

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 636.084.743

DOI: 10.26897/2687-1149-2023-1-40-44

**Лабораторное исследование дозирующего устройства для кормовых добавок***Евгений Александрович Никитин, младший научный сотрудник*evgeniy.nicks@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Аннотация. Представленное экспериментальное исследование служит основой разработки дозатора к роботизированному устройству для обслуживания кормового стола на животноводческих комплексах. Во введении проанализированы тенденции развития машин для внутрихозяйственного производства комбикормов с использованием дозирующего и весового оборудования, описаны роль и ключевые индикаторы эффективности, использования комбикормов собственного производства для животноводческих комплексов. Представлены способ оптимизации конструктивных параметров шнековых дозаторов кормовых добавок, принципиальная схема и фотоснимок экспериментальной установки. Для управления электродвигателем экспериментальной установки была разработана математическая модель, учитывающая частоту оборотов электродвигателя. В качестве математического аппарата для обработки экспериментальных данных, построения поверхностей отклика и регрессионных уравнений использовалась математическая модель второго порядка. Эксперимент предполагал 5-кратное весовое измерение погрешности дозирования кормовых добавок для каждого типа конструкции шнека.

Ключевые слова: роботизация животноводства, автоматизированное кормление КРС, цифровая ферма, технологии кормления КРС

Формат цитирования: Никитин Е.А. Лабораторное исследование дозирующего устройства для кормовых добавок // Агроинженерия. 2023. Т. 25. № 1. С. 40-44. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-1-40-44.

© Никитин Е.А., 2023

ORIGINAL PAPER

Laboratory study of a dosing device for feed additives*Evgeny A. Nikitin, Junior Research Engineer*evgeniy.nicks@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0918-2990>Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 1st Institutsky Proezd Str., Bld 5, Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract. The experimental study presented in the article forms the basis for designing a dispenser servicing a robotic feed table on livestock farms. In the introduction, the author analyzes trends in the development of machines for on-farm production of compound feeds using dosing and weighing equipment, and describes the role and key performance indicators of the use of compound feeds of on-farm production for livestock breeding complexes. The articles presents a method for optimizing the design parameters of screw-type feed additive dispensers, a schematic diagram and a photo of an experimental installation. To control the electric motor of the experimental installation, a mathematical model was developed that takes into account the electric motor speed. A second-order mathematical model was used as a mathematical framework for processing experimental data, constructing response surfaces and regression equations. The experiment assumed a five-fold weight measurement of the dosing error of feed additives for each type of the screw design.

Keywords: animal husbandry robotization, automated cattle feeding, digital farm, cattle feeding technologies

For citation: Nikitin E.A. Laboratory study of a dosing device for feed additives. Agricultural Engineering (Moscow), 2023;25(1):40-44. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-1-40-44>.

Введение. На животноводческих комплексах, содержащих крупный рогатый скот молочного направления, в качестве ключевых критериев оценки эффективности чаще всего выделяют продуктивность, здоровье животных и санитарные качества получаемого молока, что позволяет формировать доход животноводческого комплекса [1].

Во многом перечисленные критерии эффективности определяются качеством кормления животных,

формируемым комплексным подходом в составлении рационов с использованием современного технологического оборудования для его приготовления [2-3].

За последние 10-15 лет в Российской Федерации внедряются малогабаритные, до 4 т в 1 ч, комбикормовые заводы производительностью гранулированного комбикорма для крупного рогатого скота с общим поголовьем до 5000 гол [4-6]. Подобные технологические

линии внедрены в ряде агрофирм АО «Зеленоградское», ООО «Аквагранула», ФГУП «Пойма» и др.

Малогобаритные комбикормовые заводы представляют собой отапливаемое помещение складского типа, где в технологической линии имеется следующее оборудование: пневматические зерновые дробилки; самоточные и пневматические рукава для транспортировки; бункеры-дозаторы со шнековым оборудованием; весовое оборудование; цепные и ленточные транспортеры; парогенератор; экструдер; гранулятор и др. Популярными производителями подобного оборудования являются Агропоставка, Экспро М, Жаско, ДозаАгро, РОМАКС и др. [7].

Внедрение технологических линий по производству комбикорма дает ряд преимуществ для фермера, а именно:

- возможность самостоятельной переработки зерновых культур;
- повышение усваиваемости животными зерновых культур, подвергнутых измельчению при приготовлении комбикорма;
- снижение бактериального фона используемого сырья посредством термической обработки при экструдировании или паром при гранулировании;
- изготовление комбикорма для различных технологических групп по персональной рецептуре;
- снижение затрат на экспертизу используемого комбикорма (фермер знает, из чего сделан комбикорм) [8-12].

