

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ДВИЖЕНИЯ ИНГРЕДИЕНТОВ ЛЕЧЕБНЫХ КОРМОВ В ШАРОВОМ СМЕСИТЕЛЕ

В.И. Сыроватка¹, академик РАН, Н.В. Жданова¹, А.Д. Обухов², аспирант

¹Институт механизации животноводства – научный агроинженерный центр Всесоюзный институт механизации,
108823, Москва, поселение Рязановское, посёлок Знамя Октября, 31
E-mail: vniimzh@mail.ru

²Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ,
109428, Москва, 1-й Институтский проезд, 5
E-mail: vim@vim.ru

Исследования проводили с целью изучения возможности повышения однородности смеси лечебных комбикормов, с учетом кинетика движения (траектория, скорость, вектор) отдельных частиц ингредиентов в составе материально-воздушного потока в процессе смешивания лечебных препаратов, минеральных и витаминных добавок в смесителе со сферической камерой в поле центробежных, аэродинамических и инерционных сил, а также сил Кориолиса. При вращении лопастей на их плоскости под действием центробежных сил происходит сепарация (разделение, сегрегация) состава смеси по таким физико-механическим свойствам, как плотность, размер частиц, коэффициент трения, пористость и др. При сходе с лопасти материально-воздушный поток ударяется в нижнюю цилиндрическую поверхность корпуса, тормозится и меняет направление движения на 90°, а у крышки – на 180°. При этом для применяемых смесителей с цилиндрическим вертикальным корпусом, работающих в режиме псевдооживления, условия сегрегации не ограничены. Выявлены технологические и конструктивные возможности повышения однородности смеси, реализация которых в одной установке позволит повысить однородность смеси лечебных кормов до 95-98 %.

INVESTIGATION OF KINETICS OF INGREDIENTS MOVEMENT TREATMENT FEEDS IN BALL MIXER

Syrovatka V.I.¹, Zhdanova N.V.¹, Obukhov A.D.²

*Institute of livestock mechanization – Federal research center of agricultural engineering,
108823, Moscow, Ryazanovskoe poselenie, pos. Znamya Oktyabrya, 31
E-mail: vniimzh@mail.ru*

*2Federal Scientific Agroengineering Center VIM,
109428, Moscow, 1-i Institutskii proezd, 5
E-mail: vim@vim.ru*

There are considered possibilities of increasing homogeneity of mixture of therapeutic feeds, in particular - motion kinetics (trajectory, speed, vector) of individual particles of ingredients in the composition of material-no-air flow in the process of mixing of therapeutic preparations, mine-real and vitamin additives in mixer with spherical chamber in field of centrifugal, aerodynamic, inertial and Coriolis forces. It is noted that on the plane of the blades when they rotate from the drive shaft under the influence of centrifugal forces, the composition of the mixture is separated (separation, se-gregation) by physical and mechanical properties: specific weight, particle sizes, friction coefficients, sailing, etc. When leaving the blade, the material air flow strikes the lower cylindrical surface of the body, brakes and changes the direction of movement by 90°, and at the cover - by 180°. At the same time, for used mixers with a ciline-dric vertical body operating in the fluidization mode, segregation conditions are not limited. The following technological and structural possibilities for increasing the homogeneity of the mixture were. Realization of the presented possibilities in one installation will allow to increase homogeneity of the mixture of therapeutic foddurs up to 95-98%.

Ключевые слова: однородность смеси, кинетика движения частиц, сферическая камера, миграция частиц, энергетическое поле

Key words: homogeneity of the mixture, the kinetics of particle motion, spherical chamber, migration of particles, energy field

Интенсификация животноводства и птицеводства, необходимость ветеринарной обработки в сжатые сроки большого поголовья, многократное повышение нагрузки на ветеринарных специалистов вызывает необходимость применения высокоэффективных способов и технических средств приготовления и дачи лекарственных препаратов. В связи с этим получает широкое распространение групповое скармливание смесей комбикормов с биологически активными веществами.

