

Механизация, электрификация, автоматизация и цифровизация

УДК 621:620.171:664

DOI: 10.31857/S2500262723060145, EDN: NIXIRM

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДОЗИРОВАНИЯ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ ВИБРАЦИОННО-ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОМ СМЕШИВАНИИ

В. А. Шахов, доктор технических наук, **В. А. Пушко**, кандидат технических наук, **И. Г. Бойко**, кандидат технических наук, **В. В. Герасименко**, доктор биологических наук, **П. Г. Учкин**, кандидат технических наук, **И. В. Попов**, кандидат технических наук

*Оренбургский государственный аграрный университет,
460014, Оренбург, ул. Челюскинцев, 18
E-mail: shahov-v@yandex.ru*

Перспективное направление повышения сбалансированности рациона животных и птиц по микроэлементному составу – обогащение ультрадисперсными частицами дефицитных микроэлементов. При этом важно, чтобы они равномерно распределялись во всем объеме кормосмеси. Цель исследования – повышение равномерности распределения ультрадисперсных частиц в кормосмеси путем разработки специального оборудования и модернизации технологического процесса. Использование новых технологий приготовления кормосмесей на основе контроля технологических параметров позволяет получать продукт с заданными функциональными параметрами и сохранением питательных свойств. Анализ теоретических исследований процесса дозирования и смешивания ультрадисперсных частиц показал, что наилучший вариант их движения в потоке смеси – ламинарный. Спроектированная технологическая линия предусматривает отдельную подачу предварительно смешанной кормосмеси и ультрачастиц в вибросмеситель. Оценка эффективности процесса смешивания в вибрационном смесителе проводили по трем сечениям кормосмеси с ультрачастицами порошков железа, цинка, кобальта и молибдена. Оптимальные параметры работы достигаются при угловой скорости вибросмесителя – 3...7 рад/с, частоте колебаний – 9...37 Гц, времени вибросмешивания – 113...333 с, времени открытия управляемого дозатора (подача ультрадисперсных частиц в вибросмеситель) – 5...15 с. При использовании управляемого дозатора ультрачастиц и сферической крыльчатки частицы в корме распределялись более равномерно. Самое низкое влияние на величину этого показателя по трем сечениям кормосмеси отмечали для цинка (до 2,7 %), далее следовали порошки железа (до 3,6 %) и молибдена (до 9,5 %). Наибольшее воздействие разработанное оборудование оказало на равномерность распределения кобальта (до 20,5 %). При этом отклонение от нормы (0,5 мг/кг) не превышало 2 %, то есть величина качественного показателя равномерности распределения была равна 98 %.

IMPROVING THE PROCESS OF DOSING ULTRAFINE PARTICLES WITH VIBRATION-ELECTROMECHANICAL MIXING

V. A. Shakhov, V. A. Pushko, I. G. Boyko, V. V. Gerasimenko, P. G. Uchkin, I. V. Popov

*Orenburg State Agrarian University
460014, Orenburg, ul. Chelyuskintsev, 18
E-mail: shahov-v@yandex.ru*

A promising direction for improving the balance of the diet of livestock and birds by trace element composition is the enrichment of ultradisperse particles of scarce trace elements. At the same time, it is important that they are evenly distributed throughout the entire volume of the feed mixture. The purpose of the study is to increase the uniformity of the distribution of ultrafine particles in the feed mixture by developing special equipment and modernizing the technological process. The use of new technologies for the preparation of feed mixtures based on the control of technological parameters makes it possible to obtain a product with specified functional parameters and preservation of nutritional properties. Analysis of the theoretical studies of the process of dosing and mixing of ultrafine particles has shown that the best option for their movement in the flow of the mixture is laminar. The designed processing line provides for the separate supply of pre-mixed feed mixture and ultraparticles to the vibrating mixer. The efficiency of the mixing process in a vibrating mixer was evaluated using three sections of a feed mixture with ultraparticles of iron, zinc, cobalt and molybdenum powders. The optimal working parameters are achieved at the angular velocity of the vibrating mixer – 3...7 rad / s, the oscillation frequency – 9...37 Hz, the vibration mixing time – 113...333 s, the opening time of the controlled dispenser (feeding ultrafine particles into the vibrating mixer) – 5 ... 15 s. When using a controlled ultraparticle detector and a spherical impeller, the particles in the feed were distributed more evenly. The lowest effect on the value of this indicator in three sections of the feed mixture was noted for zinc (up to 2.7 %), followed by iron powders (up to 3.6 %) and molybdenum (up to 9.5 %). The developed equipment had the greatest impact on the uniformity of cobalt distribution (up to 20.5 %). At the same time, the deviation from the norm (0.5 mg/kg) did not exceed 2 %, that is, the value of the qualitative indicator of uniformity of distribution was equal to 98 %.

