

# ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 631.363.7

DOI: 10.53083/1996-4277-2023-222-4-86-92

В.В. Садов, С.А. Сорокин

V.V. Sadov, S.A. Sorokin

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ КОМБИКОРМОВ В ВЕРТИКАЛЬНОМ ШНЕКОВОМ СМЕСИТЕЛЕ

### INTENSIFICATION OF COMPOUND FEED MIXING PROCESS IN A VERTICAL SCREW MIXER

**Ключевые слова:** комбикорма, вертикальный смеситель, шнек, процесс смешивания, кормопроизводство.

Процесс смешивания сыпучих материалов применяют во многих отраслях. В комбикормовой отрасли этот процесс осложняется большим разнообразием размеров частиц. Это приводит к сегрегации, т.е. разделению частиц на фракции при одновременном смешивании. Наступает этот процесс при достижении допустимого уровня однородности смеси. Исходя из этого необходимо интенсифицировать процесс, т.е. уменьшить время нахождения материала в смесителе для повышения производительности машины и снижения энергоёмкости процесса. Предложена конструкция, защищенная патентом на изобретение, состоящая в нижней части из цилиндрического корпуса смесителя и корпуса шнека, а в верхней части – конического корпуса и шнека с основанием конуса кверху. По поверхности конуса расположены отверстия, увеличивающиеся в диаметре к его основанию. Это способствует постепенной выгрузке материала из корпуса шнека в освобождающийся зазор между наружной стенкой конического корпуса и материалом за счет его опускания под действием силы тяжести. На основании сил, действующих на частицу, при движении вверх по шнеку получена математическая модель, позволяющая установить как характер движения отдельных частиц, так и потока кормового материала в зависимости от геометрических, кинематических параметров смесителя с учетом физико-механических свойств смешиваемых компонентов. Геометрическое представление результатов дает возможность определить влияние скорости вращения шнека на поступательную скорость частицы или шнека в вертикальном направлении. Эта скорость нелинейная, и можно подобрать оптимальную частоту враще-

ния шнека для достижения необходимой скорости подъема.

**Keywords:** compound feed, vertical mixer, auger, mixing process, forage production.

The process of mixing bulk materials is used in many industries. In the compound feed industry, this process is complicated by a wide variety of particle sizes. This leads to segregation, i.e. the separation of particles into fractions while mixing. This process occurs when the permissible level of homogeneity of the mixture is reached. Based on this, it is necessary to intensify the process, i.e. to reduce the time of the material in the mixer to increase the output and reduce the energy intensity of the process. A design protected by a patent for the invention is proposed; in its lower part, it consists of cylindrical mixer housing and a screw housing, and in the upper part - of a conical housing and a screw with a cone base to the top. Holes are located on the surface of the cone increasing in diameter to its base. This contributes to the gradual unloading of the material from the screw housing into the opening gap between the outer wall of the conical housing and the material due to its lowering by gravity. Based on the forces acting on the particle when it moves up the screw, a mathematical model is obtained that allows determining both the nature of the movement of individual particles and the flow of feed material depending on the geometric, kinematic parameters of the mixer taking into account the physico-mechanical properties of the components being mixed. The geometrical representation of the results makes it possible to determine the effect of the screw rotation speed on the translational velocity of the particle or screw in the vertical direction. This speed is not linear and it is possible to choose the optimal speed of rotation of the screw to achieve the required lifting speed.

**Садов Виктор Викторович**, д.т.н., доцент, зав. кафедрой механизации производства и переработки с.-х. продукции, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: sadov.80@mail.ru.

**Сорокин Сергей Анатольевич**, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: sorokin\_sg@mail.ru.

**Sadov Viktor Viktorovich**, Dr. Tech. Sci., Assoc. Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: sadov.80@mail.ru.

