

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ



УДК 631.363.2

В.В. Садов, С.А. Сорокин
V.V. Sadov, S.A. Sorokin

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКИ С ВЕРТИКАЛЬНЫМ ВАЛОМ ПРИ ИЗМЕЛЬЧЕНИИ ЗЕРНОВЫХ КОМПОНЕНТОВ

IMPROVING THE EFFICIENCY OF HAMMER CRUSHER WITH VERTICAL SHAFT WHEN CRUSHING GRAIN COMPONENTS

Ключевые слова: *измельчение зерновых компонентов, молотковая дробилка с вертикальным валом, разгонный диск, криволинейные лопатки, скорость частицы.*

Повышение эффективности процесса измельчения в молотковой дробилке с вертикальным валом можно достичь за счет использования разгонного диска, находящегося над ротором. Дополнительный разгон частиц с последующим ударом позволит начать предварительное разрушение материала. Однако для направленного движения частиц и дальнейшего близкого к лобовому удару частиц с наибольшей скоростью возможно только при направленном движении при помощи лопаток. Известные варианты расположения лопаток показывают, что достичь необходимого направления движения в сочетании с высокой производительностью возможно при загнутых назад лопатках. Рассматривая схему сил, действующих на частицу, при движении по диску с лопатками с учетом подвижной и неподвижной системы координат получим систему уравнений относительного движения частицы. Используя начальные условия, находим постоянные

интегрирования. Решая систему уравнений, установим уравнение баланса сил, действующих на частицу. Зная силы давления лопатки на зерновку и значения переносной и относительной скоростей, можно найти величину полной скорости зерновки в момент отрыва от поверхности диска при сходе с лопатки. Кривизна лопатки определяет значение относительной скорости и значение начального угла, задающего траекторию движения зерновки. Представленные теоретические зависимости позволяют определить численные значения скорости и угла полета частицы, что повлияет на расстояние до деки и положение ударной плоскости по отношению к летящей зерновке. Основное влияние на абсолютную скорость частицы при сходе с диска оказывают угловая скорость и его радиус.

Keywords: *grinding grain components, vertical-shaft hammer crusher, accelerating disc, curved blades, particle velocity.*

Improving the efficiency of the grinding process in a hammer mill with a vertical shaft may be achieved through the use of a booster disk above the rotor. Additional ac-

celeration of particles with a subsequent strike will allow the pre-destruction of the material to begin. However, for directional movement of particles and further close to a frontal impact of particles with the highest speed is possible only with directional movement using blades. Known variants of the arrangement of the blades show that it is possible to achieve the required direction of motion in combination with high productivity with the blades bent backwards. Considering the scheme of forces acting on the particle, when moving along a disk with blades, taking into account the moving and stationary coordinate system, we obtain the system of equations for relative motion of the particle. Using the initial conditions, we find the integration constants. Solving the system of equations, we find the equation of the balance of forces acting on the

particle. Knowing the pressure forces of the blade on the weevil and the values of the portable and relative velocities, we can find the value of the full velocity of the weevil at the moment of detachment from the disk surface when it leaves the blade. The curvature of the blade determines the value of the relative velocity and the value of the initial angle that specifies the trajectory of movement of the weevil. The presented theoretical dependences allow determining the numerical values of the velocity and angle of flight of the particle which will affect the distance to the deck and the position of the shock plane with respect to the flying weevil. The main influence on the absolute velocity of a particle when it leaves the disc is exerted by the angular velocity and its radius.

Садов Виктор Викторович, д.т.н., доцент, каф. механизации производства и переработки сельскохозяйственной продукции, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 203-272. E-mail: sadov.80@mail.ru.

Сорокин Сергей Анатольевич, к.т.н., доцент каф. механики и инженерной графики, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 203-364. E-mail: sorokin_sg@mail.ru.

Sadov Viktor Viktorovich, Dr. Tech. Sci., Assoc. Prof., Chair of Agricultural Production and Processing Mechanization, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 203-272. E-mail: sadov.80@mail.ru.

Sorokin Sergey Anatolyevich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Chair of Mechanics and Engineering Graphics, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 203-364. E-mail: Sorokin_sg@mail.ru.