Огромный экономический ущерб, выражающийся миллиардами рублей, наносят животноводству гельминтозы, под влиянием которых потери молока на корову могут достигать 110-120 кг в год, уменьшение прироста массы тела молодняка – 7-9 кг [1]. Живая масса порослят, зараженных гельминтами, не превышает 50-60 % величины этого показателя у здоровых [2]. В птицеводстве и овцеводстве заболеваемость зачатую может доводить до массового падежа [3].

Введение кормолекарственных смесей в комбикорма на заводах и систематическое их скармливание в зависимости от эпизоотической ситуации, а также возраста животных и птицы позволяет постоянно осуществлять профилактику заболеваний и поддерживать высокую продуктивность. При этом можно в 2-3 раза сократить количество ветеринарных работников, облегчить и обезопасить их труд.

Сложность приготовления высокооднородных лечебных кормов заключается в том, что соотношение лекарств и наполнителя, как правило, зернового компонента, составляет 1:500; 1:1000; 1:10000, причем лекарства могут быть в форме таблеток, порошка или жидкости. Размеры частиц и плотность вносимых ингредиентов и наполнителя может различаться в 8-10 раз. Кроме того, применяемые смесители обеспечивают однородность смеси на уровне 80-85 %, а у лечебных комбикормов она должна находиться в пределах 95-98 % [4, 5].

Известно [6], что во всех конструкциях лопастных и шнековых смесителей процесс смешивания сыпучих компонентов сопровождается их разделением (сепарацией, сегрегацией).

Цель исследования – изучить движение частиц различной плотности и крупности в составе материально-воздушного потока в поле центробежных, гравитационных и аэродинамических сил в шаровом смесителе для изыскания возможности повышения однородности смешивания компонентов при совместном конвективном и диффузионном процессах.

Методика. В работе рассматривали изменение скорости движения частиц по лопасти ротора (рис. 1, точка А), внутренней сферической поверхности шарового смесителя (точка В), при изменении направления движения материально-воздушного потока сверху-вниз (точка С), при диффузионном смешивании.

Для рассмотрения движения отдельной твердой частицы, находящейся на рабочей поверхности лопасти смесителя (рис. 2, точка А) приняты следующие допущения [7]: частицы считаем шарообразными и изолированными одна от другой, скорость турбулентного воздушного потока, создаваемого ротором в сферическом объеме и движение частиц по оси y не учитываем.