Ключевые слова: дозирующее устройство, точность дозирования, агрегация, ультрадисперсные частицы, диффузионные потоки, коэффициент сцепления, относительная влажность, мелкодисперсный материал, высота падения материала, наклон дозатора, вибрационные и электромеханические воздействия, сегрегация, цифровое производство.

Key words: dosing device, dosing accuracy, aggregation, ultrafine particles, diffusion flows, coupling coefficients, relative humidity, fine-dispersed material, material drop rate, dispenser slope, vibration and electromechanical effects, segregation, digital production.

Разработка оборудования нового поколения дозирования и смешивания компонентов при изготовлении кормов, а также его совершенствование – актуальная и востребованная в современных условиях задача [1, 2].

При этом на сегодняшний день выполнено недостаточно исследований по анализу потерь качественных

характеристик витаминно-минеральных компонентов, в том числе ультрадисперсных частиц. Имеются существенные недостатки при смешивании и дозировании компонентов смеси. Это не всегда позволяет учитывать свойства наноматериалов и их изменения в процессе смешивания. Для повышения эффективности процесса

смешивания необходимо контролировать режимы подачи ультрадисперсных частиц [3, 4, 5].

Один из приоритетов развития перерабатывающего производства – технологическая модернизация производственных процессов. В особенности это касается вопросов повышения энергоэффективности и энергосбережения, решение которых возможно только при использовании современного смесительного оборудования вибрационного типа. Особое место среди них занимают менее энергоемкие силовые электромеханические вибрационные системы периодического действия с виброизбудителем [3, 6].

Процесс интенсификации развития ведущих отраслей сельского хозяйства (животноводства, птицеводства и др.) невозможен без серьезной кормовой базы. При формировании современной кормовой базы необходимо учитывать условия быстрого развития животных и птицы, которое возможно при потреблении определенной нормы (суточной) питательных веществ и микроэлементов. Процесс подачи необходимого количества указанных компонентов возможен с комбинированными кормами. Однако при этом возникает проблема их эффективного смешивания, что связано с очень низкими нормами ввода микроэлементов, высокой их плотности, а также микро- и наноразмерах частиц [7].

В современных условиях, наряду с модернизацией технической базы и повышением эффективности, важнейшим резервом роста конкурентоспособности отечественных производителей сыпучих и не сыпучих смесей служит процесс совершенствования системы управления. В этом случае становится очевидным факт необходимости принятия не отдельных мер, а формирования системного развития на основе вибрационных технологий [3, 8].

Для смешивания компонентов кормовых смесей в современных условиях используют широкое разнообразие технических средств. Они делятся по назначению на специальные, универсальные и комбинированные и могут быть периодического и непрерывного действия. На сегодняшний день наибольшее распространение получили порционные дозаторы со смесителями периодического действия [9].

На сегодняшний день наиболее изучен процесс внедрения ультрадисперсных частиц в виде водной суспензии после предварительного диспергирования. Однако подобная технология не предусматривает длительного хранения приготовленной смеси. Поэтому более приемлемым считают приготвление сухих кормосмесей [3, 10].

