

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 631.363.21

И.Я. Федоренко, Н.Ф. Карпов, А.М. Левин
I.Ya. Fedorenko, N.F. Karpov, A.M. Levin

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОДНОКРАТНОГО УДАРА ПО СЛОЮ ЗЕРНА ПРИ ЕГО ИЗМЕЛЬЧЕНИИ

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF A SINGLE IMPACT ON THE GRAIN LAYER DURING ITS GRINDING

Ключевые слова: кормовое зерно, механический удар, измельчение, эффективность процесса, факторы математической модели, оптимизация.

Практически во всех работах, посвященных измельчению кормового зерна, рассматривается динамическое взаимодействие с рабочим органом всего лишь одной зерновки (частицы). Между тем и в молотковых, и в ударно-центробежных дробилках рабочие органы соударяются со слоем зерновок. При этом динамическое воздействие испытывают не только зерновки, непосредственно контактирующие с рабочим органом, но и зерновки, получающие ударные импульсы от соседних зерновок. Поэтому правильнее рассматривать воздействие рабочего органа не на одну, а на совокупность (слой) частиц. Цель работы – повышение эффективности процесса измельчения кормового зерна в слое на основе экспериментального определения рациональных параметров ударного воздействия. Установлено, что при ударе по стесненному слою зернового материала эффективность использования подведенной энергии составляет величину 0,96-0,99. Это существенно выше, чем при ударе влет в молотковых дробилках, где этот показатель составляет 0,84-0,91. Для достижения наибольшего эффекта разрушения зерна необходимо, чтобы толщина слоя составляла один размер зерна, скорость удара была по возможности минимальной, а энергия удара, наоборот, максимальной. Полученные данные могут быть использованы при

разработке вибрационных измельчителей кормового зерна.

Keywords: feeding grain, mechanical impact, grinding, process efficiency, mathematical model factors, optimization.

Practically in all works dealing with feeding grain grinding, the dynamic interaction with the working tool of just one kernel (particle) is considered. Meanwhile, both in hammer and impact-centrifugal grinders, the working tools collide with a layer of kernels. At the same time, not only the kernels directly contacting the working tool, but also the kernels receiving shock impulses from neighboring kernels are under a dynamic effect. Therefore, it is more correct to consider the effect of the working tool not on one, but on an aggregate (layer) of particles. The research goal was to increase the efficiency of the process of feeding grain grinding in the layer based on the experimental determination of rational parameters of the impact effect. It was found that when striking a constrained layer of grain material, the efficiency of using the supplied energy made 0.96...0.99. This is significantly higher than in the case of in-flight impact in hammer grinders where this figure is 0.84...0.91. To achieve the greatest effect of grain destruction, it is necessary that the layer thickness is one grain size, the impact speed is as low as possible, and the impact energy, on the contrary, is the maximum. The data obtained may be used in the development of vibratory grinders for feeding grain.

Федоренко Иван Ярославович, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, e-mail: ijfedorenko@mail.ru.

Карпов Николай Федорович, к.т.н., ст. преподаватель, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: karpovnik22@yandex.ru.

Fedorenko Ivan Yaroslavovich, Dr. Tech. Sci., Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: ijfedorenko@mail.ru.

Karpov Nikolay Fedorovich, Cand. Tech. Sci., Asst. Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: karpovnik22@yandex.ru.

Левин Алексей Михайлович, к.т.н., ген. директор ООО «Сибирская технологическая компания», г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: Lev-alex@mail.ru.

Levin Aleksey Mikhaylovich, Cand. Tech. Sci., General Director, ООО "Sibirskaya tekhnologicheskaya kompaniya", Barnaul, Russian Federation, e-mail: Lev-alex@mail.ru.

Введение

Практически во всех работах, посвященных измельчению кормового зерна, рассматривается динамическое взаимодействие с рабочим органом всего лишь одной зерновки (частицы). Между тем и в молотковых, и в ударно-центробежных дробилках рабочие органы соударяются со слоем зерновок. При этом динамическое воздействие испытывают не только зерновки, непосредственно контактирующие с рабочим органом, но и зерновки, получающие ударные импульсы от соседних зерновок. Поэтому правильнее рассматривать воздействие рабочего органа не на одну, а на совокупность (слой) частиц.

Простейшим представлением измельчения кормового зерна в слое является схема, приведенная на рисунке 1.