Использование концентрированных минеральных и других кормовых добавок позволяет составить полноценную кормовую смесь, обладающую достаточным количеством энергии и витаминов, что приводит к росту показателей продуктивности, повышению репродуктивности стада, снижению падежа поголовья [12-15].

Минеральные добавки и премиксы имеют малую долю в рационе (менее 1%), поэтому точность дозирования подобных сыпучих материалов является приоритетной при разработке и изготовлении технологического оборудования.

В сельском хозяйстве дозирование сыпучих материалов в основном осуществляется с помощью шнековых дозаторов, управляемых электродвигателями с частотным преобразователем посредством сигналов с тензодатчиков емкости, в которую дозируется материал. При введении концентрированных кормовых добавок в комбикорм необходимо обеспечить точность механических связей исполнительных механизмов (шнека и электродвигателя).

Производители шнекового оборудования используют в основном типовые формулы расчета, которые зачастую не учитывают физико-механические свойства дозируемого материала и другие характеристики, что в последующем влечет высокие погрешности дозирования. Поэтому актуальной является разработка дозатора к роботизированному устройству для обслуживания кормового стола на животноводческих комплексах. Ход его разработки представлен в исследованиях [16-17].

Цель исследований: выявление конструктивных параметров шнекового дозатора, обеспечивающего

минимальную погрешность дозирования кормовых добавок.

Материалы и методы. Для проведения экспериментального исследования по оптимизации конструктивных параметров дозатора кормовых добавок подбирались конструкция шнеков для дозирования сыпучих материалов – в частности, кормовой добавки AgroFeed 1110, и осуществлялось ее проектирование с использованием программного обеспечения Компас-3D. В качестве ключевых параметров учитывались внешний диаметр спирали (для всех $D = 0,048$ м), внутренний диаметр спирали (d) (диаметр вала), длина навивки на валу (для всех $l = 320$ мм), количество витков (N) и шаг спирали (S).

В ходе теоретического исследования выявлено, что в предлагаемой установке при постоянном значении внешнего диаметра спирали $D = 0,048$ м для всех типов шнеков существенное влияние на погрешность дозирования кормовых добавок оказывают шаг спирали, внутренний диаметр спирали (диаметр вала) и уровень наполнения бункера (V , %).

С целью достоверного проведения эксперимента по оптимизации конструктивных параметров и исключения повторяемости изменяемых параметров каждый шнек был изготовлен с применением технологии 3D-печати в соответствии со следующими параметрами (рис. 1):

- a) $d = 0,04$ м; $N = 16$; $S = 0,02$ м;
- b) $d = 0,04$ м; $N = 8$; $S = 0,04$ м;
- c) $d = 0,04$ м; $N = 5,3$; $S = 0,06$ м;
- d) $d = 0,03$ м; $N = 16$; $S = 0,02$ м;
- e) $d = 0,03$ м; $N = 8$; $S = 0,04$ м;
- f) $d = 0,03$ м; $N = 5,3$; $S = 0,06$ м;
- g) $d = 0,02$ м; $N = 16$; $S = 0,02$ м;
- h) $d = 0,02$ м; $N = 8$; $S = 0,04$ м;
- i) $d = 0,02$; $N = 5,3$; $S = 0,06$ м.

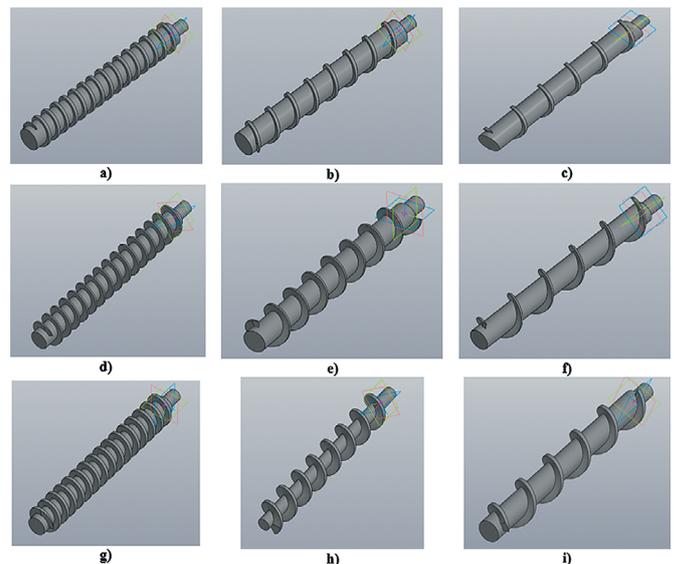


Рис. 1. Типы экспериментальных образцов шнеков с различными конструктивными параметрами для дозатора кормовых добавок