Введение

Экономическая ситуация в настоящее время подталкивает к использованию новых технологий, направленных на ресурсосбережение. Процесс измельчения при приготовлении комбикормов является основным, т.к. влияет на качество получаемой смеси, т.е. формирует требуемый модуль помола, и к тому же этот процесс наиболее энергоемкий (50-70% затрачиваемой энергии от всего технологического процесса). Снижение даже небольшой части энергоемкости в масштабах хозяйства, региона, страны дает ощутимый результат.

Известно, то чем выше скорость рабочих органов, тем эффективнее идет процесс измельчения. Как показали исследования, увеличение окружной скорости молотков $v_m > 80$ м/с ведет к резкому возрастанию удельного расхода энергии [1, 2]. Основная часть энергии тратится на измельчение истиранием. Учитывая, что наиболее эффективным способом является ударное разрушение, то необходимо искать подходы для интенсификации данного вида измельчения.

Цель исследования – определить возможность повышения эффективности измельчения зерна за счет применения разгонного диска и создания условий для начального образования развинутой поверхности в материале.

Объекты и методы исследований

В последнее время при производстве комбикормов в сельскохозяйственных предприятиях получили распространение молотковые дробилки с вертикальным валом, имеющие преимущества перед дробилками с горизонтальным валом [3]: экономия электроэнергии на 25-30% (удельная энергоемкость на ячмене $Q \approx 6$ кВт·ч/т); минимальный процент выхода переизмельченного зерна; более равномерную загрузку рабочей камеры; охват декой составляет 360° .

Несмотря на все преимущества рассматриваемых дробилок, основные негативные процессы характерны и для них [4]: наличие при измельчении значительного количества нецентральных ударов молотками; низкой скорости ударов; постепенное уменьшение массы измельчаемого продукта; придаваемое зерну дополнительное

вращательное движение. Разрушение происходит в результате многократных ударов, число которых индивидуально для каждого измельчаемого зерна в отдельности. Наибольшей скорости дробления соответствует начальный момент загрузки, когда материал в дробильной камере практически полностью представлен нераздробленными зернами. В это время верхние ряды молотков подвергаются основному взаимодействию с материалом и, соответственно, максимальному износу (рис. 1). Кроме того, установленные молотки на оси ротора находятся близко друг к другу, что значительно влияет на пропускную способность дробилки.



а



б

Рис. 1. Дробилка с вертикальным валом:
а – общий вид; б – ротор
(виден значительный износ верхних молотков)

Исследователи ведут постоянный поиск технических решений, позволяющих повысить эффективность молотковой дробилки в части снижения энерго- и материалоемкости и повышения качества продукции.

Один из способов обеспечения равномерной загрузки камеры и получения требуемого состава дерти возможно с применением автоматического регулирования подачи компонентов в зависимости от их влажности, сыпучести и других параметров [5].

Возможен способ ударного воздействия зернового материала о деку при помощи разгонного диска [6]. Это позволит частично производить разрушение или образование трещин в материале, что снизит ударную нагрузку на молотки верхних рядов.

Результаты исследования

При измельчении зерновых компонентов в отдельности возникает ряд проблем, а именно забивание решет (если они имеются), переизмельчение и другие факторы, затрудняющие данный процесс: ячмень имеет большой коэффициент восстановления, оболочка гороха, шелуха подсолнечника, цветочная оболочка овса – малый удельный вес, жмых масличных культур налипает на стенки из-за находящегося в нем масла и т.д. Это является одной из причин для совместного измельчения нескольких компонентов, которые можно разделить на легко измельчаемые (пшеница, горох) и трудно измельчаемые (ячмень, овес, жмых и др.). В этом случае соотношение каждого компонента в смеси снижается, что способствует снижению негативных факторов.

Исходя из различных физико-механических свойств измельчаемых зерновых компонентов (твердость, влажность, прочность и др.) не происходит одновременное измельчение зерен различных компонентов, что приводит к образованию смеси из целых и измельченных частиц. В итоге довести материал до максимальной однородности в дробилке можно только при условии выровненного гранулометрического состава.

С.В. Мельников рассматривает процесс измельчения как стохастический, т.е. случайный во времени [1]. Случайность процесса измельчения обусловлена прочностными свойствами отдельных зерен, неоднородностью структуры и влажности, в связи с чем, число ударов, необходимое для измельчения зерна до определенной степени, является величиной случайной, колеблющейся около какой-то средней величины. В основу закона распределения числа ударов (времени жизни) автор положил математическую модель процесса, данную Кэптейном, где случайная величина числа ударов, необходимых для достижения степени измельчения, имеет логарифмически нормальное распределение.

