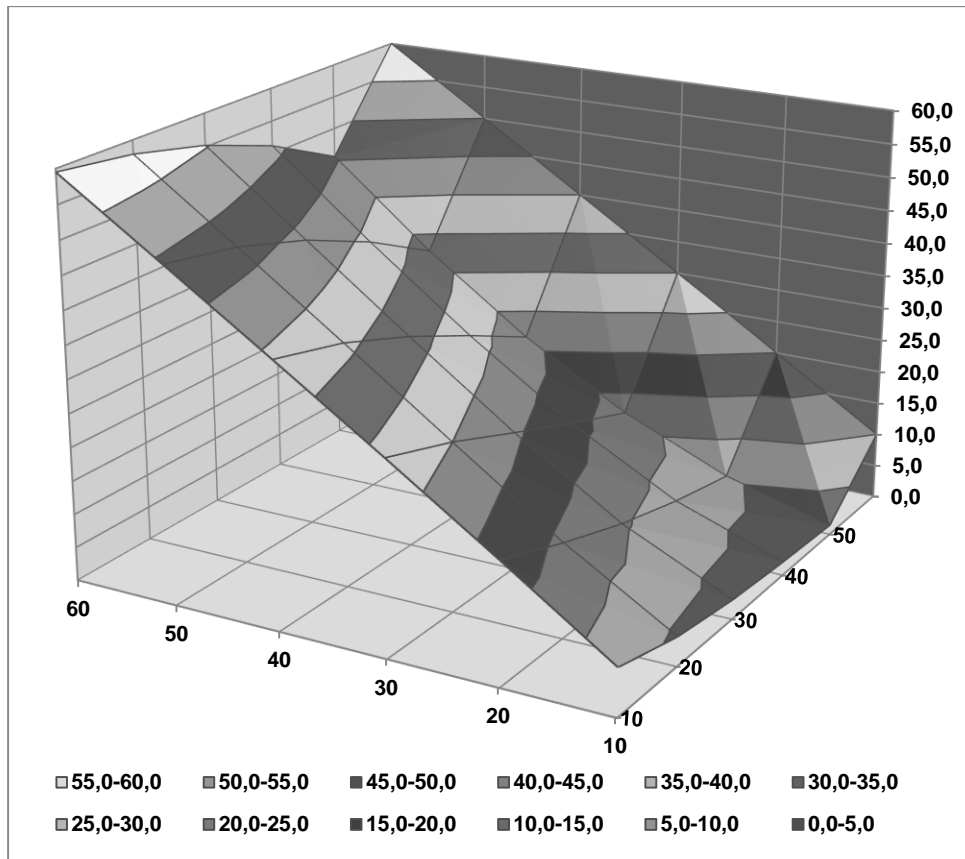


Рис. 2. Зависимость изменения угла  $\delta$  от геометрических параметров рабочего органа

### Результаты и их обсуждение

Большее влияние на угол траектории движения материала оказывает угол  $\gamma$ , следовательно, при проведении экспериментальных исследований одним из значимых факторов является данный угол. Максимальное значение угла вхождения материала на клин  $\delta$  определяем из условия скольжения частиц по поверхности рабочего органа без образования сгруживания [1, 7].

Условие скольжения материала по поверхности клина выполняется, если  $\zeta < 90 - \varphi$ , где  $\varphi$  – угол трения подстилочной массы при движении по лезвию.

Значение угла  $\zeta$  находим из следующих взаимозависимостей:

$$\begin{aligned} \cos\delta &= \frac{AS}{AC} \rightarrow AS = AC \cdot \cos\delta; \\ \cos\gamma &= \frac{OA}{AC} \rightarrow AC = \frac{OA}{\cos\gamma}; \\ \cos\zeta &= \frac{OA}{AK} = \frac{OA}{AC \cdot \cos\delta} = \frac{OA}{\frac{OA}{\cos\gamma} \cdot \cos\delta} = \frac{\cos\gamma}{\cos\delta}. \end{aligned}$$

При движении материала по поверхности трехгранного клина (траектория движения  $S$ ) возникает сила трения  $R$ , которая определяет траекторию движения подстилочной массы по плоскости клина (рис. 1).  $R$  является результирующей силой  $N$  и  $F$ , где  $F$  – сила трения, направленная в сторону, противоположную движению [6, 8, 12].