**Sorokin Sergey Anatolevich**, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: sorokin\_sg@mail.ru.

### Введение

Производство комбикормов на сельскохозяйственных предприятиях снижает затраты на транспортировку покупных комбикормов. Используются собственные кормовые ресурсы, однородность соответствует требованиям, и в итоге снижается себестоимость продукции. При этом комбикорма надо вырабатывать строго в соответствии с рецептурой с добавлением премиксов, белковых, витаминных и минеральных концентратов [1, 2].

В комбикормовой отрасли смешиванию отводится важная роль с целью распределения всех компонентов по всему объему до получения требуемой однородности. Исследованием процессов смешивания, проектирования смесителей с обоснованием их параметров занимались многие ученые. Наиболее значимые результаты имеют С.Г. Карташов, В.Г. Коба, Г.М. Кукта, С.В. Мельников, Т.А. Oxley, А. Peterson и другие.

При смешивании комбикормов большое влияние оказывают тип смесителя, организация потоков материала, а также его физико-механические свойства.

Широкое распространение получили способы смешивания вращающимися лопастями, вращением корпуса смесителя, вибрации и т.д. Анализ смесителей показал, что смесители периодического действия, как правило, имеют меньшую производительность, чем агрегаты непрерывного действия, но энергоемкость у них выше за счет многократной циркуляции материала, т.е. увеличения времени смешивания. При этом достигается более высокая однородность смеси [3-5].

**Цель** исследования – повышение однородности комбикорма за счет организации сложного межслоевого движения материала вертикальным шнеком.

### Объекты и методы исследований

Вертикальные шнековые смесители заняли значительную нишу в комбикормовом производ-

стве [6]. Процесс перемещения и смешивания кормовых материалов в вертикальном шнековом смесителе до конца не изучен, в основном, по мнению исследователей, он зависит от параметров шнековой навивки, угловой скорости шнека и коэффициентов трения материала об ограждающие поверхности.

Ускорить процесс смешивания возможно изменением конструкции шнека и его корпуса. В нижней части корпуса смесителя и шнека выполнены цилиндрическим для обеспечения подъема материала вверх, а для выхода частиц из корпуса шнека должно быть коническое основание кверху. По поверхности конуса расположены отверстия, увеличивающиеся в диаметре к его основанию (рис. 1). Это способствует постепенной выгрузке материала из корпуса шнека в освобождающийся зазор между наружной стенкой конического корпуса и материалом за счет его опускания под действием силы тяжести [7].

На частицу, находящуюся на вращающемся шнеке, действуют силы (рис. 2).

Спроецируем силы на оси координат и запишем в виде системы трех уравнений [8]:

$$\begin{cases} N_{\text{ш}} \cos \alpha - f_{\text{ш}} N_{\text{ш}} \sin \alpha - f_{\text{ц}} N_{\text{ц}} \cos \beta - mg = 0 \\ f_{\text{ц}} N_{\text{ц}} \sin \beta - f_{\text{ш}} N_{\text{ш}} \cos \alpha - N_{\text{ш}} \sin \alpha = 0 \\ -N_{\text{ц}} + mR\omega_0^2 \left[ \frac{\sin \alpha \sin \beta}{\cos(\beta - \alpha)} \right]^2 = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $N_{\text{ш}}$  – нормальная реакция от витка;

$f_{\text{ш}}$  – коэффициент трения материала о поверхность витка;

$N_{\text{ц}}$  – нормальная реакция от внутренней поверхности кожуха;

$\alpha$  – угол подъема винтовой линии;

$t = 2\pi R t g \alpha$  – шаг шнека;

$R$  – внешний радиус витков;

$m$  – масса частиц материала;

$f_{\text{ц}}$  – коэффициент трения материала о поверхность кожуха;

$\beta$  – угол между вектором абсолютной скорости и осью шнека.