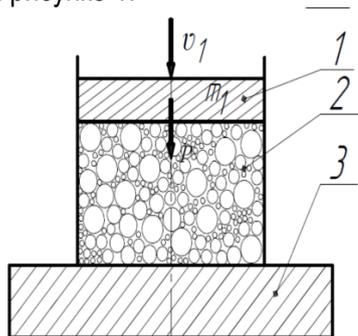


Рис. 1. Стесненный слой, подвергнутый воздействию ударной силы P :
 1 – штемпель (ударник);
 2 – слой кормового зерна;
 3 – массивное основание

Эта схема близка по картине деформационного состояния слоя зерна к работе ударно-вибрационных дробилок и может дать некоторые ответы на взаимодействие рабочих органов и слоя зерна в других типах дробилок.

Если ударник 1 (рис. 1) начинает деформировать слой, имея скорость v_1 , то развиваемую силу воздействия на слой зерна можно оценить по формуле

$$P = \frac{m_1 v_1}{\Delta t},$$

где m_1, v_1 – масса и скорость ударника;
 Δt – время удара.

Напряженно-деформированное состояние отдельных зерновок, находящихся в слое, характеризуется, по аналогии с зернистыми композитами [1], напряжениями σ^* и деформациями ε^* , определенными осреднением по объему соответствующих величин

$$\sigma^* = \frac{1}{V} \int_V \delta(x, y, z) dV; \quad (1)$$

$$\varepsilon^* = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon(x, y, z) dV, \quad (2)$$

где V – объем зерновки;

x, y, z – декартовы координаты.

Картина напряженно-деформированного состояния отдельных зерновок, находящихся в слое, может быть различной и зависит, в первую очередь, от условий их соприкосновения с «твердыми» поверхностями ударника и упора или «мягкими» поверхностями соседних зерновок.

Чтобы зерновка в слое разрушилась, необходимо, чтобы было выполнено одно из условий

$$\delta^* > [\delta]; \quad (3)$$

$$\varepsilon^* > [\varepsilon], \quad (4)$$

где $[\delta]$ и $[\varepsilon]$ – разрушающие значения напряжения и деформации.

Поле напряжений и поле деформаций в слое очень трудно рассчитать. Имеющиеся теоретические исследования по данному вопросу касаются динамического поведения всего слоя как макрообъема, и не дают ответа о динамических процессах, происходящих внутри слоя [2, 3]. Поэтому остается экспериментальный слой.

Цель работы – повышение эффективности процесса измельчения кормового зерна в слое на основе экспериментального определения рациональных параметров ударного воздействия.

Методы и аппаратура для исследований

Для проведения экспериментальных исследований была изготовлена специальная ударная установка (рис. 2). Направляющая ударника выполнена в виде трубы 4 с прорезанной в ней продольной щелью, в которой перемещается метка, нанесенная на ударник. Величину отскока h_2 ударника фиксировали как раз по перемещению метки при помощи скоростной киносъемки.

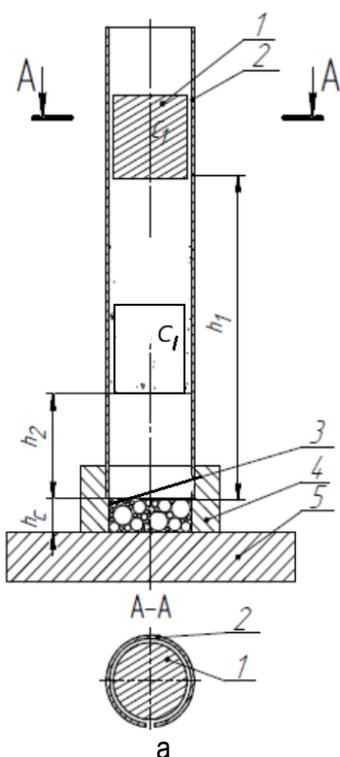


Рис. 2. Схема (а) и фото (б) установки для ударного разрушения слоя кормового зерна:
 1 – ударник; 2 – направляющая ударника;
 3 – слой кормового материала; 4 – обойма;
 5 – массивное основание

При ударе ударником массой m_1 , опускаемым с высоты h_1 с нулевой начальной скоростью, по слою кормового зерна массой m_2 имеем следующие закономерности:

1) запас потенциальной энергии Π_1 ударника в момент его опускания

$$\Pi_1 = m_1 g h_1, \quad (5)$$

где g – ускорение свободного падения;

h_1 – расстояние от нижнего обреза ударника до верхнего уровня зернового слоя (это же расстояние проходит центр тяжести ударника от момента его опускания и до касания кормового слоя);