Изучение процесса сухого дозирования ультрадисперсных частиц с последующим смешиванием с компонентами кормосмеси привело к выводу, что структурно дозирующее устройство представляет собой функционал большого числа факторов, которые можно разделить на две большие группы: систематические и случайные. Систематические – это производительность питателя основного резервуара в момент закрытия задвижки, высота падения смеси, случайные – форма и площадь поверхности частиц смеси, их взаимное расположение, коэффициент взаимной адгезии частиц смеси и материала конструкции (смесителя-дозатора и приемной камеры), влажность материала смеси и др. [11, 12].

Наиболее эффективным при смешивании комбикормов на сегодняшний день считают процесс вибрации с использованием соответствующей техники. В этом случае его ускорение может достигать десятков раз. Вибрационные машины значительно проще и эффективнее обычных, потребляют меньше энергии [9, 13]. Вместе с интенсификацией технологических процессов проис-

ходит качественное улучшение конечной продукции. При перемешивании сыпучих материалов достигается высокая степень однородности смеси, при формировании обеспечиваются одинаковые свойства по всему объему продукта.

Для реализации вибрационных технологических процессов, используемых в перерабатывающей промышленности, необходимо специальное оборудование или комплектующие для модернизации традиционной техники [6].

Цель исследований – повышение равномерности распределения ультрадисперсных частиц в кормосмеси.

Методика. Известно, что использование простого наполнителя негативно сказывается на распределении ультрачастиц в составе кормовой смеси, а также приводит к снижению продуктивного эффекта у животных и ухудшению состояния их иммунной системы. При этом рост и развитие животных будет проходить неравномерно, увеличится неоднородность стада [14]. Нормализованная по физико-механическим свойствам кормовая смесь обеспечивает получение всего ассортимента микроэлементов всеми животными в заданном количестве и оптимальном соотношении.

Процесс производства кормовых смесей изучен достаточно подробно. Однако применение в современных условиях ультрачастиц, в частности металлов, для ее обогащения привело к появлению эффекта электростатичности. Это происходит в силу того, что ультрачастицы взаимодействуют с материалами бункеров, каналов движения смеси, смесителя, дозатора и др. В результате получения электростатического заряда эти частицы прилипают к поверхностям перечисленных конструкций, сделанных из электронепроводящих материалов.

Это приводит к образованию сегрегационных участков, в результате нарушается степень однородности смеси. Поэтому актуально изучение процесса концентрации электростатических зарядов и их влияния на формирование однородности смеси. Для этого необходимы две составляющие – теоретические предпосылки и эксперименты с высокоскоростным оборудованием, способным фиксировать движение ультрачастиц в процессе образования смеси [4, 6].

Потери энергии в дозирующих и смешивающих устройствах могут достигать 20...30 %. Поэтому необходимо исследовать их формирование и определить возможные варианты снижения. Для этого следует изучить процесс подачи ультрадисперсных частиц и дать теоретическое обоснование их взаимодействия с компонентами кормосмеси в процессе смешивания. Возможным вариантом учета энергетических потерь может послужить введение соответствующего теоретического уравнения.

Анализ результатов фундаментальных исследований процессов образования и расходования энергии привел к формированию гипотезы о возможности применения изученных процессов движения потоков кормосмеси для снижения энергетических потерь при дозировании и смешивании, а также обоснования конструктивных параметров дозатора и смесителя [4, 6, 9].

С учетом изложенного, базовую модель строили на предположении о том, что движение смеси с ультрадисперсными частицами имеет ламинарный режим. Поэтому возникла необходимость в поиске критерия, позволяющего отразить возможный процесс перехода режима движения от ламинарного к турбулентному и обратного, исходя из теоретических работ Есеева Е. А. [4].

Известно, что уравнения движения ультрачастицы в проекциях на абсолютные полярные оси R и Φ имеют вид:

$$\begin{cases} \rho_1 \frac{dV_R}{dt} = -k_1 \cdot V_R + 2k_2 \cdot \rho \cdot \omega(U_\Phi - V_\Phi), \\ \rho_1 \cdot \frac{dV_\Phi}{dt} = -k_1 \cdot (U_\Phi - V_\Phi) + g \cdot (\rho_1 - \rho) + 2k_2 \cdot \rho \cdot \omega \cdot V_R, \end{cases} \quad (1)$$

