

УДК 631.363.7

А. В. КИТУН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ГОРИЗОНТАЛЬНО РАСПОЛОЖЕННОГО РЕШЕТА ДРОБИЛКИ ЗЕРНОФУРАЖА

*Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Беларусь,
e-mail: anton.kitun@mail.ru*

В статье рассматривается вопрос определения пропускной способности решета при измельчении зерновых кормов в измельчителе с горизонтально расположенным решетом. Показано, что для организации последовательного дробления зернофуража в вертикальном потоке предпочтительно комплектовать дробилку из двух ярусов решёт. Диаметр отверстий в поярусно установленных решётах должен изменяться от большего значения в верхнем решете до меньшей величины в нижнем решете.

Ключевые слова: решето, измельчение, зерно, измельчитель.

A. V. KITUN

DETERMINATION OF CAPACITY OF A HORIZONTAL ARRANGEMENT OF A SIEVE GRAIN FORAGE CRUSHER

*Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus,
e-mail: anton.kitun@mail.ru*

The article deals with the question of determining the capacity of sieve during grinding of grain feed in the grinder with a horizontal position lo-sieve. It is shown that the organization of successive crushing grain forage in a vertical flow is preferred to complete the crusher of the two tiers of sieves. The diameter of the holes in the tiered set sieves should change from large – on the upper sieve, to a smaller – in the bottom.

Keywords: sieve, grinding, grain grinder.

Введение. Предварительная подготовка зернового продукта, включающая в себя различные операции, в том числе его измельчение, способствует усвоению содержащихся в зерне веществ и повышению его питательной ценности. Данная операция выполняется дробилками, имеющими простую конструкцию и высокую надежность при эксплуатации. Измельченный ими зерновой продукт может храниться длительное время, что позволяет более рационально использовать оборудование и рабочую силу. Рабочим органом в дробилках закрытого типа, обеспечивающим сепарацию за пределы рабочей камеры дробленого зерна, является решето. Этот технический элемент дробилки представляет собой пластину с выполненными сквозными каналами и характеризует производительность машины.

Расчет параметров. В дробилках закрытого типа решето и дека охватывают весь барабан. Поступающий в рабочую камеру зерновой продукт при своем перемещении совершает многократное круговое движение, концентрируясь при этом на внутренних стенках дробильной камеры в виде воздушно-продуктового слоя. Рабочий процесс в этих машинах характеризуется тем, что материал измельчается путем многократного ударного воздействия молотков и истирания ими зерна при проходе в среде циркулирующего слоя. Дробилки с данным типом измельчающего аппарата широко распространены в технологических линиях подготовки зернофуража к скармливанию, так как их простое устройство не требует повторного измельчения зернового продукта. При изучении технологического процесса дробления зерна машинами с горизонтально расположенной рабочей камерой установлено, что при ударе зерна о гладкую поверхность решета угол его падения равен 70–80 град. Величина последнего значительно снижает эффект разруше-

ния зерна о решето. Сообщенная при этом энергия зерну затрачивается на бесполезное перемещение измельченного материала в дробильной камере.

Дробилки данного типа имеют ряд недостатков. В процессе работы машины при соударении частиц зерна возникает сила взаимодействия, вызывающая напряжение в их молекулярной структуре, что является причиной дробления. Однако большее напряжение возникает в меньшей частице. Вследствие этого процесса первоначально разрушаются мелкие частицы зерна, что ведет к образованию неравномерного состава продуктов помола. Кроме того, горизонтально расположенное решето в дробилках затрудняет сепарацию измельченных частиц зерна за пределы дробильной камеры. В результате происходит переизмельчение зерна, а следовательно, ухудшается его качество и возрастает удельный расход энергии на выполняемый процесс. Данный вывод подтверждают исследования, проведенные В. И. Сыроватко [1]. Дробилки с вертикально расположенной рабочей камерой позволяют устранить этот недостаток. Данные машины состоят из вертикально расположенной рабочей камеры, в которой закреплено решето для выделения измельченных до заданного размера частиц зерна. Внутри рабочей камеры машины установлен вращающийся ротор с молотками для выполнения технологического процесса. Так как скорость молотков больше, чем скорость загружаемого зерна, то они разрушают зерно. Одновременно слой зерна циркулирует по периметру рабочей камеры.

Если в процессе измельчения частиц зерна встречается отверстие решета, диаметр которого равен размеру частицы, то она перемещается под действием силы тяжести по каналу в сторону выгрузки. В этом случае пропускную способность решета можно определить по формуле

$$Q_{p1} = s_c \rho V_{np}, \quad (1)$$

где s_c – площадь сепарирующей поверхности, м²; ρ – плотность корма, кг/м³; V_{np} – скорость прохождения измельченного продукта через отверстия в решете, м/с.

