

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ



УДК 631.363.2

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

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ОБОСНОВАНИЯ РАЗРУШЕНИЯ ЗЕРНОВОГО МАТЕРИАЛА РАЗГОННЫМ ДИСКОМ В МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКЕ

THEORETICAL BACKGROUND OF SUBSTANTIATION OF GRAIN MATERIAL GRINDING BY ACCELERATING DISC IN A HAMMER MILL

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

Повышение эффективности измельчения зернового материала в молотковых дробилках производится с целью снижения энергоемкости процесса и получения выровненного гранулометрического состава. Для этой цели предложено первоначальное воздействие на зерновой материал производить с помощью разгона вращающимся диском и дальнейшим ударом о неподвижную поверхность (деку). Данный способ позволит при ударе создать концентратор напряжений, что приведет к хрупкому разрушению частицы. Для направленного движения частиц с наибольшей скоростью возможно только при помощи лопаток. Рассматривая схему сил, действующих на частицу, при движении по диску с лопатками, получили математическую модель движения зерновки по разгонному диску с учетом сил вязкого сопротивления воздушной среды и сил трения о материал диска. Исходя из существующих параметров молотковой дробилки, был произведен расчет основных кинематических параметров процесса. Расчет по полученной модели в Mathcad показал, что оптимальным является радиальное расположение лопатки, что свидетельствует о максимальной абсолютной скорости частицы.

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

The efficiency of grain material grinding in hammer mills is improved in order to reduce the energy intensity of the process and to obtain even grain size distribution. For this purpose, it was proposed to make an initial impact on the grain material by means of acceleration by a rotating disk and further impact against a fixed surface (deck). This method will allow creating a stress concentrator at impact which will lead to brittle fracture of a particle. Directional movement of particles and closest to a frontal impact of particles with the highest speed is possible only with the aid of blades. Considering the scheme of forces acting on a particle when it moves along a disk with blades, we obtained a mathematical model of the movement of a kernel over the accelerating disc taking into account the forces of viscous resistance of the air medium and the forces of friction against the material of the disc. Based on the existing parameters of the hammer mill, the calculation of the main kinematic parameters of the process was made. The calculation of the model obtained in Mathcad showed that the radial arrangement of the blade is optimal which indicates the maximum absolute velocity of a particle.

Садов Виктор Викторович, д.т.н., доцент, и.о. зав. 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., Acting Head, 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

Для процесса измельчения зерновых материалов хорошо зарекомендовали себя молотковые дробилки с вертикальным валом ротора за счет своей простоты конструкции, надежности и невысокой удельной энергоемкости [1]. Особенность конструкций таких молотковых дробилок и принцип действия технологического процесса определяет резервы повышения эффективности измельчения.

Цель исследования – определение возможности разрушения зернового материала разгонным диском в молотковой дробилке.

Объекты и методы исследований

Для снижения многократного ударного воздействия на частицу и, соответственно, уменьшения времени контакта зернового материала с рабочими органами в молотковой дробилке с вертикальным валом необходимо использовать дополнительные способы разрушения (рис. 1). Одним из возможных способов измельчения является удар зернового материала о неподвижную поверхность [2, 3].

В этом случае диск с радиальными лопатками, расположенный сверху ротора, позволяет повы-

сить эффективность разрушения частиц (образование трещин в материале) [4, 5]. Только не ясно, какая скорость будет у частиц, сошедших с диска? Сможет ли эта скорость привести к разрушению материала? Кроме того, необходимо принимать во внимание вид разрушения зерновых материалов – хрупкое, сдвигом и др. [6].

С увеличением диаметра диска абсолютная скорость схода зерновки и эффективность разрушения будут увеличиваться. Для предотвращения увеличения габаритов рассмотрим вариант, когда диаметр диска не превышает диаметр ротора.

При движении частицы по диску на нее действуют следующие силы (рис. 2).