Процесс измельчения необходимо рассматривать с разных сторон, используя несколько критериев оптимальности: качество выполнения технологического процесса, удельная энергоемкость, эксплуатационные показатели [7].

Одним из способов измельчения, применяемых в молотковых дробилках, является разрушение материала о неподвижную поверхность. Этот способ применим для предварительного воздействия ударными нагрузками на зерновой материал перед воздействием молотков, и эффективность P будет зависеть

$$P = f(v, Q, W, HB, \beta),$$

где v – абсолютная скорость материала при сходе с диска, м/с;

Q – подача материала, кг/с;

W – влажность материала, %;

HB – твердость материала;

β – угол, характеризующий форму лопаток, град.

При вращении гладкого диска, за счет низкого коэффициента трения, материал перемещается относительно диска кривой в противоположную сторону, что приводит к отклонению направления абсолютной скорости частиц от лобового о деку и снижению эффективности воздействия.

В нашем случае необходимо направленное движение материала, которое можно осуществить при помощи лопаток. Форму лопаток можно характеризовать углом β , с которым лопатка подходит к краю диска. Это угол между касательной к лопасти и продолжением переносной скорости на выходе из рабочего колеса.

Возможны 3 варианта расположения лопаток: загнутые назад (рис. 2а), радиальные (рис. 2б) и загнутые вперед (рис. 2в).

Вариант с загнутыми вперед лопатками за счет максимального угла β позволяет достичь наибольшую абсолютную скорость и обеспечить удар материала о деку близкий к лобовому.

Рассмотрим движение одной зерновки по горизонтально расположенному диску, с направляющими лопатками, изогнутыми против направления вращения.

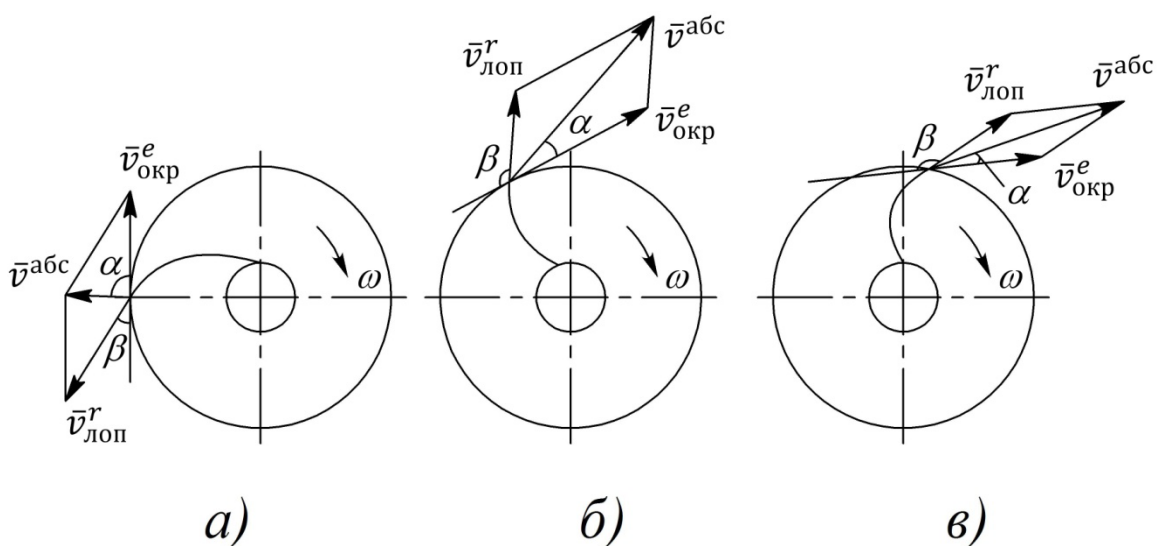


Рис. 2. Варианты расположения лопаток

Зададим две системы координат (рис. 3): неподвижную $OXYZ$, в которой найдем направление скорости полета зерновки, сошедшей с диска, и подвижную $OXYZ$ для определения скорости движения частицы вдоль лопатки.

По теореме о сложении скоростей найдем абсолютную скорость \vec{v}^{abc} , определяющую направление полета зерновки к деке дробилки, из рисунка 2 получим

$$\vec{v}^{abc} = \vec{v}_{окр}^e + \vec{v}_{лоп}^r \quad (1)$$

где $\vec{v}_{лоп}^r$ – относительная скорость;

$\vec{v}_{окр}^e$ – переносная скорость.