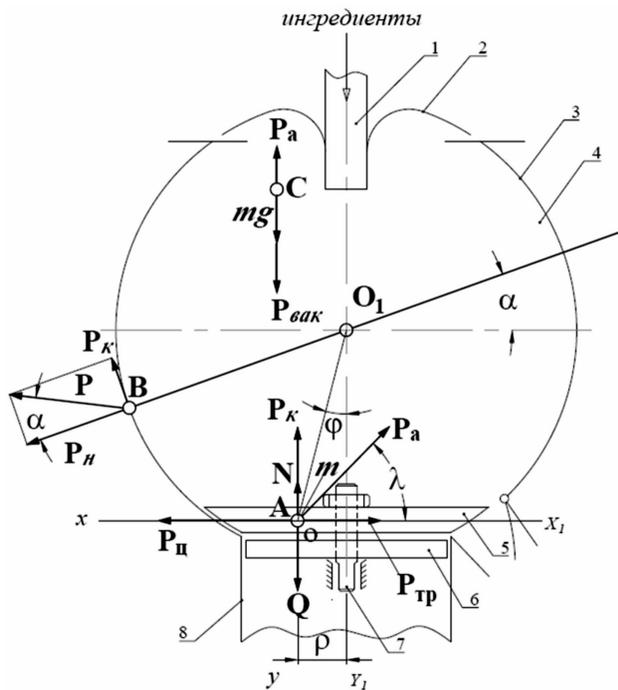


Рис. 1. Схема приложения сил на частицу массой m , расположенную на лопасти ротора шарового смесителя в точке А ($P_{ц}$ – центробежная сила, Н; P_a – аэродинамическая сила, Н; P_k – сила Кориолиса, Н; P_{mp} – сила трения по поверхности лопасти, Н; N – сила реакции, Н; Q – сила тяжести, Н); точке В (P – сила на сферическую поверхность, Н; $P_{кас}$ – касательная составляющая силы P , Н); точке С ($P_{вак}$ – сила вакуума, Н; mg – сила тяжести частицы массой m , Н; P_a – сила воздушного потока, Н), φ – угол положения частицы массой m , относительно оси y , рад; α – угол положения частицы массой m относительно оси x , рад; ρ – положение частицы массой m на лопасти в координатах x, y , 1 – загрузочный шлюз; 2 – направляющий обтекатель; 3 – шаровой корпус смесителя; 4 – сферический объем смесителя; 5 – двухсторонняя лопасть; 6 – рабочий диск; 7 – вал привода лопастей; 8 – рама смесителя.

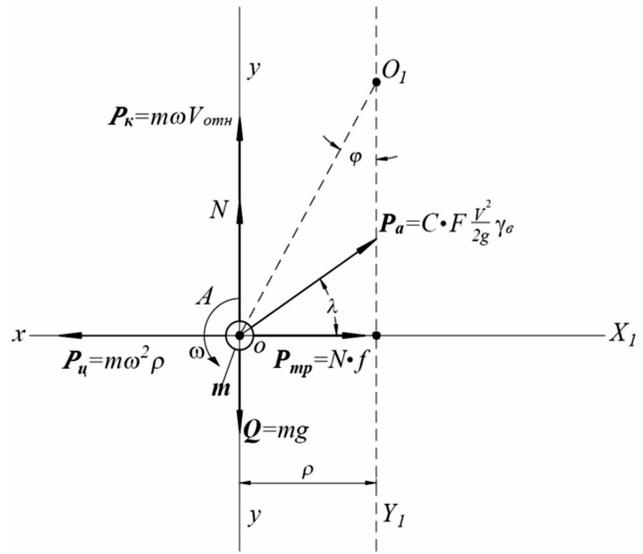


Рис. 2. Переносная $X_1O_1Y_1$ и относительная xy системы координат с формулами для расчета сил, приложенных к частице массой m , расположенной на лопасти: $P_{ц}$ – центробежная сила, Н; P_a – аэродинамическая сила, Н; P_k – сила Кориолиса, Н; P_{mp} – сила трения по поверхности лопасти, Н; N – сила реакции, Н; Q – сила тяжести, Н.

Движение единичной рассматриваемой частицы можно описать уравнением:

$$m \frac{dV}{dt} = \sum_i F_i,$$

где m – масса частицы; $\frac{dV}{dt}$ – ускорение частицы; $\sum_i F_i$ – равнодействующая сила, приложенная к частице массой m .

Для составления уравнения движения частицы примем переносную систему координат $X_1O_1Y_1$ [8], которую свяжем с вращательным движением лопасти, и относительную систему xy , которой обозначаем движение частицы относительно рабочей поверхности лопасти. Используя схему сил (см. рис. 1 и 2) составим дифференцируемое уравнение движения частицы массой m в принятых системах координат [8, 9]:

$$\left. \begin{aligned} m \frac{dV_{отн}}{dt} &= m\omega^2 \rho \cdot \cos \varphi - P_{тр} - CF \frac{V^2}{2g} \sin \lambda \\ O &= N + m\omega^2 \rho \cdot \sin \varphi - 2m\omega V_{отн} - CF \frac{V^2}{2g} \cos \lambda \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

или

$$N = 2m\omega V_{отн} + CF \frac{V^2}{2g} \cos \lambda - m\omega^2 \rho \cdot \sin \varphi \quad (2)$$