где ρ_1 – плотность микрочастицы, кг/м³; V_R , V_Φ – абсолютные радиальная и тангенциальная составляющие скорости ультрачастицы, м/с; k_1 – коэффициент сопротивления (по Стоксу) движению ультрачастицы, относительно дисперсионной среды, для случая $Re < 1,0$, кг/м³·с; ρ – плотность среды, кг/м³; ω – частота, с⁻¹; k_2 – безразмерный коэффициент, с использованием которого приближенно учитываются поправки на допущения, связанные с распространением теоремы Жуковского для плоско-параллельного обтекания бесконечного цилиндра на рассматриваемый случай ультрачастицы произвольной формы в кольцевом пространстве; g – ускорение свободного падения, м/с²; t – время, с.

В результате Есеевым Е. А. была введена переменная $U = U_\Phi - V_\Phi$, для предельного случая, когда $\rho_1 = \rho$, в системе (1) представляется в более простом виде:

$$\begin{cases} \frac{dV_R}{dt} = -\frac{k_1}{\rho_1} \cdot V_R + 2k_2 \cdot \omega \cdot U, \\ \frac{dU}{dt} = \omega(1 - 2k_2) \cdot V_R - \frac{k_1}{\rho_1} \cdot U. \end{cases} \quad (2)$$

Перейдя в системе (2) к относительным переменным, получим:

$$t' = t / \tau, \quad U' = U / \tilde{U}, \quad V'_R = V_R / \tilde{U}$$

Тогда она примет вид:

$$\begin{cases} \frac{dV'_R}{dt'} = -\frac{\tau \cdot k_1}{\rho_1} \cdot V'_R + 2k_2 \cdot \omega \cdot \tau \cdot U', \\ \frac{dU'}{dt'} = (1 - 2k_2) \cdot \omega \cdot \tau \cdot V'_R - \frac{\tau \cdot k_1}{\rho_1} \cdot U', \end{cases} \quad (3)$$

где τ – время виброрелаксации ультрачастицы, с; \tilde{U} – характерная скорость, м/с.

С учетом результатов исследований Есеева Е. А., кинетику межфазных взаимодействий возможно представить с рядом допущений на основании диффузионных процессов с точки зрения сопряжения и переключения потоков. Процесс дозирования ультрадисперсных частиц испытывает многовекторный эффект многокомпонентной системы, которая в свою очередь находится в многопараметрическом поле внешних воздействий [4].

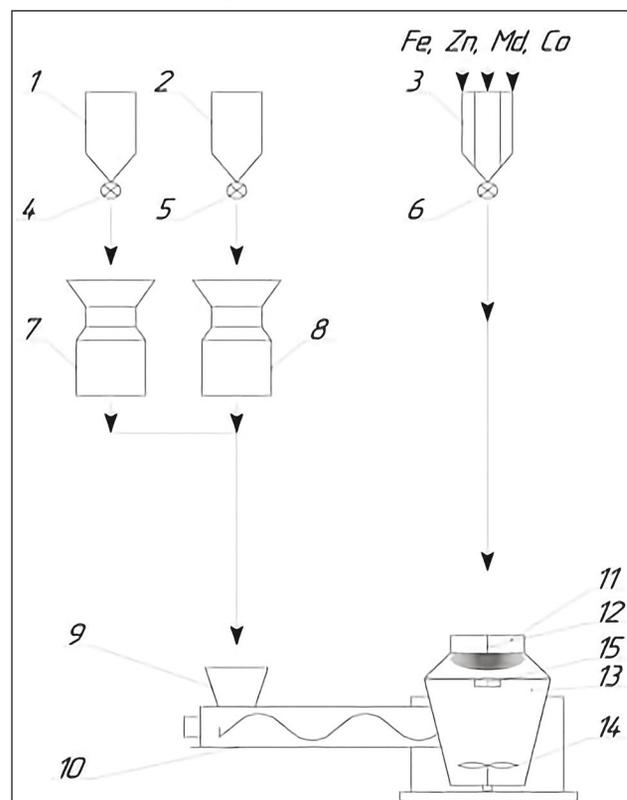
Для повышения эффективности процесса распределения ультрадисперсных частиц в составе кормосмеси с учетом теоретических выражений (1)...(3) была разработана технологическая линия (см. рисунок). Она реализует технологию, которая включает предварительное смешивание кормосмеси и дальнейшее ее смешивание в вибросмесителе с ультрадисперсными частицами. Процесс смешивания ультрадисперсных частиц с кормосмесью в вибраторном смесителе изучали в лабораторных условиях.