Рассмотрим движение частицы подстилочной массы при перемещении клина по линии  $AK$ . Направление движения агрегата соответствует оси  $Ox$ , движение частицы навоза происходит по линии  $AK$ . За время  $t$  агрегат перемещается из точки  $A$  в точку  $A_1$ , за это же время частица навоза перемещается из точки  $A$  в точку  $K$  (рис. 3).

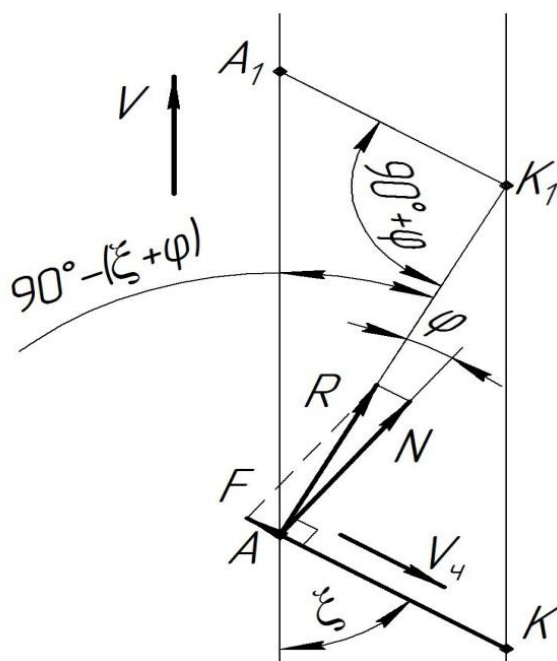


Рис. 3. Определение скорости движения частицы подстилочной массы

Из точки  $A$ , являющейся началом движения частицы подстилочной массы, проведем прямую  $AK$ , отклоненную от траектории движения агрегата под углом  $\xi$ , в точке  $A$  приложим действующие силы  $F$ ,  $N$  и  $R$ , где  $R$  отклонена на угол  $\varphi$  (рис. 3). В точке  $K$  осуществляется сход частицы с поверхности клина, при этом отрезок  $KK_1$  обозначает направление конца лезвия клина [5, 10, 11].

Двигаясь с некоторой скоростью  $V_{\text{ч}}$  по поверхности ножа, частицы подстилочной массы проходят путь  $AK$  за время  $t$ , за это же время агрегат перемещается на расстояние  $AA_1$ , двигаясь со скоростью  $V$ .

Тогда

$$AK = V_{\text{ч}} \cdot t \rightarrow t = \frac{AK}{V_{\text{ч}}};$$

$$AA_1 = V \cdot t \rightarrow t = \frac{AA_1}{V}.$$

Следовательно,

$$\frac{AK}{V_{\text{ч}}} = \frac{AA_1}{V} \rightarrow V_{\text{ч}} = V \frac{AK}{AA_1}.$$

Величину  $AA_1$  можно найти по теореме синусов:

$$\frac{AA_1}{\sin(90 + \varphi)} = \frac{A_1K_1}{\sin(90 - (\xi + \varphi))}.$$

Так как  $AK = A_1K_1$ , то

$$AA_1 = AK \frac{\cos \varphi}{\cos(\xi + \varphi)}.$$

После подстановки значения  $AA_1$  в уравнение  $V_{\text{ч}}$  получим

$$V_{\text{ч}} = V \frac{AK}{AK \frac{\cos \varphi}{\cos(\xi + \varphi)}} = V \frac{\cos(\xi + \varphi)}{\cos \varphi}.$$

**Выводы**

В результате проведенного исследования показано, что знание скорости движения частицы подстилочной массы по поверхности рабочего органа позволяет определить такие параметры углов трехгранного клина, при которых масса не будет накапливаться на поверхности и обеспечивается стабильная работа ворошителя-измельчителя погрузчика подстилочного овечьего навоза.