2) скорость ударника в момент касания зернового слоя

$$v_1 = \sqrt{2gh_1}; \quad (6)$$

3) скорость ударника в момент обратного движения (отскока, возникающего за счет упругих свойств слоя)

$$v_2 = \sqrt{2gh_2}; \quad (7)$$

где h_2 – высота подскока ударника при обратном движении;

4) запас потенциальной энергии Π_2 ударника в верхней точке отскока

$$\Pi_2 = m_1 g h_2; \quad (8)$$

5) потерянная в слое энергия $\Delta\Pi$

$$\Delta\Pi = \Pi_1 - \Pi_2 = m_1 g (h_1 - h_2); \quad (9)$$

6) эффективность η однократного удара

$$\eta = \frac{\Delta\Pi}{\Pi_1} = \frac{\Pi_1 - \Pi_2}{\Pi_1} = 1 - \frac{\Pi_2}{\Pi_1} = 1 - \frac{h_2}{h_1}. \quad (10)$$

Чтобы наглядно представить процессы, происходящие в слое при ударе по нему, приведем реологическую модель зернового слоя (рис. 3).

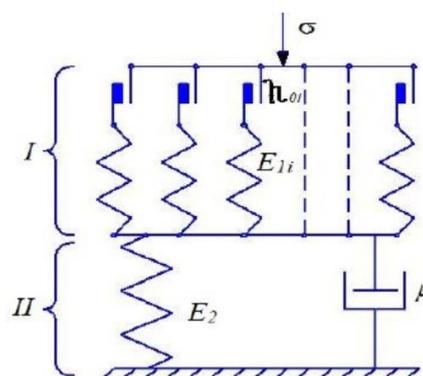


Рис. 3. Реологическая модель зернового слоя, отражающая его упругие и пластические свойства

Такая модель была предложена ранее для отражения упругих и пластических свойств единичной зерновки [2, 5]. Моделирование одной и той же моделью единичной зерновки и слоя таких зерновок отражает автомодельность обсуждаемых свойств.

В слое дополнительно какую-либо роль может играть воздух, защемленный в порах. Однако и его сжатие и его перекачки внутри слоя моделируются прежними элементами E_2 и μ .

Предлагаемая реологическая модель (рис. 3) содержит 2 блока. Второй блок отражает упругие и вязкие свойства слоя.

В блоке 1 представлен набор элементов типа сухого трения h_{0i} (т.н. обобщенное тело Сен-Венана), каждый из которых последовательно соединен со своим упругим элементом E_{1i} . Тело Сен-Венана, как известно, моделирует пластические свойства материала. Оно неподатливо при нагрузке ниже предела текучести, после его превышения неограниченно деформируется.

Обобщенное тело Сен-Венана моделирует, таким образом, разрушение составляющих слой отдельных зерновок в совокупности.

С учетом данных пояснений очевидно, что критерий эффективности (10) действительно может служить мерой разрушения (повреждаемости) частиц в слое. Чем больше η , тем эффективнее протекает процесс измельчения зерновок в слое.

В качестве факторов процесса измельчения кормового зерна однократным ударом по слою предлагаются следующие:

- 1) число монослоев n в слое (монослой – это слой толщиной в одну зерновку);
- 2) скорость удара v_1 , изменяемая в эксперименте величиной h_1 , формула (6);
- 3) энергия одиночного удара, изменяемая в эксперименте посредством m_1 , формула (8).

Реально существует функция f , имеющая вид $\eta = f(n, v_1, \Pi_1)$.

Параллельно влияние этих же факторов на процесс измельчения оценивали величиной повреждаемости зерна ξ

$$\xi = (m_{\square 2} / m_2) 100\%, \quad (11)$$

где $m_{\square 2}$ – количество поврежденных зерен (по массе) в слое после удара.

Величину ξ определяли при помощи ситового анализа.

С учетом применения планирования эксперимента проведем переобозначение величин: $\eta \sim y_1$; $\xi = y_2$; $n \sim x_1$; $v_1 \sim x_2$; $\Pi_1 \sim x_3$.

Тогда, например, для показателя y_1

$$y_1 = f(x_1, x_2, x_3).$$

Для оценки этой функции экспериментально ищем ее в виде полинома 2-й степени

$$y_1(x_i, b_i) = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^n b_{ij} x_i x_j, \quad (12)$$

где y_1 – критерий оптимальности;

x_1, x_2, \dots, x_n – переменные (факторы) процесса в количестве n ;

b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij} – коэффициенты, вычисленные на основе обработки экспериментальных данных.