Анализ проб кормосмеси выполняли в аккредитованном центре ФНЦ биологических систем и агротехнологий с использованием атомно-абсорбционного спектрометра «Формула ФМ 400» и «Квант-2АТ», микроволнового пробоотборника ПЛП-01. В ходе проведения исследований измеряли степень однородности кормосмеси, а именно равномерность распределения ультрадисперсных частиц в пробах, которые отбирали после смешивания (продолжительностью до 360 с) зер-

нового и минерального сырья по трем сечениям: 1 – верхнее, 2 – среднее, 3 – нижнее.

Процесс смешивания компонентов кормосмеси исследовали при изменении работы управляемого дозатора (время открытия (подача ультрадисперсных частиц в вибросмеситель) – от 3 до 19 с) и вибросмесителя (угловая скорость резервуара – от 2 до 10 рад/с, частота колебаний – от 2 до 58 Гц, время вибросмешивания – от 25 до 377 с). Шаг варьирования составлял соответственно 2 с, 1 рад/с, 7 Гц и 44 с, общее число опытов – 5040. В процессе эксперимента учитывали степень однородности проб кормосмеси с ультрадисперсными частицами. Движение ультрадисперсных частиц, их взаимодействия с компонентами кормосмеси и распределение после смешивания (в пробах кормосмеси) изучали в лабораторных условиях. Ультрадисперсные частицы дозировали в следующих концентрациях: Fe (d=80...90 нм) – 20 мг/кг; Zn (d=60...70 нм) – 1,2 мг/кг; Mo – (d=85...90 нм) – 0,5 мг/кг; Co (d=50...70 нм) – 0,5 мг/кг кормосмеси.

Результаты и обсуждение. Процесс производства комбинированных кормов с ультрадисперсными частицами (см. рисунок) происходит следующим образом. В бункер 1 загружают зерновое сырье, в бункер 2 минеральное сырье в виде хлорида натрия, или карбоната кальция, или смеси этих компонентов в пропорции 1:1. В бункер 3 загружаются ультрадисперсные частицы микроэлементов (Fe, Cu, Zn, Mo и др.). Кроме того, можно загружать смесь ультрадисперсных частиц в пропорциях, необходимых для приготовления соответствующей кор-



Линия приготовления кормосмеси с ультрадисперсными частицами: 1 – бункер для зернового сырья, 2 – бункер для минерального сырья, 3 – бункер для ультрадисперсных частиц, 4 – управляемая заслонка бункера 1, 5 – управляемая заслонка бункера 2, 6 – управляемый дозатор бункера 3, 7 – дробилка зернового сырья, 8 – дробилка минерального сырья, 9 – конусный приемник смесителя, 10 – смеситель, 11 – цилиндрический распределитель, 12 – лопастной веер, 13 – вибросмеситель, 14 – крыльчатка, 15 – видеокамера.

Табл. 1. Результаты экспериментов (фрагмент)

№ п.п.	Варьируемые показатели				Степень однородности смеси
	время от-крытия управляе-мого доза-тора, с	угловая скорость виброс-месителя, рад/с	частота колебаний, Гц	время виброс-мешива-ния, с	
19	5	3	9	113	0,93
333	7	4	16	113	0,93
664	11	4	16	157	0,94
756	13	5	23	201	0,94
3658	13	5	23	245	0,96
4530	15	6	30	245	0,93
4752	15	7	30	289	0,95
5020	15	7	37	333	0,98