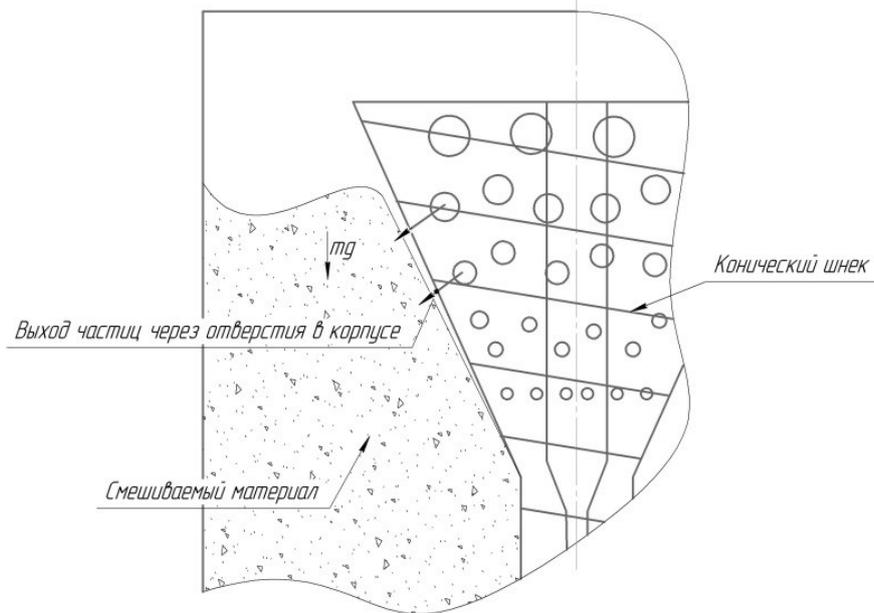


Рис. 1. Схема процесса смешивания

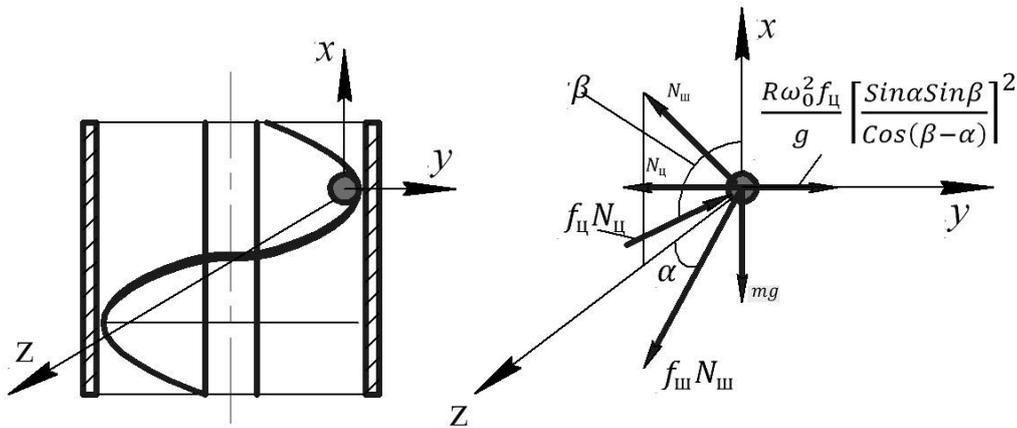


Рис. 2. Влияние силовых факторов на единичный объем материала, лежащего на витке шнека

**Результаты исследования**

Уравнения системы (1) дают возможность найти зависимость между геометрическими и кинематическими величинами:

$$\frac{\frac{R\omega_0^2 f_ц}{g} \left[ \frac{\sin\alpha \sin\beta}{\cos(\beta-\alpha)} \right]^2 - f_ш + tg\alpha}{\sin\beta(1 - f_ш tg\alpha) - \cos\beta(1 + f_ш tg\alpha)} = 0. \quad (2)$$

Связь параметров выражения (2) дает возможность методом математического моделирования подобрать оптимальное их соотношение. Из анализа количественных результатов получили, что наибольшее влияние оказывают значения радиуса, угла подъема винтовой линии и скорости вращения шнека, наряду с коэффициентами трения. Данные параметры возьмем в качестве критериев оптимизации.