Задачей исследования является выяснение величины α угла между направлением вектора \vec{v}^{abc} и касательной к окружности диска. Он зависит от размеров сторон параллелограмма скоростей (рис. 2). Одна сторона равна переносной скорости:

$$v_{окр}^e = \omega \cdot r, \quad (2)$$

где ω – угловая скорость диска;

r – радиус диска.

Теперь найдем относительную скорость, дающую вторую сторону параллелограмма скоростей.

Составим дифференциальные уравнения относительного движения, принимая зерновку в виде частицы шарообразной формы, имеющей массу m .

Приложим на рисунке 3а силы, задающие движение: активные, реактивные и силы инерции.

$$m\vec{a}_r = \vec{\Phi}_e^u + \vec{\Phi}_{кор}^u + \vec{N}_1 + \vec{N}_2 + \vec{G} + \vec{F}_{тр} + \vec{F}_{сопр}, \quad (3)$$

где $\vec{\Phi}_e^u$ – переносная сила инерции;

$\vec{\Phi}_{кор}^u$ – кориолисова сила инерции;

\vec{N}_1 – реакция вертикальной стенки лопатки, возникающая от силы Кориолиса;

\vec{N}_2 – реакция горизонтальной плоскости диска, возникающая от силы тяжести зерновки;

\vec{G} – сила тяжести зерновки;

$\vec{F}_{тр}$ – сила трения зерновки о лопатку и диск;

$\vec{F}_{сопр}$ – сила сопротивления движению окружающей зерновку среды.

В свою очередь запишем то, чему равны силы, входящие в уравнение 3:

$$\vec{\Phi}_e^u = m \cdot \omega^2 \cdot \rho, \quad (4)$$

где m – масса зерновки,

ω – угловая скорость диска,

ρ – расстояние от частицы до оси вращения диска, $\rho = f_{лоп}(x)$, где x – координата в подвижной системе; $f_{лоп}$ – функция, определяющая геометрию лопатки:

$$\vec{\Phi}_{кор}^u = 2 \cdot m \cdot v_{лоп}^r \cdot \sin\theta, \quad (5)$$

где θ – угол между векторами угловой скорости диска $\vec{\omega}$ и относительной скорости частицы $\vec{v}_{лоп}^r$, для случая вращения диска в плоскости перпендикулярной оси Z , $\theta = 90^\circ$ и $\sin\theta = 1$.

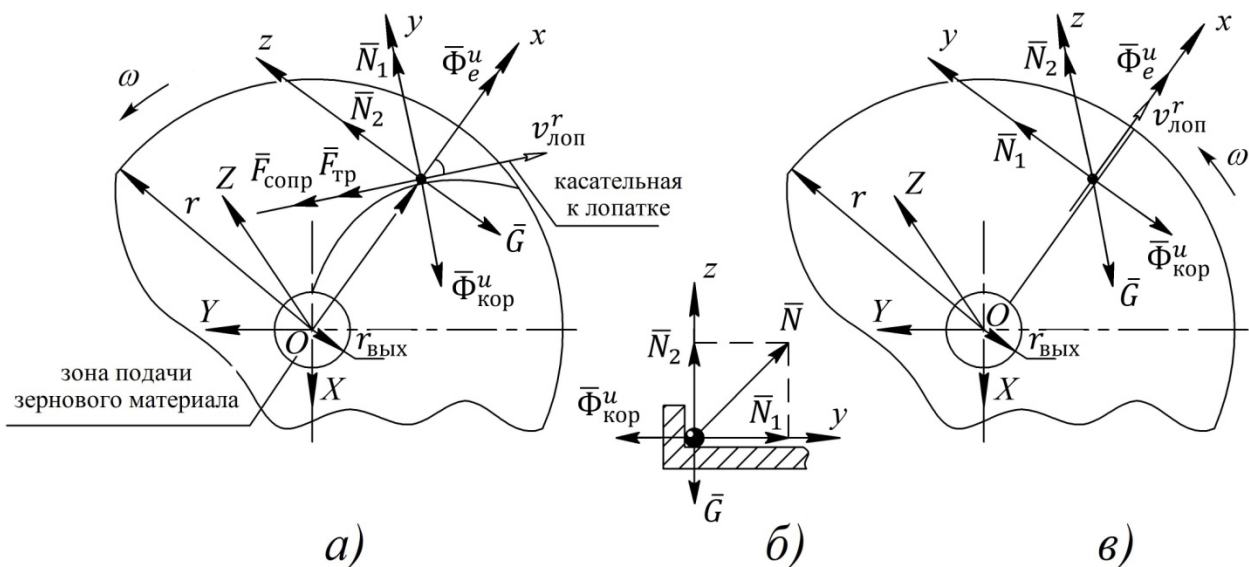


Рис. 3. Расположение сил, действующих на зерновку при движении по лопатке разгонного диска

$$\bar{G} = m \cdot g, \quad (5)$$

где g – ускорение свободного падения.