мосмеси. Из бункеров 1 и 2 компоненты смеси попадают через управляемые заслонки 4 и 5 в дробилки 7 и 8 соответственно. После дробления зерновое и минеральное сырье подаются через конусный приемник 9 в смеситель 10 (патент на изобретение RU№ 2800937). Процесс смешивания регулируется изменением угла наклона смесителя 10 относительно горизонтальной плоскости. Смешанные компоненты, зерновое и минеральное сырье, подаются в вибросмеситель 13. Одновременно через управляемый дозатор 6 ультрадисперсные частицы подаются в цилиндрический распределитель 11 и попадают на лопасть

Табл. 2. Результаты измерений проб на содержание ультрадисперсных частиц

Показатель	Пробы по сечениям без регулируемого дозатора			Пробы по сечениям с регулируемым дозатором		
	1	2	3	1	2	3
Коэффициент однородности смеси	0,80±0,01	0,80±0,01	0,78±0,01	0,98±0,01	0,94±0,01	0,93±0,01
Железо, мг/кг	19,0	19,6	19,8	19,7	19,8	19,9
Цинк, мг/кг	1,15	1,18	1,2	1,16	1,18	1,2
Кобальт, мг/кг	0,38	0,39	0,44	0,45	0,47	0,49
Молибден, мг/кг	0,42	0,42	0,46	0,46	0,46	0,48
Обменная энергия, мДж/кг	11,4	11,4	11,5	11,4	11,7	11,8
Питательность корма, ед./кг	1,14	1,14	1,16	1,16	1,19	1,2

вер 12. В нижней части вибросмесителя 13 вертикально расположена сферическая крыльчатка 14. Сформированная смесь в вибросмесителе 13 находится во взвешенном состоянии. Образуется воздушно-продуктовая, равно сбалансированная по объему кормосмесь. Процесс движения ультрадисперсных частиц фиксируется высокочувствительной видеокамерой 15.

Управляемый дозатор работает в автоматическом режиме. Регулировка величины проходного сечения осуществляется посредством увеличения или уменьшения степени перекрытия, расположенных в нем, лепестков. Применение подобного способа дозирования ультрадисперсных частиц обусловлено их незначительным количеством в общем объеме кормосмеси. При этом вероятность равномерного распределения частиц при непосредственной подаче в вибросмеситель 13 повышается. Следует отметить, что ультрадисперсные частицы обладают повышенной поверхностной энергией и находятся в нестабильном состоянии.

По результатам проведенного эксперимента (табл. 1) наибольшая степень однородности смеси была отмечена при времени открытия управляемого дозатора (подача ультрадисперсных частиц в вибросмеситель) – 5...15 с, угловую скорость резервуара вибросмесителя – 3...7 рад/с, частоте колебаний – 9...37 Гц, времени вибросмешивания – 113...333 с.

Результаты исследований по определению степени влияния дозирования и смешивания на структурно-механические и энергетические показатели кормосмеси свидетельствуют, что при использовании управляемого дозатора для ультрадисперсных частиц 6 и цилиндрического распределителя 11 (см. рисунок) происходит более интенсивное и однородное смешивание компонентов

зернового и минерального сырья. При этом, вероятно, значительную роль играет применение сферической крыльчатки 14, которая формирует псевдооживленное состояние кормосмеси, благодаря чему рабочее пространство вибросмесителя заполняется более равномерно. Затем, по мере снижения интенсивности подачи исходных компонентов в смеситель, часть ультрадисперсных частиц начинает «прилипать» к его стенкам. Это обусловлено формированием статического напряжения при движении использовавшихся ультрадисперсных частиц металлов.

Наименьшая разница между пробами кормосмеси по трем сечениям, с дозатором и без дозатора, степень однородное отмечена у цинка. Разница по трем сечениям смеси в пробах составляла более 2 % (0...2,7 %). Наибольшая разница в пробах по железу составила 3,6 % (в верхнем сечении). Для молибдена максимальная в опыте разница отмечена в верхнем сечении – 9,5 %. Самую высокую разницу наблюдали у кобальта. В среднем сечении она составила 20,5 % (табл. 2). Следовательно, наибольшее воздействие разработанное оборудование оказало на повышение равномерности распределения кобальта. Отклонение от нормы (0,5 мг/кг) составило менее 2 %, то есть качественный показатель равномерности распределения был равен 98 %.