Уравнения (1), (2) моделируют движение частиц, но очевидно, что характер движение объема сыпучего кормового материала будет несколько отличаться от характера описанного движения. Выдвинем предположение о том, что модель движения, записанная в виде движения потока вязкой среды, точнее копирует поведение реальной кормовой смеси при перемещении в вертикальном шнековом смесителе с переменным диаметром.

Тогда рассмотрим на рисунке 3 равновесие элементарного объема сыпучей смеси, расположенного на секторе витка шнека с центральным углом  $\Delta\varphi$ . Установим форму свободной поверхности потока в поперечном сечении, ограниченную угловым сектором, внутренним и внешним радиусами, образованными валом шнека и кожухом соответственно.

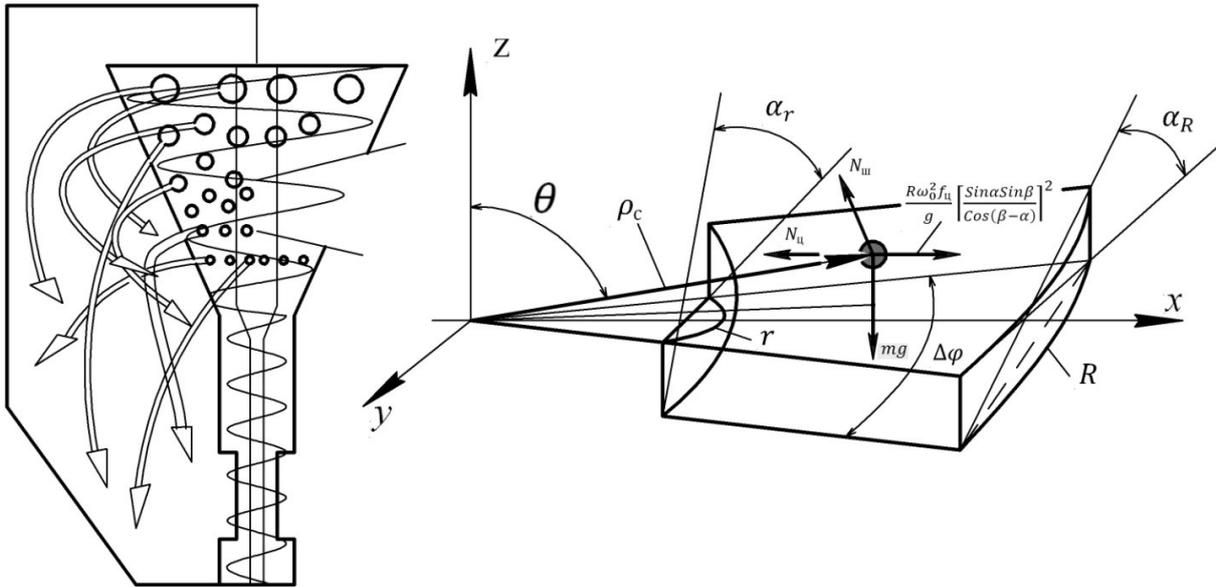


Рис. 3. Схема движения сыпучего материала вне кожуха шнека и элементарный его объем на поверхности витка шнека

Исходя из условий равенства давлений элементарной поверхности во всех точках, уравнение свободной поверхности будет равно:

$$\begin{cases} z = z_0 + \frac{\omega^2 x^2}{2g} \\ z = ax^2 + b \end{cases} \quad (3)$$

Положение устойчивого состояния частицы на поверхности потока позволяет определить положение точки пересечения проекции частицы с винтовой поверхностью. Будем считать, что движение частицы происходит по концентрическим окружностям со скоростью, примерно равной скорости вращения шнека.