при этом $P_{тр} = N \cdot f$, тогда

$$\left. \begin{aligned} m \frac{dV_{отн}}{dt} &= m\omega^2 \rho \cdot \cos \varphi - \\ &- f \left(2m\omega V_{отн} + CF \frac{V^2}{2g} \gamma_B \cos \lambda - m\omega^2 \rho \cdot \cos \varphi \right) - \\ &- CF \frac{V^2}{2g} \gamma \sin \lambda \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где ω – угловая скорость, рад/с; $V_{отн}$ – скорость движения частицы по рабочей поверхности лопасти, м/с; f – коэффициент трения частицы смеси по стали; F – проекция частицы по направлению ее движения (миделево сечение тела), м²; γ_B – плотность воздуха, кг/м³;

g – ускорение силы тяжести, m/c^2 ; C – коэффициент аэродинамического сопротивления, зависящий от формы и размера тела, который является функцией критерия Рейнольдса (Re) [8].

Результаты и обсуждение. Для коэффициента C , который входит в формулу (3), известны три наиболее характерные области зависимости [10]:

при значении $Re = 0,1-1,0$ (частицы размером не более $0,1$ мм)

$$C = \frac{24}{Re}, \quad (4)$$

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu}, \quad (5)$$

где d – диаметр частицы, мм; V – скорость частицы, м/с; ν – коэффициент кинематической вязкости m^2/c ; при $Re = 10-1000$ (частицы диаметром $0,1-2,5$ мм)

$$C = \frac{13}{\sqrt{Re}} \quad (6)$$

при $Re = 1000$ и более (частицы диаметром $2,5-80,0$ мм) коэффициент C равен в среднем $0,45$.

В связи с непостоянством коэффициента C , а, следовательно, и силы аэродинамического сопротивления, действующей на частицу массой m , уравнение (3) не имеет общего решения. Оно возможно только численным интегрированием для каждого частного случая с использованием начальных условий [11].

Аналогичную задачу для движения единичной частицы массой m , находящейся на рабочей поверхности молотка ротора дробилки зерна, мы решили численным методом интегрирования Рунге-Кутты. По результатам расчетов [12] построен график (рис. 3), из которого видно, что материальные частицы различных размеров и плотности перемещаются по стальной рабочей поверхности вращающейся лопасти ротора с разной скоростью. Как и следовало ожидать, на крупные и плотные частицы доминирующее влияние оказывает центробежная сила ($P_{ц}$), на мелкие и легкие – аэродинамическая (P_a). Скорость движения крупных частиц в центробежном силовом поле больше, чем мелких. В материально-воздушном потоке они сортируются и постоянно соударяются, при этом происходит обмен скоростями: меньшие частицы ускоряются, а большие – замедляются [13].

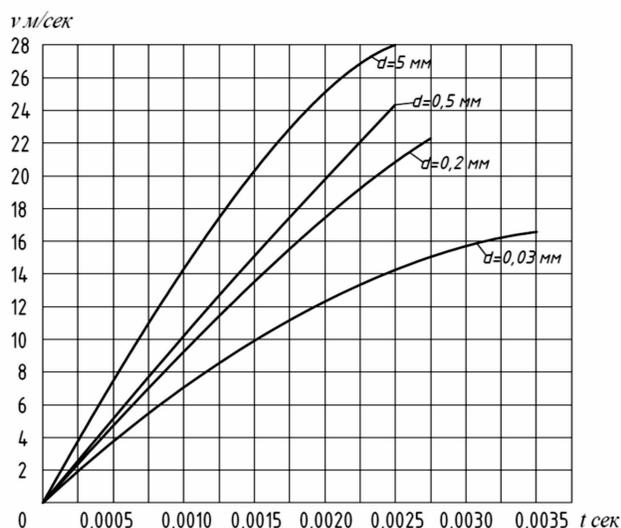


Рис. 3. Скорость перемещения частиц различных размеров по рабочей поверхности лопасти ротора.