Выводы. Оптимальными режимами работы смесителя обеспечивающими степень однородности кормосмеси с внесением ультрадисперсных частиц на уровне 93...98 % следует считать время открытия управляемого дозатора (подача ультрадисперсных частиц в вибросмеситель) – 5...15 с, угловую скорость резервуара вибросмесителя – 3...7 рад/с, частоту колебаний – 9...37 Гц, продолжительность вибросмешивания – 113...333 с.

Наибольшее воздействие разработанное оборудование оказало на равномерность распределения кобальта. Отклонение от нормы (0,5 мг/кг) составило менее 2 %, то есть качественный показатель равномерности распределения составил 98 %.

Литература

1. Сыроватка В.И., Жданова Н.В., Обухов А.Д. Исследование кинетики движения ингредиентов лечебных кормов в шаровом смесителе // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2021. № 2. С. 59-63.
2. Мудров А.Г. Совершенствование смесителя «Турбула» // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2019. Т. 14. № 3 (54). С. 108-111.
3. Построение математической модели процесса смешивания компонентов комбикормов / А.Г. Белов, В.А. Шахов, С.А. Соловьёв и др. // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2019. № 4.(78). С. 140-143.
4. Есеев Е.А. Разработка процессов пневмосепарации с классификацией дисперсных материалов в динамическом кольцевом пространстве применительно к мукомольно-крупяному производству: дис. на соискание ученой степени доктора техн. наук. Барнаул, 2008. 216 с.

5. Chkalova M., Shahov V., Pavlidis V. Effectiveness analysis of ways or-ganizing production of combined feeds // *Engineering for Rural Development*. 2019. Vol. 18. P. 462–468.
6. Современные инновационные подходы приготовления микродобавок в специализированной установке / В. А. Пушко, В. А. Шахов, С. В. Лебедев и др. // *Достижения науки и техники АПК*. 2018. № 4. Т. 32. С. 65–68.
7. Каширин Д. Е., Полякова А. А. Исследование влияния конструктивно-технологических параметров смесителя – обогатителя концентрированных кормов на энергоемкость процесса смешивания // *Вестник КрасГАУ*. 2016. № 9(120). С. 107–113.
8. Баротермическая обработка ингредиентов комбикормов / В. И. Сыроватка, Н. В. Жданова, А. Н. Расказов и др. // *Инженерные технологии и системы*. 2019. Т. 29. № 3. С. 428–442.
9. Булатов С. Ю. Повышение эффективности приготовления кормов путем совершенствования конструкции и технологического процесса кормоприготовительных машин // *Пермский аграрный вестник*. 2017. № 1(17). С. 55–64.
10. Development of equipment for producing feed mixtures with nanoparticles of scarce micronutrients / A. Belov, V. Shakhov, Y. Ushakov, et al // *Engineering for Rural Development*. 2020. Vol. 19. P. 1757–1762.
11. Аналитическая модель смешивания сыпучих растительных компонентов / В. В. Матюшев, А. С. Аветисян, И. А. Чаплыгина и др. // *Вестник КрасГАУ*. 2023. № 4 (193). С. 202–209.
12. Савиных П. А., Турубанов Н. В., Зырянов Д. А. Результаты экспериментальных исследований процесса смешивания в горизонтальном ленточном смесителе // *Тракторы и сельхозмашины*. 2016. № 7. С. 32–36.
13. Theoretical studies of the interaction between screw surface and material in the mixer / A. Marczuk, V. Sysuev, A. Aleshkin? et al. // *Materials*. 2021. Vol. 14. No. 4. P. 1–29. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/4/962> (дата обращения: 11.09.2023). doi: 10.3390/ma14040962.
14. Морфо-биохимические показатели крови у бройлеров при коррекции рациона солями и наночастицами Си / Е. А. Сизова, В. П. Королев, Ш. А. Макаев и др. // *Сельскохозяйственная биология*. 2006. Т. 51. № 6. С. 903–911.

Поступила в редакцию 04.10.2023

После доработки 25.10.2023

Принята к публикации 14.11.2023