Поиск решения уравнений (1) и (3) позволяет определить координаты точки пересечения свободной поверхности объема смеси с поверхностью шнека:

$$r^2 \omega_0^2 f_{ц} - f_{ш}(f_{ц} R \omega_0^2 tg \alpha + g)r - gRtg \alpha = 0. \quad (4)$$

Так как угловые скорости всех частиц элементарного объема равны, то

$$tg \alpha_{ц} tg \beta_{ц} = tg \alpha_R tg \beta_R. \quad (5)$$

Так как угол винтовой линии и радиус шнека смесителя с высотой изменяются, для описания движения объема кормовой смеси заменим в уравнениях (1) проекции сил нормальных реакций витков шнека и стенок кожуха на величины давлений по этим поверхностям:

$$N_{ш} Sin \alpha = P_{ш} S_{верт}; \quad N_{ш} Cos \alpha = P_{ш} S_{гор}. \quad (6)$$

С учетом корректировки система (1) принимает вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{ш} S_{гор} - f_{ш} P_{ш} S_{верт} - f_{ц} P_{ц} S_{ц} Cos \beta_R - \gamma V = 0 \\ f_{ц} P_{ц} S_{ц} Sin \beta_R - f_{ш} P_{ш} S_{гор} - P_{ш} S_{верт} = 0 \\ -P_{ц} S_{ц} + \frac{\gamma V}{g} \rho_{цм} \omega_0^2 \left[ \frac{Sin \alpha Sin \beta}{Cos(\beta - \alpha)} \right]^2 = 0 \end{array} \right. \quad (7)$$

где  $P_{ш}$  – сила давлений кормового материала на поверхность витка в рассматриваемом секторе;

$S_{верт}$  – проекция сектора на плоскость  $zoz$ ;

$S_{гор}$  – проекция сектора на плоскость  $хоу$ ;

$P_{ц}$  – сила давления материала на внешний цилиндр;

$S_{ц}$  – площадь поверхности объема материала, соприкасающегося с внешней поверхностью;

$V$  – объем транспортируемого шнеком материала;

$\rho_{цм}$  – длина радиус-вектора от оси шнека до центра объема кормового объема.

Спроецируем на горизонтальную поверхность сектор витка шнека с углом  $\Delta\varphi$  на участке от  $r$  до  $R$ . Интегральная зависимость площади будет равна

$$S_{\text{гор}} = \int_r^R x \Delta\varphi dx = \frac{R^2 - r^2}{2} \Delta\varphi. \quad (8)$$

Здесь ось  $x$  направлена радиально и характеризует величину расширения конуса в пределах от  $r$  до  $R$ .

Площадь вертикальной проекции в этих же пределах

$$S_{\text{верт}} = \int_r^R x \operatorname{tg} \alpha_x \Delta\varphi dx. \quad (9)$$

Запишем величину объема материала, лежащего на витке шнека, в сферических координатах  $\rho$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$ , как сектор витка шнека, поверхностями трубы шнека и кожуха  $r$  и  $R$ , а также свободной криволинейной поверхностью материала.

Объемный сектор определится выражением

$$V = \iint_S f(\rho) d\rho d\theta = \int_0^{\Delta\varphi} d\theta \int_r^R f(\rho) \rho d\rho = [(R^2 + r^2)a + 2b] \frac{R^2 + r^2}{4} \Delta\varphi,$$

где  $\rho = \sqrt{R^2 + r^2}$ ;  $x = \rho \cos\theta$ ;  $y = \rho \sin\theta$ .