Уровни и кодированные значения факторов приведены в таблице 1.

Для оценки данных коэффициентов по результатам экспериментов использовали план Бокса-Бенкена 2-го порядка для 3 факторов.

Материалом для исследования служил кормовой горох влажностью 12,9%, откалиброванный в размер $7 < d < 8$ мм.

Результаты исследований

План эксперимента, сгенерированный программой Mathcad 15, а также выходы модели y_1 и y_2 показаны в таблице 2.

Показатель эффективности y_1 оказался очень высоким – 0,96-0,99, что согласуется с теоретическими расчетами, приведенными в статье [3]. Полученные показатели y_1 позволяют утверждать, что практически вся энергия удара поглощается слоем зерна при его деформировании и разрушении. Часть энергии уходит на образование внутренних трещин в зернах гороха, которые не приводят к их разрушению.

Таблица 1

Уровни и кодированные значения факторов

Факторы	$A(x_1) \sim n$	$B(x_2) \sim v_1, \text{ м/с}$	$C(x_3) \sim \Pi_1, \text{ Дж}$
Нижний уровень ($X_i = -1$)	1	4,4	29
Основной уровень ($X_i = 0$)	3	5,2	58,5
Верхний уровень ($X_i = +1$)	5	6,0	88

Таблица 2

Матрица планирования Бокса-Бенкена для 3 факторов (A, B, C)

	0	1	2	3	4	y ₁	y ₂
0	«Run»	«Block»	«A»(x ₁)	«B»(x ₂)	«C»(x ₃)		
1	1	1	-1	-1	0	0,98	97,4
2	2	1	1	-1	0	0,96	60,2
3	3	1	-1	1	0	0,98	92,4
4	4	1	1	1	0	0,96	60,9
5	5	1	-1	0	-1	0,98	73,2
6	6	1	1	0	-1	0,96	56,9
7	7	1	-1	0	1	0,99	94,4
8	8	1	1	0	1	0,96	57,3
9	9	1	0	-1	-1	0,97	61,8
10	10	1	0	1	-1	0,98	59,5
11	11	1	0	-1	1	0,96	62,8
12	12	1	0	1	1	0,98	73,6
13	13	1	0	0	0	0,97	63,5
14	14	1	0	0	0	0,97	66,6
15	15	1	0	0	0	0,97	60,4

boxbehnken(3) =

В то же время показатель эффективности y_1 оказался совершенно неинформативным в плане построения уравнения регрессии. Для этих целей использовали второй показатель y_2 – показатель повреждаемости зерновок.

Использование встроенной функции **polyfitc** программы **Mathcad 15** позволило рассчитать коэффициенты регрессии и получить адекватное уравнение. В кодированных значениях переменных оно имеет вид

$$y_2(X_1, X_2) := 63.5 - 15.3 \cdot X_1 + 1.4 \cdot X_1 \cdot X_2 + 10.1 \cdot X_1^2 + 4.1 \cdot X_2^2$$

$$y_2 = 63,5 - 15,3X_1 + 4,6X_3 + 1,4X_1X_2 - 5,2X_1X_3 + 3,3X_2X_3 + 10,1X_1^2 + 4,1X_2^2 - 3,2X_3^2. \quad (13)$$

Визуализация этого уравнения приведена на рисунке 4, где видно, что зависимости носят нелинейный характер по всем 3 факторам. Численная оптимизация изучаемого процесса по максимуму повреждаемости зерна, проведенная при помощи функции **minimize** программы **Mathcad 15**, дает граничные значения факторов (рис. 5).

$$y_2(X_1, X_3) := 63.5 - 15.3 \cdot X_1 + 4.6 \cdot X_3 - 5.2 \cdot X_1 \cdot X_3 + 10.1 \cdot X_1^2 - 3.2 \cdot X_3^2$$