Процесс смешивания в смесителе со сферическим корпусом происходит следующим образом. Вращающиеся лопасти образуют и выбрасывают материально-воздушный поток на нижнюю вогнутую сферическую поверхность корпуса смесителя с усилием P (см. рис. 1, точка В), где оно распределяется на нормальное – $P_n = m\omega^2 \rho \cos\alpha$, которое достигает максимального значения на уровне 90° , и касательное – $P_{(кас.)} = m\omega^2 \rho \sin\alpha$, равное на этом уровне нулю, где α – угол падения, образованный горизонтальной осью сферы и радиусом из центра сферы к точке В (см. рис. 1).

Кинетика (траектория, вектор, скорость) движения отдельных частиц с различными физико-механическими свойствами материально-воздушного потока в объеме сферической камеры во многом зависит от величины, приложенной к ним, силы Кориолиса (P_K). Под ее влиянием частицы потока перемещаются снизу-вверх под различным углом к линии меридиана сферы с разной скоростью и вектором движения. Поэтому в объеме сферической камеры образуется многообразная кинетика перемещения, происходит взаимное проникновение смешиваемых компонентов, что обуславливает оптимизацию процесса конвективного смешивания.

В верхней полусфере обрабатываемый поток перемещается к вершине сферы, где направляющий оттекатель изменяет траекторию движения потока снизу-вверх на обратное – сверху-вниз (см. рис. 1, точка С). Каждая частица массой m в составе воздушного потока под влиянием силы тяжести mg , воздушного потока (P_a) и силы вакуума ($P_{вак.}$) с различной скоростью устремляется вниз к оси вала привода лопастей; попадает на лопасти и процесс повторяется. Известно, что максимальный вакуум образуется у вертикальной оси сферической камеры, а максимальное давление на внутренней поверхности сферы. Нейтральная линия – линия разграничения вакуума от давления – параллельна меридиане сферы и находится на расстоянии $2/3R_{сф}$ от вертикальной оси [14].

Известно [15], что при диффузионном смешивании, которое осуществляется в результате взаимного внедрения компонентов при совместном смятии, из нескольких гетерогенных (неоднородных) материалов образуется гомогенный (однородный) продукт, не разделяющийся при последующем смешивании на составляющие. Диффузионное смешивание – это процесс взаимного проникновения молекул смешиваемых материалов, который приводит к выравниванию их концентрации по всему занимаемому объему. При этом происходит перенос вещества с мест высокой концентрации в места низкой концентрации и наоборот. Молекулы соприкасающихся материалов перемешиваются при совместном смятии на грани рабочих органов.

По результатам изучения процесса смешивания и качества работы смесителей, выявлены следующие технологические и технические возможности повышения однородности смеси лечебных кормов [15, 16]:

создание на поверхности и в объеме сферы максимальной турбулентности материально-воздушного потока и хаотичности движения частиц в нем, как необходимое условие повышения однородности смеси в поле пересекающихся траекторий аэродинамических, гравитационных и центробежных сил [17];

дополнение конвективного способа смешивания диффузионным;

приготовление лечебных комбикормов в три стадии – первичный премикс, вторичный премикс и лечебные корма.