Координату центра масс рассматриваемого объема, записанную в сферических координатах, определим выражением [9]

$$\rho_c = \frac{\int_V x dV}{V} = \frac{\int_0^{\Delta\varphi} \int_r^R f(\rho) \rho^2 \cos\theta d\rho d\theta}{\int_0^{\Delta\varphi} \int_r^R f(\rho) \rho d\rho d\theta} = \frac{\sin\Delta\varphi \int_r^R (a\rho^2 + b) \rho^2 d\rho}{\Delta\varphi \int_r^R (a\rho^2 + b) \rho d\rho}. \quad (10)$$

При  $\Delta\varphi$ , имеющем бесконечно малое значение  $\frac{\sin\Delta\varphi}{\Delta\varphi} \approx 1$ , проинтегрируем выражение (10) и подставим в (7), получим условие для определения угла  $\beta$  между осью шнека и абсолютным движением объема кормового материала с центром масс, расположенным в точке С:

$$\frac{f_{\text{ц}} \rho_{\text{цм}} \omega_0^2}{g} \left[ \frac{\sin\alpha \sin\beta}{\cos(\beta - \alpha)} \right]^2 - \frac{f_{\text{ш}} S_{\text{гор}} + S_{\text{верт}}}{(S_{\text{гор}} - f_{\text{ш}} S_{\text{верт}}) \sin\beta_R - (S_{\text{верт}} + f_{\text{ш}} S_{\text{гор}}) \cos\beta_R} = 0. \quad (11)$$

Углы  $\beta_R$  и  $\beta$  связаны выражением  $\operatorname{tg} \beta = \frac{\rho_{\text{цм}}}{R} \operatorname{tg} \beta_R$ .

Анализируя зависимости (2) и (11), можно определить величину влияния отдельных факторов на параметры движения по шнеку как отдельных частиц, так и потока сыпучего материала. Например, рассмотрим зависимости угла вектора абсолютной скорости к оси шнека и угловой скорости шнека. Остальные параметры оставим неизменными (рис. 4).

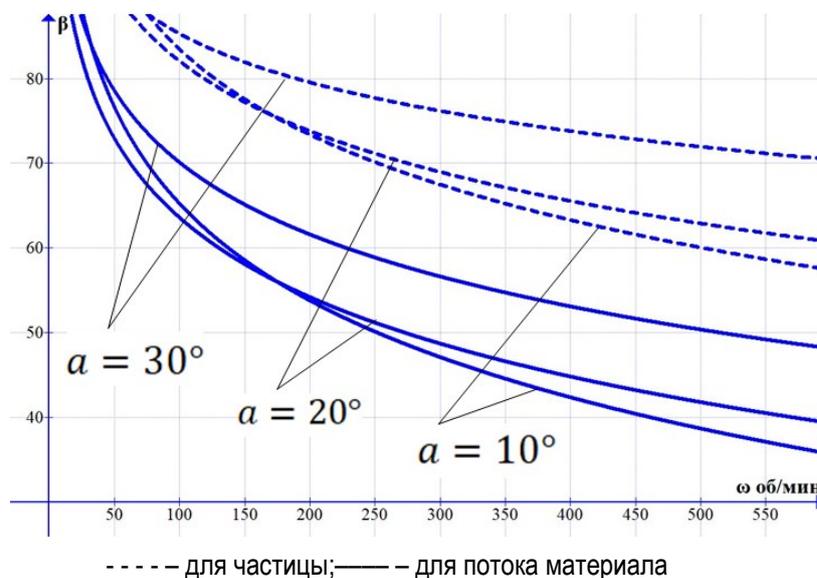


Рис. 4. Изменение углов наклона вектора абсолютного движения к оси шнека при различных углах подъема винта: для  $\alpha = 10^\circ$ ,  $\alpha = 20^\circ$ ,  $\alpha = 30^\circ$

Исследование графических зависимостей показывает, что с ростом угловой скорости шнека угол  $\beta$  уменьшается. Это приводит к росту в вертикальном направлении поступательной скорости материала. Заметим, что в пределах 150-200 об/мин. интенсивность этого роста снижается и далее изменяется не существенно с ростом скорости, следовательно, можно рекомендовать рабочий диапазон угловых скоростей шнека в пределах, близких к скорости в 150 об/мин.