Движение зерновки по разгонному диску является сложным. Оно складывается из двух движений: первое – вращательное вместе с диском и второе – перемещение по поверхности диска. Результирующая, суммирующаяся скорость вылета зерновки с диска определяется направлением двух векторов, записанных в уравнении (1).

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

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

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

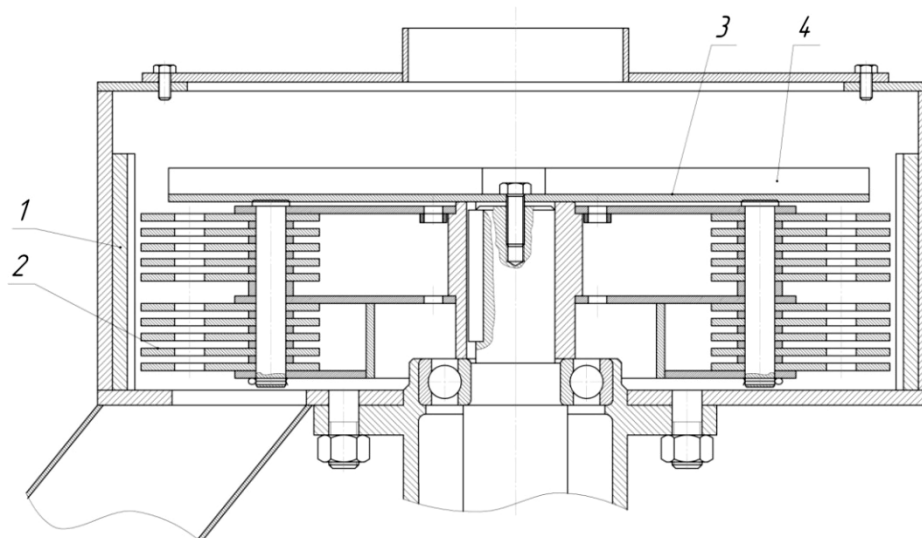


Рис. 1. Расположение разгонного диска в дробилке с вертикальным валом:
1 – дека; 2 – молоток; 3 – разгонный диск; 4 – лопатка

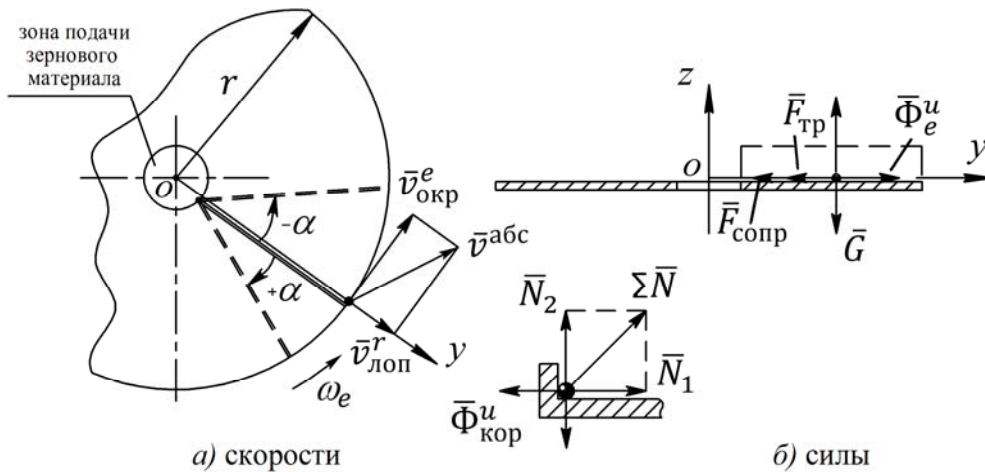


Рис. 2. Силовые и кинематические характеристики движения зерновки по диску

Важно найти направление и величину \vec{v}^{abc} , а именно скорости покидания зерновкой диска, а также параметры, влияющие на неё. Эти данные позволят сделать анализ и управлять процессом разрушения зерновки при её ударе о деку, где первостепенное влияние оказывают угол удара о плоскость деки и скорость частицы.