Fig. 1. Types of experimental samples of screws with different design parameters for a feed additive dispenser

Экспериментальные данные, получаемые в ходе исследования представленных конструкций шнеков, обрабатывались с помощью математической модели второго порядка, позволяющей провести регрессионный анализ:

$$\hat{y} = c_0 + \sum_{i=1}^m c_i x_i + \sum_{i < j} c_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^m c_{ii} x_i^2. \tag{1}$$

В качестве переменных величин модели выступают диаметр вала d , шаг спирали s и уровень заполненности бункера r .

Коэффициенты уравнения регрессии вычислялись с использованием программного пакета MATLAB по методу наименьших квадратов. Оценка значимости уравнения регрессии производилась на основе F-критерия Фишера, которому предшествует дисперсионный анализ:

$$\sigma_{\text{факт}}^2 = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{m}; \quad \sigma_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - m - 1}, \tag{2}$$

где m – число переменных параметров в модели; n – число опытов; \hat{y} – значения измеряемой величины, определяемые уравнением регрессии; \bar{y} – среднее значение измеряемой величины.

Сопоставляя факторную и остаточную дисперсии в расчете на одну степень свободы, получим величину F-критерия Фишера:

$$F = \frac{\sigma_{\text{факт}}^2}{\sigma_{\text{ост}}^2}. \tag{3}$$

Для нахождения оптимальных значений диаметра вала, шага спирали и уровня заполненности бункера

уравнение регрессии исследуется на положение точки минимума.

Результаты и их обсуждение. В экспериментальной установке для определения конструктивных параметров дозатора, обеспечивающих наименьшую погрешность, конструкция бункера выполнена в виде лофтированного фланца, имеющего круглое сечение в верхней части, плавно переходящее в прямоугольное сечение у шнека (рис. 2). В качестве привода шнека дозатора используются шаговый двигатель и плата управления, которые позволяют задавать режим работы дозатора, учитывая количество оборотов в единицу времени. Экспериментальная установка содержит источник питания переменного тока, преобразователь переменного тока в постоянный с напряжением 12 В, драйвер управления электродвигателем, позволяющий генерировать различное количество выпускаемых управляющих импульсов, которые прямо пропорционально влияют на частоту вращения шагового электродвигателя.

При проведении экспериментального исследования характеристики работы электродвигателя оценивались посредством подключения платы управления электродвигателем к виртуальному осциллографу в программе Matlab.

Повторяемость измерений для каждого типа конструкции шнека составляла 15 раз. Таким образом, суммарное количество измерений составило 135.

На основании опытных данных получены уравнения поверхностей отклика (4)-(6) с использованием программного пакета MATLAB Optimization Toolbox.

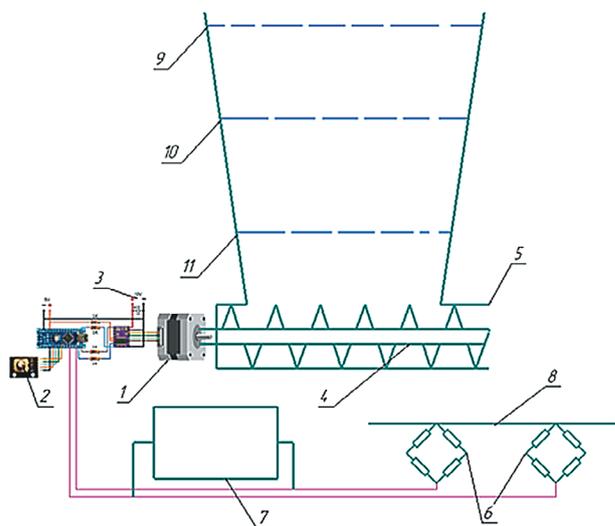


Рис. 2. Экспериментальная установка для лабораторного исследования дозирования кормовых добавок:

- 1 – электропривод шнека; 2 – плата управления электроприводом; 3 – регулятор частоты вращения электропривода;
- 4 – сменный шнек; 5 – корпус дозатора; 6 – весовые датчики; 7 – цифровой индикатор; 8 – поверхность/ёмкость сбора дозируемого материала; 9 – уровень наполнения бункера (67...100%); 10 – уровень наполнения бункера (33...67%); 11 – уровень наполнения бункера (1...33%)

Fig. 2. Experimental installation for the laboratory testing of feed additive dosing:

- 1 – electric drive of the screw; 2 – electric drive control board; 3 – electric speed controller; 4 – replaceable screw;
- 5 – dispenser housing; 6 – weight sensors; 7 – digital indicator; 8 – surface/collection capacity of the metered material;
- 9 – hopper filling level (67 to 100%); 10 – hopper filling level (33 to 67%); 11 – hopper filling level (1 to 33%)

Уравнение регрессии при заполненности бункера 0...33% представлено как

$$\delta Q_1 = 0,061d^2 + 0,03ds + 0,006s^2 - 4,18d - 1,12s + 72,96. \quad (4)$$

При заполненности бункера на 33...67%

$$\delta Q_2 = 0,043d^2 + 0,023ds + 0,006s^2 - 2,97d - 0,93s + 52,81. \quad (5)$$

При заполненности бункера на 67...100%

$$\delta Q_3 = 0,05d^2 + 0,017ds + 0,008s^2 - 3,14d - 0,89s + 53,54. \quad (6)$$

С использованием программного пакета для графического анализа данных в соответствии уравнениям (4-6) построены поверхности отклика отклонения опытных значений дозирования материала от расчетных значений (рис. 3).

Для оценки влияния уровня наполнения бункера сравнили поверхности отклика при разных уровнях заполненности бункера в единой системе координат (рис. 4).

Поверхности отклика анализировались на положение минимума в области допустимых значений для параметров диаметра вала и шага спирали. Было выявлено, что самые низкие точки поверхностей отклика близко расположены относительно друг друга и несущественно влияют на конструктивные параметры анализируемых шнеков. Поэтому принято решение не учитывать влияние этого фактора на погрешность дозирования.

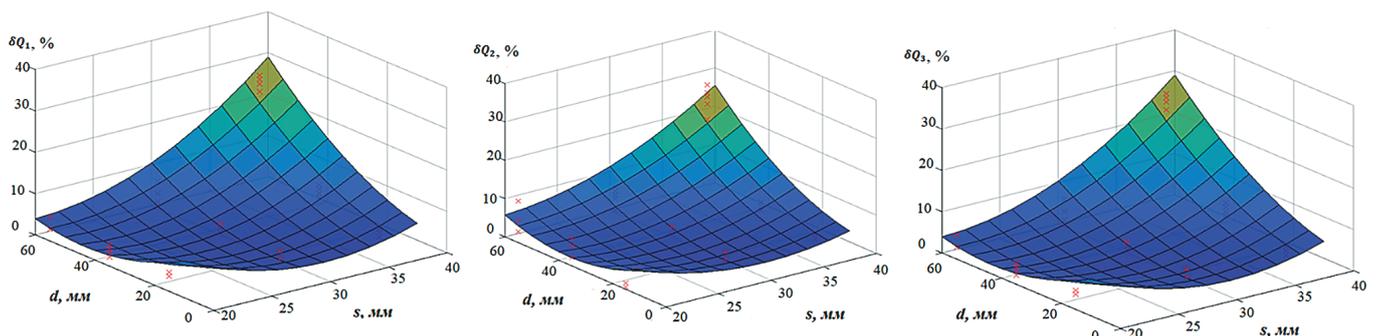


Рис. 3. Поверхности отклика при различных уровнях наполнения бункера: а – 0...33%; б – 33...67%; в – 67...100%

Fig. 3. Response surfaces at different hopper filling levels: а – 0 to 33%; б – 33 to 67%; в – 67 to 100%