---

**Список источников**

1. Бледных В.В. Законы Ньютона при исследовании и проектировании почвообрабатывающих орудий: учебное пособие для студентов, магистрантов, аспирантов и конструкторов. Челябинск: ФГБОУ ВПО «Челябинская государственная агроинженерная академия», 2011. 56 с.
2. Бледных В.В. Основные закономерности силового взаимодействия трехгранного клина с почвой // Достижения науки и техники АПК. 2008. № 8. С. 33–35.
3. Ворошитель-измельчитель погрузчик подстилочного овечьего навоза: патент на полезную модель 215500 Российская Федерация. Хмыров В.Д., Сарбалина Б.Д., Труфанов Б.С. и др. № 2022110718; заявл. 19.04.2022; опублик. 15.12.2022, Бюл. № 35. 3 с.
4. Мирзоянц Ю.А., Фириченков В.Е., Лебедев Д.С. и др. Совершенствование технологии и технических средств стойлового способа содержания овец применительно к центральному региону РФ // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2013. № 3(11). С. 213–223.
5. Пикушов А.Н., Драгуленко В.В. Сопротивление перемещения трехгранного клина в почве [Электронный ресурс] // Труды Кубанского аграрного университета. 2009. № 16. URL: <https://kgau-works.kubsau.ru/> (дата обращения: 12.12.2023).
6. Пикушов А.Н. Снижение сопротивления при перемещении в почве трехгранного клина [Электронный ресурс] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. Научный журнал КубГАУ. 2006. № 18(02). URL: <http://ej.kubagro.ru/2006/02/12/p12.asp> (дата обращения: 12.12.2023).
7. Свечников П.Г. Модернизация почвообрабатывающих рабочих органов на основе исследования процесса их взаимодействия с почвой: автореферат дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01. Челябинск, 2013. 44 с.
8. Сидоренко С.М., Петунин А.Ф., Ефремова В.Н. Крошение пласта трехгранным клином [Электронный ресурс] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. Научный журнал КубГАУ. 2014. № 101(07). URL: <http://ej.kubagro.ru/viewaut.asp?id=3972> (дата обращения: 12.12.2023).
9. Федорова К.В., Старцев А.С., Хмыров В.Д. и др. Физико-механические свойства овечьего навоза // Аграрный научный журнал. 2023. № 3. С. 150–153. DOI: 10.28983/asj.y2023i3pp150-153. DOI: 10.28983/asj.y2023i3pp150-153.
10. Хмыров В.Д., Куденко В.Б. Совершенствование средств механизации уборки навоза глубокой подстилки: монография. Мичуринск: Изд-во Мичуринского ГАУ, 2011. 125 с.
11. Хмыров В.Д., Куденко В.Б., Труфанов Б.С. Технология производства и уборки подстилочного навоза // Мировой опыт и перспективы развития сельского хозяйства: материалы международной науч.-практ. конф., посвященной 95-летию ФГОУ ВПО «Воронежский государственный аграрный университет» (Воронеж, 23–24 октября 2007 г.). Воронеж: ФГОУ ВПО Воронежский ГАУ, 2008. Ч. 1. С. 159–162.
12. Хмыров В.Д., Куденко В.Б., Труфанов Б.С. Устройство для выгрузки навоза глубокой подстилки // Сельский механизатор. 2008. № 11. С. 34.
13. Хмыров В.Д., Сарбалина Б.Д., Федорова К.В. Экспериментальная установка ворошителя-измельчителя погрузчика овечьего навоза // Современная наука: теория методология, практика: материалы IV Всероссийской (национальной) науч.-практ. конф. (Тамбов, 20–21 апреля 2022 г.). Тамбов: Изд-во ИП Чеснокова А.В., 2022. С. 300–302.
14. Хмыров В.Д., Узеринов Л.Г., Куденко В.Б. Технология переработки подстилочного навоза // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2006. № 5. С. 11.

**References**

1. Blednykh V.V. Newton's laws in the study and design of soil tillage implements: textbook for students, undergraduates, postgraduates and designers. Chelyabinsk: Chelyabinsk State Agroengineering Academy Publishers; 2011. 56 p. (In Russ.).
2. Blednykh V.V. The main laws of power interaction of three-edged wedge with a soil. *Achievements of Science and Technology of Agro-Industrial Complex*. 2008;8:33-35. (In Russ.).