Исходя из изложенных возможностей предложена

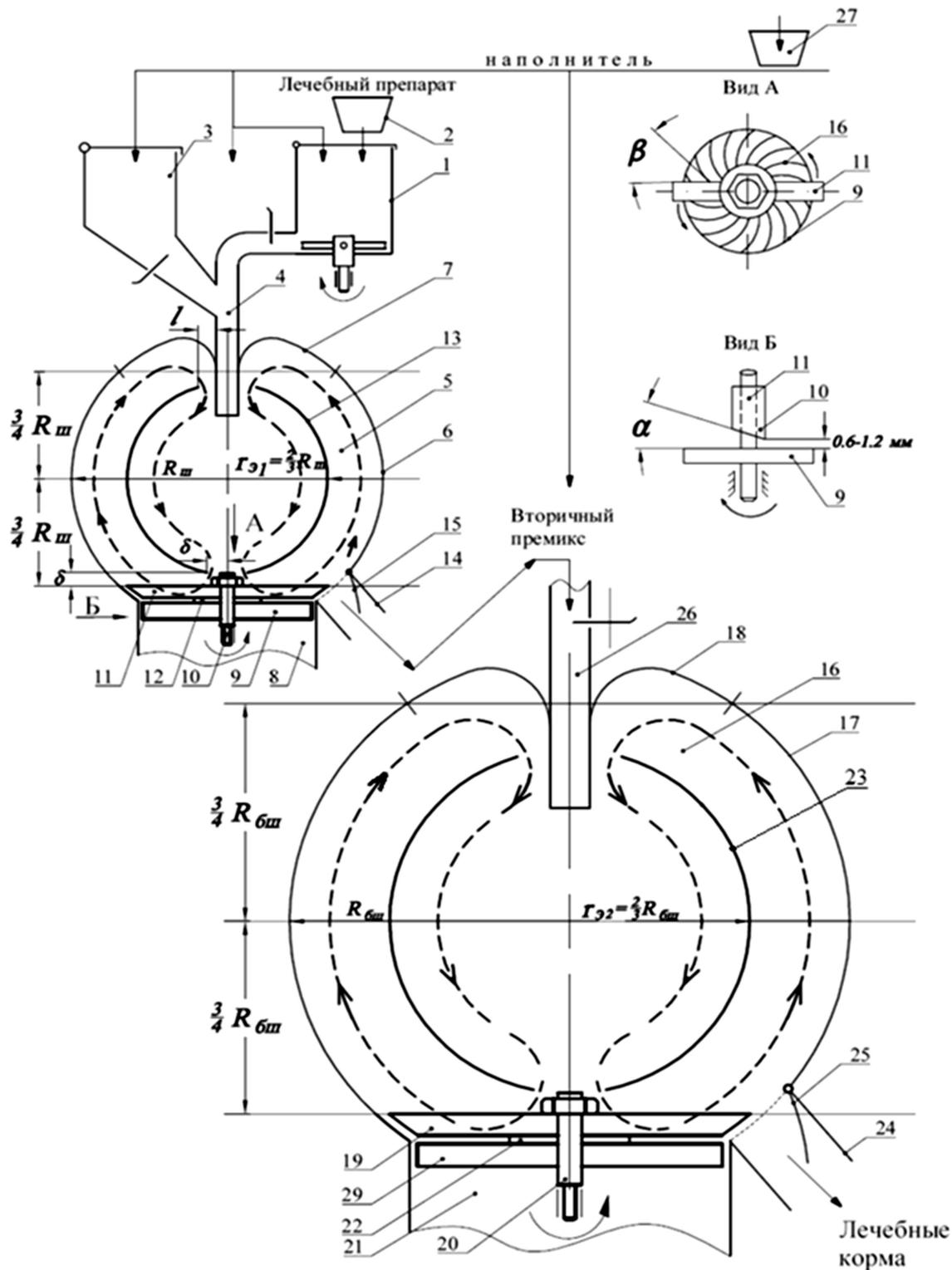


Рис. 4. Линия приготовления лечебных кормов: R_m – радиус шара измельчителя-смесителя, r_{31} – радиус сферического экрана измельчителя-смесителя; δ – расстояние между нижней кромкой сферического экрана и двухсторонней лопастью; 1 – расстояние между верхней кромкой сферического экрана и нижней кромкой обтекателя; β – угол защемления; $R_{6ш}$ – радиус сферического экрана смесителя; r_{32} – радиус сферического экрана смесителя; 1 – лабораторная мельница; 2 – устройство для ввода препарата; 3 – бункер для наполнителя; 4 – загрузочный шлюз; 5 – измельчитель-смеситель; 6 – шаровой корпус измельчителя-смесителя; 7 – обтекатель; 8 – рама; 9 – рабочий диск с насечкой в форме Архимедовой спирали; 10 – вал привода ротора; 11 – двухсторонняя лопасть; 12 – регулировочные прокладки; 13 – сферический экран; 14 – выгрузный патрубок измельчителя – смесителя; 15 – заслонка; 16 – большой смеситель; 17 – шаровой корпус смесителя; 18 – обтекатель смесителя; 19 – двухсторонняя лопасть смесителя; 20 – вал привода лопастей; 21 – рама смесителя; 22 – регулировочные прокладки; 23 – направляющий экран; 24 – выгрузный патрубок смесителя; 25 – задвижка смесителя; 26 – загрузочный шлюз; 27 – бункер для наполнителя.

линия приготовления лечебных кормов (рис. 4) [18]. Работает она следующим образом. В лабораторную мельницу 1 с устройства ввода препаратов 2 помещают лечебный премикс, из бункера 3 добавляют наполнитель в соотношении 1:3. После этого компоненты измельчают ударным воздействием и смешивают в течение 60 с. Образовавшийся первичный премикс через шлюз 4 выгружают в измельчитель-смеситель 5 для приготовления вторичного премикса; в него из бункера 3 добавляют 15-20 % дозы наполнителя в лечебном комбикорме. Включают в работу вал привода 10 измельчителя-смесителя и закрепленную на нем двухстороннюю лопасть 11, лопасть, прилегающая к рабочей поверхности диска 9, закрепленного на раме 8, срезана под углом естественного откоса смеси $\alpha = 23-31^\circ$ (рис. 4, вид Б). При вращении лопасти смесь зажимается наклонной ее стороной в зазоре 0,6-1,2 мм, который регулируется прокладками 