Из графика видно существенное отличие количественных показателей процесса движения частицы от движения объема материала в потоке. В зависимости от кинематических и геометрических параметров угол  $\beta$  для потока меняется менее выражено, чем для случая рассмотрения отдельной частицы. Это обстоятельство может быть объяснено эффектом перемешивания слоев кормового материала в процессе движения по виткам шнека, который неизменно присутствует при транспортировании шнеками.

Полученное выражение (11) дает возможность подобрать параметры смесителя, при которых это свойство будет наиболее отчетливо выражено.

При этом эффект гравитационного смешивания при просыпании материала через отверстия дополнит частичное смешивание в шнеке, и за несколько циклов будет достигнута заданная рецептом однородность смеси.

### Выводы

1. Представленная конструкция смесителя выполняет двухступенчатое смешивание компонентов кормовых материалов: в шнеке, переменного диаметра за счет разности скоростей подъема и радиального движения по виткам шнека; в полости между корпусом и кожухом шнека за счет гравитационного взаимопересекающего течения.

2. Получена математическая модель, позволяющая установить характер движения отдельных частиц и потока кормового материала в зависимости от геометрических, кинематических параметров смесителя с учетом физико-механических свойств смешиваемых компонентов.

### Библиографический список

1. РД-АПК 1.10.17.01-15. Методические рекомендации по технологическому проектированию предприятий по производству комбикормов.

Введ. 30.07.2015. – Москва: Минсельхоз РФ, 2015. – 110 с. – Текст: непосредственный.

2. ГОСТ Р 51551-2000 Белково-витаминно-минеральные и амидо-витаминно-минеральные концентраты. Технические условия. – 10 с. – Текст: непосредственный.

3. Мельников, С. В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм / С. В. Мельников. – Ленинград: Колос, 1978. – 560 с. – Текст: непосредственный.

4. Carstensen, J.T., Patel, M.R. (1977). Blending of irregularly shaped particles. *Powder Technology*. 17 (3): 273-282. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(77\)80031-4](https://doi.org/10.1016/0032-5910(77)80031-4).

5. Федоренко, И. Я. Техника и технологии в животноводстве. Часть 1. Механизация приготовления и раздачи кормов: учебное пособие / И. Я. Федоренко, В. В. Садов. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2014. – 207 с. – Текст: непосредственный.

6. Ведищев, С. М. Смеситель сухих рассыпчатых кормосмесей / С. М. Ведищев, А. В. Прохоров, Н. В. Хольшев. – Текст: непосредственный // Вопросы современной науки и практики / Ун-т им. В. И. Вернадского. – 2012. – № 4 (42). – 326 с.

7. Патент 2790980 Российская Федерация МПК А 23 N17/00 Малогабаритный комбикормовый агрегат / Садов В. В., Сорокин С. А. – Патентообладатель ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ. – № 2022118346, заяв. 05.07.2022; опубл. 01.03.2023 Бюл. № 7. – Текст: непосредственный.

8. Григорьев, А. М. Винтовые конвейеры / А. М. Григорьев. – Москва: Машиностроение, 1972. – 218 с. – Текст: непосредственный.

9. Пискунов, Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисление: в 2 кн. / Н. С. Пискунов. – Москва: Наука, 1985. – 1008 с. – Текст: непосредственный.

### References

1. RD-APK 1.10.17.01-15. Metodicheskie rekomendatsii po tekhnologicheskomu proektirovaniu predpriatii po proizvodstvu kombikormov. Vved. 30.07.2015. – Moskva: Minselkhoz RF, 2015. – 110 s.

2. GOST R 51551-2000 Belkovo-vitaminno-mineralnye i amido-vitaminno-mineralnye kontsenraty. Tekhnicheskie usloviia. – 10 s.