$$\bar{F}_{\text{тр}} = f \sqrt{N_1^2 + N_2^2}, \quad (6)$$

где f – коэффициент трения скольжения зерна о сталь.

Корень квадратный представляет суммарную силу реакций плоскостей опоры (рис. 3а):

$$\bar{F}_{\text{сопр}} = i \cdot \rho_{\text{возд}} \cdot v_{\text{лоп}}^2, \quad (7)$$

где i – безразмерный коэффициент обтекаемости воздухом, зависящий от формы тела и площади поперечной проекции;

$\rho_{\text{возд}}$ – плотность воздуха.

Относительную скорость найдем из уравнения 3, для этого спроецируем его на подвижные оси $oxyz$, силами сопротивления пренебрежем (рис. 3в).

Примем начальные условия такие, что зерновка начинает движение по лопатке с нулевой относительной (линейной, горизонтальной) скоростью и начальным положением, отстоящим от оси вращения диска на 20 мм, что обусловлено выходным радиусом подачи зернового материала:

$$\begin{cases} x_0 = 0,02 \text{ м} - \text{начальное положение} \\ \dot{x}_0 = 0 - \text{начальная скорость} \end{cases} \quad (8)$$

Тогда уравнения относительного движения получат вид

$$\begin{cases} m\ddot{x} = \Phi_x^u \\ m\ddot{y} = N_1 - \Phi_{\text{кор}}^u \\ m\ddot{z} = N_2 - G \end{cases} \quad (9)$$

Первое уравнение в этой системе описывает движение зерновки вдоль лопатки от центра к периферии диска. Решим его, чтобы получить уравнение изменения скорости и перемещения в зависимости от времени.

$$m\ddot{x} = mx\omega^2 \Rightarrow \ddot{x} = x\omega^2 \Rightarrow \ddot{x} - x\omega^2 = 0.$$

Общее решение уравнения

$$x = c_1 e^{kt} + c_2 e^{-kt}, \quad (10)$$

где k – коэффициент, представляющий угловую скорость, $k = \omega$.

Используя начальные условия движения зерновки (8), найдем постоянные интегрирования.

$$\begin{cases} x_0 = c_1 + c_2 = 0,02 \\ \dot{x}_0 = k(c_1 - c_2) = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} c_2 = 0,04 \\ c_1 = -0,02 \end{cases}$$

Частное решение при этом получит вид уравнения, характеризующего относительное перемещение зерновки:

$$x = -0,02 e^{\omega t} + 0,04 e^{-\omega t}. \quad (11)$$

Уравнение, характеризующее относительную скорость зерновки:

$$\dot{x} = \omega(-0,02 e^{\omega t} + 0,04 e^{-\omega t}). \quad (12)$$

Силу давления лопатки на зерновку найдем из второго и третьего уравнений системы (9). Поскольку в направлении осей y и z нет перемещения, то скорость и ускорение в этих направлениях тоже равны нулю:

$$\begin{cases} y = 0 \\ z = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{y} = 0 \\ \dot{z} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \ddot{y} = 0 \\ \ddot{z} = 0 \end{cases}$$

Имеем уравнения баланса сил

$$\begin{aligned} N_1 &= \Phi_{\text{кор}}^u = 2 \cdot m \cdot v_{\text{лоп}}^2 = \\ &= 2 \cdot m \cdot \omega(-0,02 e^{\omega t} + 0,04 e^{-\omega t}); \end{aligned} \quad (13)$$

$$N_2 = G = m \cdot g; \quad (12)$$

$$\sum N = \sqrt{N_1^2 + N_2^2} =$$

$$\sqrt{(2m\omega(0,04e^{-\omega t} - 0,02e^{\omega t}))^2 + (mg)^2}. \quad (14)$$

На рисунке 3б показано направление силы давления, модуль которой определяется выражением (14).