12, между лезвием лопастей и насечкой на рабочей стороне диска в форме Архимедовой спирали, под постоянным углом $\beta = 18-20^\circ$ (рис. 4, вид А). При совместном смятии компонентов происходит процесс взаимной диффузии – механическое вдавливание одного в другой. Двухсторонняя лопасть равномерно выбрасывает смесь измельчаемой массы с воздухом на 360° внутренней сферической поверхности корпуса 6 измельчителя-смесителя вторичных премиксов, создается устойчивый поток – псевдооживленный слой, в котором компоненты равномерно распределяются в режиме повышенного давления. Обтекатель 7 через кольцевой зазор l направляет поток смеси вниз, где в объеме сферического экрана 13 с радиусом r продолжается смешивание в псевдооживленном слое в режиме пониженного давления. Сферический экран через зазор δ направляет поток смеси к оси двухсторонней лопасти и далее в зазор между лезвиями лопастей и насечкой на рабочей стороне диска 9. Вакуум в зоне вертикальной оси сферы способствует устойчивой подаче смеси в зону диффузии. Достигается замкнутый устойчивый процесс одновременного совместного смятия компонентов со смешиванием на вогнутой поверхности шара и сферического экрана. Процесс смешивания в измельчителе-смесителе для вторичных премиксов продолжается 100-120 с. Далее смесь через патрубок 14 и шлюз 26 высыпается в большой смеситель 16 и добавляют остальное количество наполнителя. После этого включается в работу вал привода 20 и двухсторонняя лопасть 19, которая при вращении захватывает смешиваемую массу и равномерно выбрасывает материально-воздушный поток по всей вогнутой поверхности (360°) сферы шара 17, поднимая его вверх. Здесь направляющий обтекатель 18 плавно переводит направление движения псевдооживленного слоя снизу-вверх в движение сверху-вниз, и по вогнутой поверхности направляющего сферического экрана 23, образующая линия которого соответствует радиусу $2/3 R_{\text{ш}}$, поток слоя направляется в центр лопастей. Зазор между рабочей частью диска 29, закрепленного на раме 21 и двухсторонней лопастью 19 регулируется прокладками 22. Процесс смешивания продолжается 120-180 с, после чего готовые лечебные комбикорма через выгрузной патрубок 24 подаются в тару.