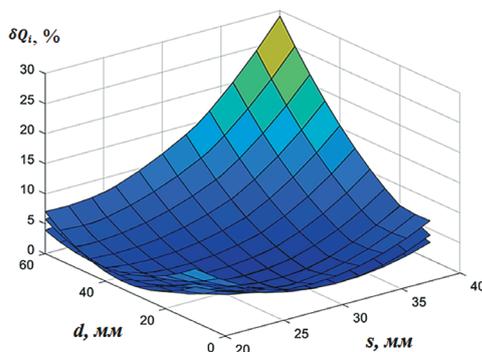


Рис. 4. Поверхности отклика в единой системе координат

Fig. 4. Response surfaces in a single coordinate system

Список использованных источников

1. Булатов С.Ю., Нечаев В.Н., Сергеев А.Г., Савиных П.А. Результаты исследований весового дозирования ингредиентов комбикорма // Техника и оборудование для села. 2021. № 1(283). С. 20-24. EDN: YUQNPU
2. Булатов С.Ю., Нечаев В.Н., Сергеев А.Г. Система дозирования компонентов комбикорма // Кормление сельскохозяйственных животных и кормопроизводство. 2021. № 2(187). С. 62-70. <https://doi.org/10.33920/sel-05-2102-06>
3. Булатов С.Ю. Совершенствование рабочего процесса кормоприготовительных машин путем обоснования их конструктивных и режимных параметров // Вестник НГИЭИ. 2017. № 2(69). С. 45-53. EDN: YGQCJR
4. Nikitin E.A., Pavkin D.Y., Izmailov A.Yu., Aksenov A.G. Assessing the homogeneity of forage mixtures using an RGB

Выводы

Экспериментальные исследования показали, что минимальную погрешность (менее 1%) дозирования кормовой добавки AgroFeed 1110 обеспечивает шнек с внутренним диаметром 30,1 мм, шагом спирали 17,48 мм и частотой вращения 20...60 об/мин.

References

1. Bulatov S.Yu., Nechaev V.N., Sergeev A.G., Savinykh P.A. Results of research of weight batching of feed compound ingredients. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021;1(283):20-24. (In Rus.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-1-20-24>
2. Bulatov S.Yu., Nechaev V.N., Sergeev A.G. System of components dosing in compound feed. *Feeding of Farm Animals and Feed Production*. 2021;2(187):62-70. (In Rus.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-1-20-24>
3. Bulatov S.Yu. Improving workflow of the feed preparing machines by studying their constructional and mode parameters. *Vestnik NGIEI*. 2017;2(69):45-53. (In Rus.)
4. Nikitin E.A., Pavkin D.Y., Izmailov A.Yu., Aksenov A.G. Assessing the homogeneity of forage mixtures using an RGB

camera as exemplified by cattle rations. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2022;12(7):3230. <https://doi.org/10.3390/app12073230>

5. Pavkin D.Yu., Shilin D.V., Nikitin E.A., Kiryushin I.A. Designing and simulating the control process of a feed pusher robot used on a dairy farm. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021;11(22):10665. <https://doi.org/10.3390/app112210665>

6. Никитин Е.А., Кирсанов В.В. Направления и тенденции развития в автоматизации и механизации доения коров // *Материалы конференции: Сборник студенческих научных работ*. 2017. Т. 23. С. 131-133. EDN: YZJLIL

7. Купреенко А.И., Исаев Х.М., Михайличенко С.М. Обобщенный граф состояний автоматического кормовагона при обслуживании технологических групп животных // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. № 2(31). С. 63-67. EDN: XWHNNJ

8. Купреенко А.И., Исаев Х.М.О., Михайличенко С.М. Настройка автоматического кормового вагона на заданную норму выдачи // *Агроинженерия*. 2020. № 4 (98). С. 20-25. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-4-20-25>

9. Купреенко А.И., Исаев Х.М., Михайличенко С.М. К настройке системы автоматического изменения нормы выдачи кормосмеси кормовым вагоном // *Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии*. 2020. № 4 (80). С. 57-61. EDN: JFMXPL

10. Байбосынова Ж.А., Медведков Е.Б. Исследование системы управления процессом дозирования сыпучих материалов на имитационной модели // *Вестник Алматинского технологического университета*. 2013. № 2. С. 71-76. EDN: THNCDF

11. Алсайяд Т.Х.К., Першин В.Ф., Баранов А.А. Совершенствование непрерывного весового дозирования при производстве и использовании углеродных наноматериалов // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2018. Т. 24, № 2. С. 344-353. <https://doi.org/10.17277/vestnik.2018.02.pp.344-353>

12. Лялин Е.А., Трутнев М.А., Трутнев Н.В. Оценка дозирования комбикорма устройством спирально-винтового типа // *Пермский аграрный вестник*. 2020. № 4(32). С. 13-20. https://doi.org/10.47737/2307-2873_2020_32_13