Если с переносной скоростью все ясно, то её движение задает вращение разгонного диска. Вектор направлен по касательной к радиусу диска в сторону угловой скорости (рис 2а), а величина равна

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

где ω - угловая скорость разгонного диска, рад/с;
 R - радиус диска, м.

Относительное движение зерновки, радиально по диску, зависит от формы и угла наклона лопаток на диске, силы трения скольжения, силы сопротивления воздушной среды, угловой скорости диска, диаметра диска, начального положения и начальной скорости движения.

Рассмотрим движение зерновки по лопатке диска, где лопатка имеет возможность поворота относительно точки O_1 крепления к диску. Положение лопатки может фиксироваться с заданным углом α как в положительном направлении в сторону угловой скорости, так и в отрицательном (рис. 2а).

Запишем для зерновки дифференциальное уравнение относительного движения несвободной точки в координатной форме. Принимаем за подвижную систему отсчета оси $oxuz$.

Прикладываем активные, реактивные, инерциальные силы к зерновке на рисунке 2б.

Переносная сила инерции является основной движущей силой в радиальном направлении

$$\bar{\Phi}_e^u = m \cdot \omega^2 \cdot R, \quad (3)$$

где m – масса зерновки, кг;

ω – угловая скорость диска, $\omega=3000$ об/мин.;

R – расстояние от частицы до оси вращения диска, $R=0,2$ м.

Кориолисова сила инерции прижимает зерновку к лопатке и зависит от изменения относительной скорости в переносном движении и изменения переносной скорости в относительном движении

$$\bar{\Phi}_{кор}^u = 2 \cdot m \cdot v_{лоп}^r \cdot \sin\theta, \quad (4)$$

где θ – угол между плоскостью диска и относительной скоростью зерновки, для нашего случая $\theta = 90^0$. Зерновка движется в плоскости вращения диска.

Сила тяжести зерновки

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

где g – ускорение свободного падения.

Сила трения зерновки о лопатку и диск

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

где f - коэффициент трения скольжения зерна о сталь, 0,3...0,6;

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

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

Составляющую \bar{N}_1 в задаче исключим, поскольку рассматриваем установившийся режим работы дробилки ($\omega=const$), при котором нет значительного взаимного изменения переносной и относительной скоростей.

Сила сопротивления воздушной среды движению зерновки пропорциональна квадрату её скорости

$$\bar{F}_{сопр} = k \cdot (v_{лоп}^r)^2, \quad (7)$$

где k – коэффициент сопротивления, зависящий от формы тела и площади поперечной проекции, плотности среды.

$$k = 0,5 \cdot c \cdot A \cdot \rho_{\text{возд}}, \quad (8)$$

где c – безразмерный коэффициент обтекаемости воздухом, зависящий от формы тела. Принимаем зерновку за шаровидное тело, $c=0,4$;

A – площадь поперечной проекции зерновки,
 $A = \pi \frac{d^2}{4} \text{ м}^2$;

d – эквивалентный диаметр зерновки, $d=0,003 \text{ м}$;

$\rho_{\text{возд}}$ – плотность воздуха, $\rho_{\text{возд}}=1,220 \text{ кг/м}^3$.