Таким образом, частицы смешиваемых ингредиентов с различными физико-механическими свойствами, находясь на плоскости вращающейся лопасти от вала ротора, перемещаются с различными скоростями. При

этом одновременно происходит смешивание конвективным способом и сегрегация (разделение). При диффузионном смешивании, которое осуществляется путем совместного смятия и взаимного внедрения смешиваемых материалов из нескольких гетерогенных (разнородных) систем, образуется гомогенный (однородный) продукт, который уже не распадается на составляющие.

Предложена линия приготовления лечебных кормов, витаминных и минеральных премиксов, в которых смешивание компонентов осуществляется в три этапа, одновременно конвективным и диффузионным способами, что значительно повышает однородность смеси.

Литература.

1. Крюков В.С. Проблемы биохимии и технологии использования селена в питание птиц // Проблемы биологии продуктивных животных. 2017. №4. С. 24–38.
2. Сосипатров Г.В. Гельминтозы и рекомендации по их профилактике в хозяйствах специализированных по откорму свиней // Труды всесоюзного института гельминтологии. 1974. Т 21. С 61–66.
3. Кибакин В.В. Основные гельминтозы кур и меры борьбы с ними в условиях Алтайского края и Восточной Сибири: дисс. на соискание уч. степени доктора наук. Красноярск, 2006. 245 с.
4. Спасивцев А. Процесс смешивания при производстве комбикормов // Комбикорма. 2016. № 3. С. 37–41.
5. Клычев Е. М., Сыроватка В. И. Исследование процесса смешивания сыпучих кормов в псевдооживленном слое // Науч. тр. ВИЭСХ. 1973. Т. 34. С. 95–129.
6. Горячкин В.П. Собрание сочинений. М.: Колос, 1963. 720 с.
7. Тарг С. М. Краткий курс теоретической механики. М.: Изд-во физико-математической литературы, 1963. 478 с.
8. Василенко П.М. Теория движения частиц по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин. Киев: изд-во Академия с-х наук УССР, 1960. 180 с.
9. Смирнов В. И. Курс внешней математики, М.: Изд-во физико-математической литературы, 1958. 542 с.
10. Лачуга Ю. Ф., Ксендзов В. А. Теоретическая механика. М.: Колос, 2005. 575 с.
11. Березин И.С., Жидков И.П. Методы вычислений. М.: Госиздат физико-технической лит., 1962. 142 с.
12. Сыроватка В. И. Основные закономерности процесса измельчения зерна в молотковой дробилке. // Научные труды ВИЭСХ. 1964. Т. XIV. С. 89–155.
13. Кильчевский Н. А. Теория соударения твердых тел. М.: Ростехиздат., 1953. 269 с.
14. Сыроватка В. И. Машинные технологии приготовления комбикормов в хозяйствах. М.: Типография Россельхозакадемии, 2010. 247 с.
15. Кербер М. Л., Виноградов В. М., Головкин Г. С. Полимерные композиционные материалы. СПб: Химия, 2008. 560 с.
16. Тодес О. М., Цитович О. Б. Аппараты с кипящим зернистым слоем. Ленинград: Химия, 1986. 281 с.
17. Гаврилов Д. М., Лебедев И. Ф. Поведение материальных частиц в потоке на искривленной поверхности // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. №3. С. 368–372
18. Сыроватка В. И., Жданова Н. В., Обухов А. Д. Линия приготовления лечебных кормов. Патент №273050 Ru 273051 С1. 2020. Бюл. №24

Поступила в редакцию 25.11.2020

После доработки 28.01.2021

Принята к публикации 18.02.2021