13. Ляпушкин С.В., Арсентьев О.В. Повышение эффективности управления электроприводом системы дозирования сыпучих материалов // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2016. № 7(114). С. 133-140. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-7-133-140>

14. De Berg M., Gerrits D.H.P. Computing push plans for disk-shaped robots. *International journal of computational geometry & applications*. 2013;23(1):29-48. <https://doi.org/10.1142/S0218195913500027>

15. Fonseca L.M., Savi M.A. Nonlinear dynamics of an autonomous robot with deformable origami wheels. *International journal of non-linear mechanics*. 2020;125:103533. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2020.103533>

16. Павкин Д.Ю., Никитин Е.А., Зобов В.А. Система роботизированного обслуживания кормового стола на животноводческих комплексах // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2020. Т. 14, № 3. С. 33-38. <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-3-33-38>

17. Никитин Е.А. Некоторые результаты разработки колесного робота для автономного выполнения операций по обслуживанию кормового стола на животноводческих комплексах // *Вестник НГИЭИ*. 2021. № 10(125). С. 17-26. <https://doi.org/10.24412/2227-9407-2021-10-17-26>

camera as exemplified by cattle rations. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2022; 12(7): 3230. <https://doi.org/10.3390/app12073230>

5. Pavkin D.Yu., Shilin D.V., Nikitin E.A., Kiryushin I.A. Designing and simulating the control process of a feed pusher robot used on a dairy farm. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021;11(22):10665. <https://doi.org/10.3390/app112210665>

6. Nikitin E.A., Kirsanov V.V. Main development trends in the automation and mechanization of cow milking: *Sbornik studencheskikh nauchnykh rabot. Materialy konferentsii*. 2017;23:131-133. (In Rus.)

7. Kupreenco A.I., Isaev Kh.M., Mikhailichenko S.M. Generalized graph of states of an automatic feed wagon servicing technological groups of animals. *Vestnik VIESKH*. 2018;3(28):592-598. (In Rus.)

8. Kupreenco A.I., Isaev Kh.M., Mikhaylichenko S.M. Adjusting the automatic feed wagon to the selected feeding rate. *Agricultural Engineering*. 2020;4(98):20-25. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2020-4-20-25> (In Rus.)

9. Kupreenco A.I., Isaev Kh.M., Mikhaylichenko S.M. Adjusting the system of automatic change in feed mixture rationing with the automatic feed wagon. *Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy*. 2020;4(80):57-61. (In Rus.)

10. Baybosynova Zh.A., Medvedkov E.B. Study of the control system of bulk materials batching on a simulation model. *The Journal of Almaty Technological University*. 2013;2:71-76. (In Rus.)

11. Alsayyad T.Kh.K., Pershin V.F., Baranov A.A. Improving continuous weighing dosage in the manufacture and use of carbon nanomaterials. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2018;24(2):344-353. (In Rus.) <https://doi.org/10.17277/vestnik.2018.02.pp.344-353>

12. Lyalin E.A., Trutnev M.A., Trutnev N.V. Assessment of mixed feed dosing by spiral screw-type device. *Perm Agrarian Journal*. 2020;4(32):13-20. (In Rus.) https://doi.org/10.47737/2307-2873_2020_32_13

13. Lyapushkin S.V., Arsentiev O.V. Improving efficiency of the electric drive control of a bulk material batching system. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2016;7(114):133-140. (In Rus.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-7-133-140>

14. De Berg M., Gerrits D.H.P. Computing push plans for disk-shaped robots. *International Journal of Computational Geometry & Applications*. 2013;23(1):29-48. <https://doi.org/10.1142/S0218195913500027>

15. Fonseca L.M., Savi, M.A. Nonlinear dynamics of an autonomous robot with deformable origami wheels. *International journal of non-linear mechanics*. 2020;125:103533. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2020.103533>

16. Pavkin D.Yu., Nikitin E.A., Zobov V.A. Robotic system for maintenance of feed table for livestock complexes. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2020;14(3):33-38. (In Rus.) <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2020-14-3-33-38>

17. Nikitin E.A. Some results of the development of a wheeled robot for autonomous servicing the feed table at livestock breeding complexes. *Vestnik NГИЭИ*. 2021; 10(125): 17-26. (In Rus.) DOI: 10.24412/2227-9407-2021-10-17-26

Статья поступила в редакцию 11.08.2022; поступила после рецензирования и доработки 01.12.2022; принята к публикации 09.12.2022

Received 25.06.2022; revised 01.12.2022; accepted 09.12.2022