Сформируем уравнение движения в проекции на ось y , идущей вдоль лопатки, расположенной радиально на диске

$$m\ddot{y} = \bar{\Phi}_g^u - \bar{F}_{\text{тр}}(y) - \bar{F}_{\text{центр}}(y). \quad (9)$$

Запишем его же для случая отклонения лопатки от радиального положения, здесь ось y (подвижная ось координат) совпадает с осью лопатки, а переносная центробежная сила инерции остается направленной радиально от центра, её заменим проекцией, вводя угол наклона лопатки α (рис. 2а)

$$m\ddot{y} - \bar{\Phi}_g^u \cos \alpha + \bar{F}_{\text{тр}} + \bar{F}_{\text{центр}} = 0; \quad (10)$$

$$m \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} - m \cdot \omega^2 \cdot y \cdot \cos \alpha + f \cdot N_2 + k \cdot \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 = 0. \quad (11)$$

Решим данное уравнение в Mathcad. На рисунке 3 приведен листинг программы для случая радиального расположения лопатки с углом $\alpha=0$.

```
f := 0.35  m := 40 / 1000000  g := 9.81  omega := 314  c := 0.4  A := pi * d^2 / 4  rho := 1.220  d := 0.003
t0 := 0  t1 := 2  N2 := m * g  r0 := 0.02  alpha := 0  k := 0.5 * c * A * rho
k := 0.00000172386
```

Given

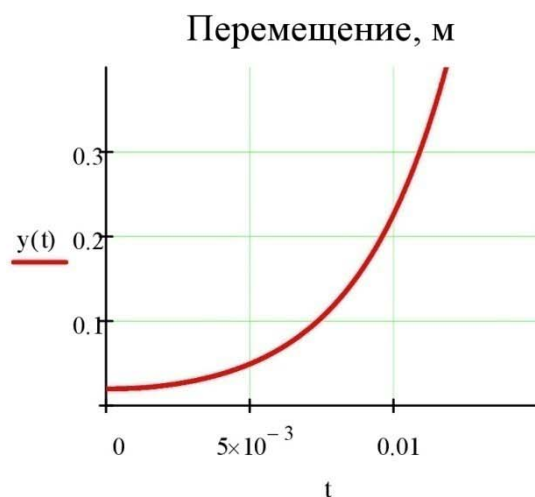
$$m \cdot \frac{d^2}{dt^2} y(t) - m \cdot \omega^2 \cdot y(t) \cdot \cos(\alpha) + f \cdot N_2 + k \cdot \left(\frac{d}{dt} y(t)\right)^2 = 0$$

$$y'(0) = 0$$

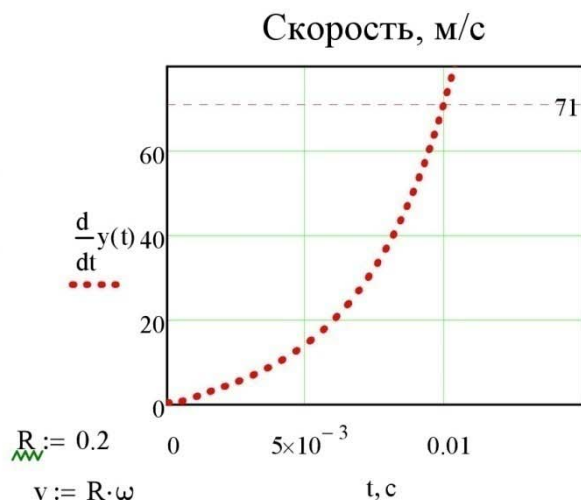
Начальная скорость и перемещение

$$y(0) = 0.02$$

$y := \text{Odesolve}(t, 1)$ время от t до 1 сек



$y(0.00957) = 0.202$
 за 0,00955 сек точки пройдет 20 см



```
R := 0.2
v := R * omega
v = 62.8  окр скор  vr := 71  отн. скор
Vabc := sqrt(v^2 + vr^2)  Vabc = 94.788  м/с
```

Рис. 3. Листинг Mathcad подсчета перемещения и скорости зерновой частицы по диску при радиально расположенной лопатке

Результаты исследования

Получили частное решение уравнения с начальными условиями. Зерновка начинает движение по лопатке с нулевой относительной скоростью и начальным положением, на 20 мм отстоящим от оси вращения диска, что обусловлено радиусом подачи зернового материала.