3. Melnikov, S.V. Mekhanizatsiia i avtomatizatsiia zhivotnovodcheskikh ferm / S.V. Melnikov. – Leningrad: Kolos, 1978. – 560 s.

4. Carstensen, J.T., Patel, M.R. (1977). Blending of irregularly shaped particles. *Powder Technology*. 17 (3): 273-282. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(77\)80031-4](https://doi.org/10.1016/0032-5910(77)80031-4).

5. *Техника и технологии в животноводстве. Част 1. Механизация приготовления и раздачи кормов: учебное пособие / И.А. Федоренко, В.В. Садов. – Барнаул: RIO AGAU, 2014. – 207 с.*

6. Vedishchev, S.M. Sмеситель сушких рассыпчатых кормосмесей / S.M. Vedishchev, A.V. Prokhorov, N.V. Kholshchev // *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki / Un-t im. V.I. Vernadskogo. – 2012. – No. 4 (42).*

7. Patent 2790980. Rossiiskaia Federatsiia MPK A 23 N17/00 Malogabaritnyi kombikormovyi agregat. Sadov V.V., Sorokin S.A. Patentobladatel FGBOU VO Altaiskii GAU. – No. 2022118346, zaiav. 05.07.2022; opubl. 01.03.2023 Biul. No. 7.

8. Grigorev A.M. *Vintovye konveierey. – Moskva: Mashinostroenie, 1972. – 218 s.*

9. Piskunov N.S. *Differentsialnoe i integralnoe ischislenie. V 2-kh kn. – Moskva: Nauka, 1985. – 1008 s.*



УДК 621.791.92:669.1

DOI: 10.53083/1996-4277-2023-222-4-92-98

**Р.В. Бесполденев, И.Я. Федоренко,  
Т.Н. Землянухина, М.В. Полковникова, А.В. Ишков**  
R.V. Bepoldenov, I.Ya. Fedorenko,  
T.N. Zemlyanukhina, M.V. Polkovnikova, A.V. Ishkov

## ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЛОТКОВ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ДРОБИЛКИ С ВОЗДУШНО-ЗЕРНОВЫМ СЛОЕМ

### INVESTIGATION AND MODELING OF INTERACTION OF HAMMERS OF A VERTICAL CRUSHER WITH AIR-GRAIN LAYER

**Ключевые слова:** дробилка, кормовое зерно, воздушно-зерновой слой, износ молотка, математическая модель, профиль изношенной детали.

Дробилки с вертикальным ротором имеют целый ряд преимуществ при приготовлении кормов для КРС в сравнении с широко применяемыми сейчас машинами с горизонтальным расположением ротора. Они нашли применение в животноводстве не только при измельчении кормового зерна, но при приготовлении грубых (фуражных) кормов и различных кормосмесей, где к компонентам предъявляются повышенные требования к физико-механическим параметрам, зоотехнической и кормовой ценности. В Алтайском крае такие дробилки стали одними из распространенных машин, развивают известную конструкцию и являются оригинальной, запатентованной разработкой коллектива ученых Алтайского ГАУ. С конца 90-х годов XX в. они устанавлива-

ются на автоматизированные комбикормовые агрегаты «Алтай» различной производительности. При работе молотковой дробилки с вертикальной осью около ее деки образуется устойчивый, вращающийся, двухфазный воздушно-зерновой слой, при контакте с которым и происходит изнашивание молотков дробилки, которое зависит от контактных напряжений, действующих в слое, и наработки. В статье получено теоретическое выражение для линейного износа молотка дробилки вида  $L = Kt(r^3 - 3r_1^2 r + 2r_1^3)$ , который зависит от характеристик слоя, свойств измельчаемого материала и времени измельчения, сложным образом – от расстояния от края молотка до оси его подвеса. Сопоставление теоретических кривых изнашивания с реальным профилем изношенных молотков показывает их идентичность и свидетельствует об адекватности предложенной математической модели.