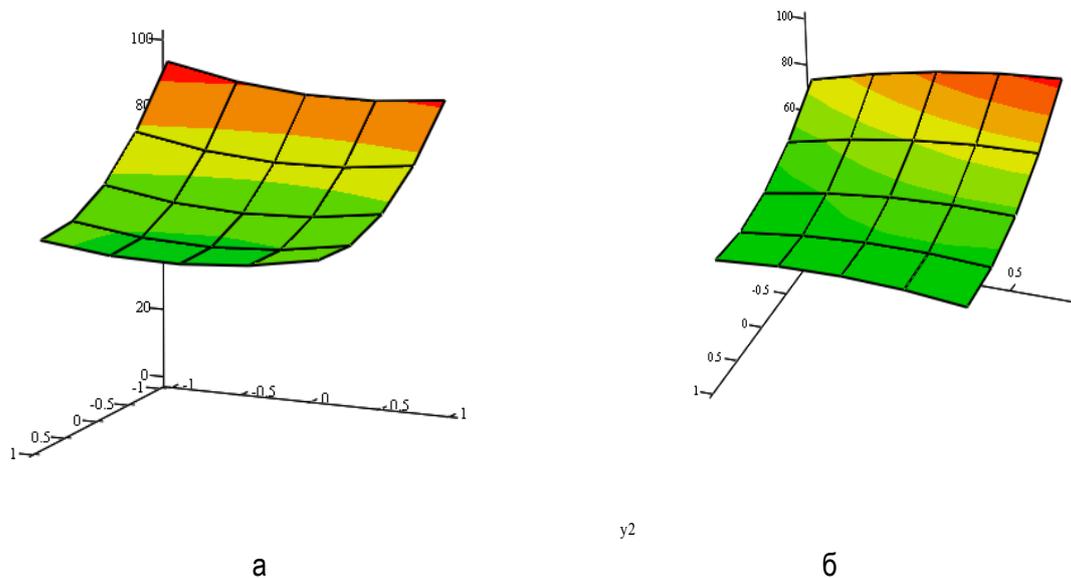


Рис. 4. Поверхности отклика: а – при $X_3=0=const$; б – при $X_2=0=const$

$$y_2(X_1, X_2, X_3) := 63.5 - 15.3 \cdot X_1 + 4.6 \cdot X_3 + 1.4 \cdot X_1 \cdot X_2 - 5.2 \cdot X_1 \cdot X_3 + 3.3 \cdot X_2 \cdot X_3 + 10.1 \cdot X_1^2 + 4.1 \cdot X_2^2 - 3.2 \cdot X_3^2$$

$$X_1 := 1 \quad X_2 := 0 \quad X_3 := -1$$

Given

$$-1 \leq X_1 \leq 1 \quad -1 \leq X_2 \leq 1 \quad -1 \leq X_3 \leq 1$$

$$\text{ext} := \text{maximize}(y_2, X_1, X_2, X_3) = \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$y_2(-1, -1, 1) = 97.7$$

Рис. 5. Программа оптимизации процесса измельчения зерна однократным ударом

Процесс измельчения зерна ударом по данной схеме нужно вести так, чтобы толщина слоя составляла один размер зерна ($X_1=-1$), скорость удара была минимальной ($X_2=-1$), а энергия удара, наоборот, максимальной ($X_3=1$). Степень повреждаемости зерна при этом составляет 97,7%.

Авторы благодарят магистранта инженерного факультета В. Шабалина за помощь в проведении экспериментов.

Выводы

1. Установлено, что при ударе по стесненному слою зернового материала эффективность использования подведенной энергии составляет величину 0,96-0,99. Это существенно выше, чем при ударе влет в молотковых дробилках, где этот показатель составляет 0,84-0,91.

2. Для достижения наибольшего эффекта разрушения зерна необходимо, чтобы толщина слоя составляла один размер зерна, скорость удара была по возможности минимальной, а энергия удара, наоборот, максимальной.

3. Полученные данные могут быть использованы при разработке вибрационных измельчителей кормового зерна.

Библиографический список

1. Вильдеман, В. Э. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов / В. Э. Вильдеман, Ю. В. Соколкин, А. А. Ташкинов. – Москва: Наука, Физматлит, 1997. – 288 с. – Текст: непосредственный.

2. Особов, В. И. Машины и оборудование для уплотнения сено – солоmistых материалов / В. И. Особов, Г. К. Васильев, А. В. Голяновский. – Москва: Машиностроение, 1974. – 231 с. – Текст: непосредственный.

3. Федоренко, И. Я. Моделирование ударного нагружения слоя кормового материала / И. Я. Федоренко, А. А. Смышляев. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2015. – № 5 (127). – С. 136-141.

4. Федоренко, И. Я. Реологическая модель единичной частицы фуражного зерна / И. Я. Федоренко, А. М. Левин, А. В. Табаев. – Текст: непосредственный // Теория и практика современной аграрной науки: сборник III Национальной (Всероссийской) научной конференции с международным участием (г. Новосибирск, 28 февраля 2020 г). – Том 2; Новосиб. гос. аграр. ун-т. – Новосибирск: ИЦНГАУ «Золотой колос», 2020. – С. 476-479.