Начальные условия:

$$\begin{cases} x_0 = 0,02 \text{ м} \\ \dot{x}_0 = 0 \end{cases} \quad (12)$$

Алгоритм, записанный в среде Mathcad, позволяет проанализировать влияние всех входящих в уравнение значений и построить соответствующие графики.

На рисунке 3 представлен график перемещения $y(t)$ зерновки по лопатке в зависимости от времени t . Видно, что зерновка начиная движение в 20 мм от оси вращения пройдет за 0,00995 с ($\approx 0,1$ с) расстояние 202 мм, соответствующее внешнему радиусу разгонного диска $R=0,2$ м. Обратим внимание на характер кривой. Скорость растет нелинейно.

На графике справа (рис. 3) показана зависимость изменения скорости (в м/с) от времени $\frac{d}{dt}y(t)$ в сек для момента времени $t=0,00995$ сек. В момент отрыва зерновки от диска её относительная скорость равна 71 м/с и направлена радиально от центра вращения. При 3000 об/мин., или 314 рад/с, и радиусе диска $R=0,2$ м переносная скорость равна 62,8 м/с. Тогда абсолютная скорость зерновки согласно уравнению 1 равна 94,788 м/с. В случае разрушения частиц и предотвращения их переизмельчения молотками возможно применение просеивания продуктов размола [7].

$v, \text{ м/с}$

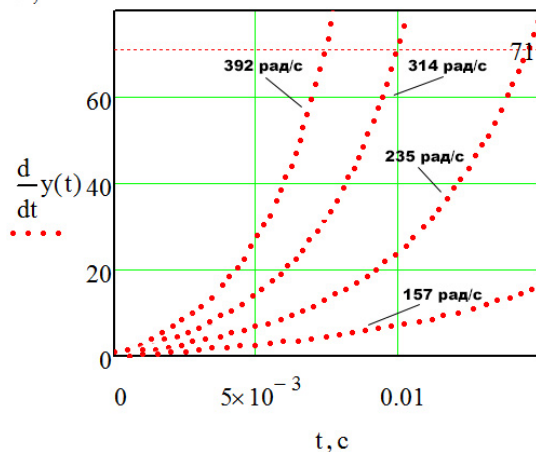


Рис. 4. Зависимость относительной скорости частицы от времени при различных угловых скоростях диска

Приведем зависимости некоторых параметров, представляющих для нас наибольший интерес.

Для значений угловой скорости диска: 157, 235, 314 (3000 об/мин.), 392 с⁻¹ построим график зависимости относительной скорости от времени. Для рассматриваемой дробилки зерновка покидает разгонный диск через 0,01 с. Из рисунка 3 видно, с какой линейной скоростью частица движется при различных угловых скоростях.

При изменении угла лопатки от радиального положения относительная скорость зерновки будет изменяться в меньшую сторону, что не допустимо (рис. 5).

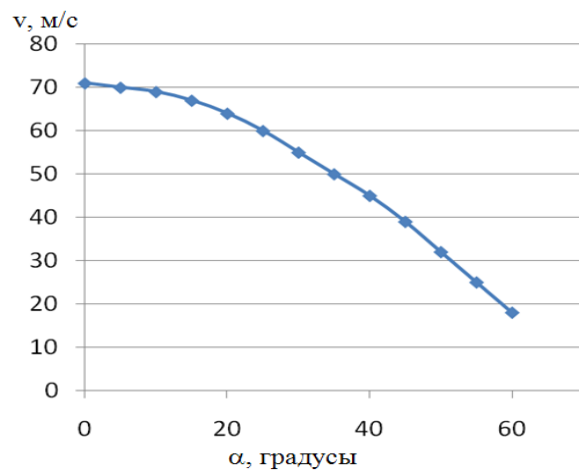


Рис. 5. Зависимость относительной скорости зерновки от углового смещения лопатки от радиального положения

Выводы

1. Полученная математическую модель движения зерновки по разгонному диску с учетом сил вязкого сопротивления воздушной среды и сил трения о материал диска позволяет определить численные значения параметров движения. Лопатки на диске целесообразнее располагать радиально, что позволяет иметь максимальную абсолютную скорость частицы при сходе с диска.