3. Litter lifter & grinder, loader of sheep manure: Utility Model Patent 215500 Russian Federation. Khmyrov V.D., Sarbalina B.D., Trufanov B.S. et al. No. 2022110718; claimed 19. 04.2022; published 15.12.2022, Bulletin 35. 3 p. (In Russ.).
4. Mirzoyants Yu.A., Firichenkov V.E., Lebedev D.S. et al. Improving the technology and means of penning method the maintenance of sheep in relation to the Central Region of the Russian Federation. *Journal of VNIIMZH*. 2013;3(11):213-223. (In Russ.).
5. Pikushov A.H., Dragulenko V.V. Resistance of movement of a triangular wedge in the soil. *Proceedings of the Kuban Agrarian University*. 2009;16. URL: <https://kgau-works.kubsau.ru>. (In Russ.).
6. Pikushov A.N. Reduction of resistance when moving a triangular wedge in the soil. *Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University. KubGAU Scientific Journal*. 2006;18(02). URL: <http://ej.kubagro.ru/2006/02/12/p12.asp>. (In Russ.). (In Russ.).
7. Svechnikov P.G. Modernization of tillage working bodies based on the study of the process of their interaction with the soil: Author's Abstract of Doctoral Dissertation in Engineering Sciences: 05.20.01. Chelyabinsk; 2013. 44 p. (In Russ.).
8. Sidorenko S.M., Petunin A.F., Efremova V.N. Layer destruction with the trihedral wedge. *Polythematic Network Electronic Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University. KubGAU Scientific Journal*. 2014;101(07). URL: <http://ej.kubagro.ru/a/viewaut.asp?id=3972>. (In Russ.).
9. Fedorova K.V., Startsev A.S., Khmyrov V.D. et al. Physical and mechanical properties of sheep manure. *Agricultural Scientific Journal*. 2023. No. 3. pp. 150-153. DOI: 10.28983/asj.y2023i3pp150-153. (In Russ.).
10. Khmyrov V.D., Kudenko V.B. Improving mechanical means for deep litter manure removal: monograph. Michurinsk: Michurinsk State Agrarian University Publishers; 2011. 125 p. (In Russ.).
11. Khmyrov V.D., Kudenko V.B., Trufanov B.S. Technology of production and removal of litter manure. World experience and prospects of agricultural development: Proceedings of the International Research-to-Practice Conference dedicated to the 95<sup>th</sup> anniversary of Voronezh State Agrarian University (Voronezh, October 23-24, 2007). Voronezh: Voronezh State Agrarian University Publishers. 2008;1:159-162. (In Russ.).
12. Khmyrov V.D., Kudenko V.B., Trufanov B.S. Device for unloading of deep litter manure. *Rural Engineer*. 2008;11:34. (In Russ.).
13. Khmyrov V.D., Sarbalina B.D., Fedorova K.V. Experimental installation of a litter lifter & grinder, loader of sheep manure. Modern science: theory, methodology, practice: Proceedings of the IV All-Russian (National) Research-to-Practice Conference (Tambov, April 20-21, 2022). Tambov: Publishing House of Chesnokov A.V.; 2022:300-302. (In Russ.).
14. Khmyrov V.D., Uzerinov L.G., Kudenko V.B. Technology of litter manure processing. *Mechanization and Electrification of Agriculture*. 2006;5:11. (In Russ.).

#### Информация об авторах

Б.Д. Сарбалина – аспирант кафедры технологических процессов и техносферной безопасности ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», [rumasa79@mail.ru](mailto:rumasa79@mail.ru).

А.И. Завражнов – академик РАН, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», [aiz@mgau.ru](mailto:aiz@mgau.ru).

В.Ю. Ланцев – доктор технических наук, зав. кафедрой транспортно-технологических машин и основ конструирования, ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», [lan-vladimir@yandex.ru](mailto:lan-vladimir@yandex.ru).

М.С. Колдин – кандидат технических наук, доцент кафедры транспортно-технологических машин и основ конструирования, ФГБОУ ВО «Мичуринский государственный аграрный университет», [koldinms@yandex.ru](mailto:koldinms@yandex.ru).

#### Information about the authors

B.D. Sarbalina, Postgraduate Student, the Dept. of Technological Processes and Technosphere Safety, Michurinsk State Agrarian University, [rumasa79@mail.ru](mailto:rumasa79@mail.ru).

A.I. Zavrazhnov, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Chief Research Scientist, Michurinsk State Agrarian University, [aiz@mgau.ru](mailto:aiz@mgau.ru).

V.Yu. Lantsev, Doctor of Engineering Sciences, Head of the Dept. of Transport Technological Machines and Principles of Design, Michurinsk State Agrarian University, [lan-vladimir@yandex.ru](mailto:lan-vladimir@yandex.ru).

M.S. Koldin, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Transport Technological Machines and Principles of Design, Michurinsk State Agrarian University, [koldinms@yandex.ru](mailto:koldinms@yandex.ru).

Статья поступила в редакцию 20.02.2024; одобрена после рецензирования 26.03.2024; принята к публикации 02.04.2024.

The article was submitted 20.02.2024; approved after reviewing 26.03.2024; accepted for publication 02.04.2024.

© Сарбалина Б.Д., Завражнов А.И., Ланцев В.Ю., Колдин М.С., 2024