5. Fedorenko, I., Levin, A., Tabaev, A. (2020). Modeling Elastic and Dissipative Properties of Feed Grain Subjected to Vibration. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 941. 012046. DOI: 10.1088/1757-899X/941/1/012046.

6. Батуев, Г. С. Инженерные методы исследования ударных процессов / Г. С. Батуев и др. – Москва: Машиностроение, 1977. – 240 с. – Текст: непосредственный.

7. Пановко, Я. Г. Введение в теорию механических колебаний / Я. Г. Пановко. – Москва: Наука, 1991. – 256 с. – Текст: непосредственный.

References

1. Vildeman V.E. Mekhanika neuprugogo deformirovaniia i razrusheniia kompozitsionnykh materialov / V.E. Vildeman, Iu.V. Sokolkin, A.A. Tashkinov. – Moskva: Nauka, Fizmatlit, 1997. – 288 s. – Tekst: neposredstvennyi.

2. Osobov V.I. Mashiny i oborudovanie dlia uplotneniia seno-solomistykh materialov / V.I. Osobov, G.K. Vasilev, A.V. Golianovskii. – Moskva: Mashinostroenie, 1974. – 231 s. – Tekst: neposredstvennyi.

3. Fedorenko I.Ia. Modelirovanie udarnogo nagruzheniia sloia kormovogo materiala / I.Ia. Fedorenko, A.A. Smyshliaeva. – Tekst neposredstvennyi // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2015. – No. 5. – S. 136-141.

4. Fedorenko I.Ia. Reologicheskaia model edinichnoi chastitsy furazhnogo zerna/ I.Ia. Fedorenko, A.M. Levin, A.V. Tabaev. – Tekst: neposredstvennyi // Teoriia i praktika sovremennoi agrarnoi nauki: sb. III Natsionalnoi (Vserossiiskoi) nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem (g. Novosibirsk, 28 fevralia 2020 g.): T. 2 / Novosib. gos. agrar. un-t. – Novosibirsk: ITsNGAU «Zolotoi kolos», 2020. – S. 476-479.

5. Fedorenko, I., Levin, A., Tabaev, A. (2020). Modeling Elastic and Dissipative Properties of Feed Grain Subjected to Vibration. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 941. 012046. DOI: 10.1088/1757-899X/941/1/012046.

6. Batuev G.S. Inzhenernye metody issledovaniia udarnykh protsessov / G.S. Batuev i dr. – Moskva: Mashinostroenie, 1977. – 240 s. – Tekst: neposredstvennyi.

7. Panovko, Ia.G. Vvedenie v teoriuu mekhanicheskikh kolebanii / Ia.G. Panovko. – Moskva: Nauka, 1991. – 256 s. – Tekst: neposredstvennyi.



УДК 631.3632.001.57

У.К. Сабиев, В.В. Садов
U.K. Sabiyev, V.V. Sadov

ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ ФУРАЖНОГО ЗЕРНА

FEEDING GRAIN GRINDER EFFICIENCY INDICES

Ключевые слова: фуражное зерно, измельчитель, гранулометрический состав, модуль помола, удельная энергоёмкость.

Наиболее важным способом обработки зерновых кормов является измельчение. Серийно выпускаемые дробилки молоткового типа имеют ряд существенных недостатков: большая энергоёмкость и значительный процент переизмельченного материала. Несмотря на эти недостатки из-за своей простоты конструкции и надежности эти измельчители занимают значительную часть производственных мощностей. Способы резания лезвием дают лучшие показатели по степени измельчения и энергоёмкости. Однако из-за сложности конструкции их применение ограничено. Эти дробильные машины заслуживают особого внимания, в основу которых заложен метод измельчения с использованием

так называемого «защемленного» удара лезвием по зерновке. Они позволяют измельчать культуры, которые требуют особых условий, например, с высокой маслянистостью, мелкосеменные и другие. Предложены рабочие органы измельчителя с оптимальными углами резания для 1-й ступени, равной 30°, для 2-й ступени, равной 35°. Представлены результаты экспериментальных исследований предлагаемого измельчителя фуражного зерна с режущими элементами оригинальной формы. Отмечено, что для предлагаемого измельчителя удельная энергоёмкость снизилась в среднем на 11,9%, однородность гранулометрического состава готового продукта повысилась на 5-10%, количество пылевидной фракции снизилось на 10-15%, и отсутствуют целые зёрна в готовом продукте. Влажность измельчаемого материала оказывает существенное влияние на удельную энергоёмкость процесса измель-