2. В момент отрыва зерновки от диска при радиусе $R=0,2$ м и угловой скорости 314 рад/с скорость частицы равна 71 м/с и направлена радиально вдоль лопатки от центра вращения. При переносной скорости в данный момент 62,8 м/с абсолютная скорость зерновки будет равна 94,788 м/с. Данная величина скорости повлияет на процесс полного разрушения (или образования трещин в зависимости от измельчаемого материала) и позволит снизить ударное воздействие молотков.

Библиографический список

1. Пат. 2513750 Российская Федерация, МПК В 02 С25/00. Устройство для измельчения сыпучих материалов / 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.
2. Мельников С.В. Экспериментальные основы теории процесса измельчения кормов на фермах молотковыми дробилками: автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Л., 1969.
3. Гийо Р. Проблема измельчения материалов и ее развитие. – М., 1964.
4. 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.
5. Садов В.В., Сорокин С.А. Повышение эффективности молотковой дробилки с вертикальным валом при измельчении зерновых компонентов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2018. – № 11 (169). – С. 86-92.
6. Партон В.З., Борисковский В.Г. Динамика хрупкого разрушения. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
7. Федоренко И.Я., Шагдыров И.Б., Садов В.В. Теоретические основы оптимизации гранулометрического состава дерти, образуемой при измельчении фуражного зерна // Ползуновский вестник. – 2012. – № 2-2. – С. 229-233.

References

1. Patent 2513750 Rossiyskaya Federatsiya MPK B 02 C25/00. Ustroystvo dlya izmelcheniya sypuchikh materialov / I.Ya. Fedorenko, V.V. Sadov, N.D. Dorokhova; patentoobladatel Sadov V.V. – No. 2012157582/13; zayav. 26.12.2012; opubl. 20.04.2014. Byul. No. 11.
2. Melnikov S.V. Eksperimentalnye osnovy teorii protsessa izmelcheniya kormov na fermakh molotkovymi drobilkami: avtoref. dis. ... d.t.n. – L., 1969.
3. Giyo R. Problema izmelcheniya materialov i ee razvitie. – M., 1964.
4. 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.
5. Sadov V.V., Sorokin S.A. Povyshenie effektivnosti molotkovoy drobilki s vertikalnym valom pri izmelchenii zernovykh komponentov // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2018. – No. 11 (169). – S. 86-92.
6. Parton, V.Z. Dinamika khрупкого razrusheniya / V.Z. Parton, V.G. Boriskovskiy. – M.: Mashinostroenie, 1988. – 240 s.
7. Fedorenko, I.Ya. Teoreticheskie osnovy optimizatsii granulometricheskogo sostava derti, obrazuемой pri izmelchenii furazhnogo zerna / I.Ya. Fedorenko, I.B. Shagdyrov, V.V. Sadov // Polzunovskiy vestnik. – 2012. – No. 2-2. – S. 229-233.



УДК 664.73:658.27

С.Ю. Бузоверов
S.Yu. Buzoverov

**РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА
ДЛЯ УВЛАЖНЕНИЯ И ОТВОЛАЖИВАНИЯ ЗЕРНА ПШЕНИЦЫ**
DEVELOPMENT OF A DEVICE FOR WHEAT DAMPING AND TEMPERING

Ключевые слова: агропромышленный комплекс, мукомольная промышленность, мельница, экспериментальная установка, увлажнение, гидротермическая обработка зерна, отволаживание, бункер.

Keywords: agricultural industry complex, flour-milling industry, mill, experimental equipment, damping, grain hydrothermal treatment, tempering, bin.