Теперь, зная силы давления прямолинейной лопатки, расположенной радиально, на зерновку и значения переносной и относительной скоростей, перпендикулярных друг другу, из выражения (1), учитывая (2) и (12), найдем величину полной скорости зерновки в момент отрыва от поверхности диска при сходе с лопатки:

$$v^{\text{абс}} = \sqrt{(\omega r)^2 + (\omega(0,04e^{-\omega t} - 0,02e^{\omega t}))^2}.$$

Геометрия лопатки определяет значение относительной скорости и значение начального угла α , задающего траекторию движения зерновки от диска к деке. Как видно из уравнения (15), основные значения оказывают угловая скорость и радиус диска. Если первый параметр значительно влияет на энергоёмкость, то второй, а именно радиус диска, необходимо принимать максимально возможным, но при этом не влияя на снижение пропускной способности дробилки между диском и декой.

Выводы

Использование разгонного диска с лопастями позволит сориентировать частицы зерновых компонентов по определенной траектории при движении по диску для получения максимальной эффективности при ударе о деку, а именно угол атаки и абсолютную скорость. Представленные теоретические зависимости позволяют определить численные значения скорости и угла полета частицы, что повлияет на расстояние до деки и положение ударной плоскости по отношению к летящей зерновке. Основное влияние на абсолютную скорость частицы при сходе с диска с прямолинейными радиальными лопатками оказывают угловая скорость и его радиус.

Библиографический список

1. Мельников С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. – Л.: Колос, 1978. – 560 с.
2. Федоренко И.Я. Технологические процессы и оборудование для приготовления кормов. – М.: Форум, 2015. – 176 с.
3. Желтунов М.Г., Садовая В.А. Дробилки с вертикальными валами для измельчения концентрированных кормов // Сельхозтехника, сельхозпереработка. – 2005. – № 1. – С. 12-13.
4. Перепелица С.В. Исследование процессов, влияющих на скорость подачи измельчаемых сыпучих тел // Ползуновский альманах. – 2004. – № 1. – С. 159-166.
5. Устройство для измельчения сыпучих материалов: пат. 2513750 Российская Федерация: МПК В 02 С25/00 / Федоренко И.Я., Садов В.В., Дорохова Н.Д.; патентообладатель Садов В.В. – № 2012157582/13; заявл. 26.12.2012; опубл. 20.04.2014, Бюл. № 11.
6. Садов В.В., Садовая В.А. Обоснование параметров разгонного диска на дробилках с вертикальными валами // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2009. – № 1 (51). – С. 43-46.

7. Федоренко И.Я., Садов В.В. Особенности решения многокритериальных агроинженерных задач при трех критериях оптимальности // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2012. – № 5 (91). – С. 110-114.

References

1. Melnikov S.V. Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya zhivotnovodcheskikh ferm. – L.: Kolos, 1978. – 560 s.
2. Fedorenko I.Ya. Tekhnologicheskie protsessy i oborudovanie dlya prigotovleniya kormov. – M.: Forum, 2015. – 176 s.
3. Zheltunov M.G., Sadovaya V.A. Drobilki s vertikalnymi valami dlya izmelcheniya kontsentrirvannykh kormov // Selkhoztehnika, selkhozpererabotka. – 2005. – No. 1. – S. 12-13.
4. Perepelitsa S.V. Issledovanie protsessov, vliyayushchikh na skorost podachi izmelchaemykh sypuchikh tel // Polzunovskiy almanakh. – 2004. – No. 1. – S. 159-166.
5. Patent 2513750 Ustroystvo dlya izmelcheniya sypuchikh materialov. Rossiyskaya Federatsiya MPK B 02 C25/00 Fedorenko I.Ya., Sadov V.V., Dorokhova N.D. Patentoobladatel Sadov V.V. – No. 2012157582/13; zayav. 26.12.2012; opubl. 20.04.2014. Byul. No. 11.
6. Sadov V.V., Sadovaya V.A. Obosnovanie parametrov razgonnogo diska na drobilkakh s vertikalnymi valami // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2009. – No. 1 (51). – S. 43-46.
7. Fedorenko I.Ya., Sadov V.V. Osobennosti resheniya mnogokriterialnykh agroinzhenernykh zadach pri trekh kriteriyakh optimalnosti // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2012. – No. 5 (91). – S. 110-114.