Из формулы (1) видно, что пропускная способность решета зависит от площади сепарирующей поверхности и скорости продвижения измельченного продукта через его отверстия.

Для определения пропускной способности дробилки с горизонтально расположенным решето скорость сепарации измельченных частиц зерна через отверстия в решете является существенным показателем. При ее расчете рассмотрим динамику перемещения частицы в рабочей зоне отверстия решета, при этом размер частицы зерна меньше диаметра отверстия в решете.

Для определения скорости продвижения измельченного продукта через отверстия в решете рассмотрим схему (рисунок). Из нее видно, что частицы дробленого зерна перемещаются в зарешетное пространство в направлении вектора абсолютной скорости, которая и определяет скорость прохождения измельченных частиц через отверстия в решете.

Находим абсолютную скорость по формуле

$$V_{abc} = \sqrt{V_{окр}^2 + V_{отн}^2}, \quad (2)$$

где $V_{окр}$ – окружная скорость частиц зерна, м/с; $V_{отн}$ – относительная скорость частиц зерна, м/с.

Для вычисления окружной скорости частицы зерна, перемещающейся по ситовой поверхности, рассмотрим действующие на нее силы. На частицы зернофуража при измельчении действуют центробежная сила $F_{ц}$, кориолисова сила F_k и сила трения F_t , определить которые можно таким образом:

сила трения частицы о поверхность решета, возникающая от силы тяжести:

$$F_t = f_k m_k g \quad (3)$$

(f_k – коэффициент трения зерна по металлу; m_k – масса частицы, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²);

центробежная сила, возникающая от действия молотков на зернофураж:

$$F_{ц} = m_n \omega_p^2 r_n, \quad (4)$$

где ω_p – угловая скорость ротора-измельчителя, с⁻¹; r_n – расстояние от оси вала ножа до частицы, м; m_n – масса молотка, кг;

кориолисова сила

$$F_k = 2 m_k \omega_p V_{\text{окр}}. \quad (5)$$

Здесь $V_{\text{окр}}$ – окружная скорость движения частицы зернофуража, м/с.

Тогда уравнение движения частицы по поверхности решета имеет вид

$$m_n \omega_p^2 r_n = f_k m_k g + 2 m_k \omega_p V_{\text{окр}},$$

откуда окружная скорость движения частицы зернофуража

$$V_{\text{окр}} = \frac{m_n \omega_p^2 r_n - f_k m_k g}{2 m_k \omega_p}. \quad (6)$$

Для определения относительной скорости частицы дробленого зерна, перемещающейся по каналу сита, рассмотрим действующие на нее силы. В этом случае происходит свободное падение частицы зернофуража под действием силы тяжести с относительной скоростью:

$$F_{\text{тяж}} = \frac{m_k V_{\text{отн}}^2}{h_p}, \quad (7)$$

где $V_{\text{отн}}$ – относительная скорость движения частицы зернофуража, м/с; h_p – толщина решета, м.

Перемещению частицы дробленого зерна через каналы сита препятствует сила трения об их внутренние стенки

$$F_{T1} = f m_k g. \quad (8)$$

Тогда уравнение движения частицы через канал сита

$$\frac{m_k V_{\text{отн}}^2}{h_p} - f_k m_k g = 0,$$

откуда относительная скорость движения частицы зернофуража

$$V_{\text{отн}}^2 = f_k h_p g. \quad (9)$$

Подставив в формулу (2) значения скоростей (6) и (9), определим абсолютную скорость движения частицы через канал решета:

$$V_{\text{абс}} = \sqrt{\left(\frac{m_n \omega_p^2 r_n - f_k m_k g}{2 m_k \omega_p} \right)^2 + f_k h_p g}. \quad (10)$$

Площадь сепарирующей поверхности решет вычислим по формуле

$$S_c = \frac{\pi d_{\text{отв}}^2}{4} Z_{\text{отв}}, \quad (11)$$

где $d_{\text{отв}}$ – диаметр отверстия канала в решетке, м; $Z_{\text{отв}}$ – число отверстий, шт.

Тогда пропускную способность решета определим по следующей формуле:

$$Q_{\text{пл}} = \frac{\pi d_{\text{отв}}^2}{4} Z_{\text{отв}} \rho \sqrt{\left(\frac{m_n \omega_p^2 r_n - f_k m_k g}{2 m_k \omega_p} \right)^2 + f_k h_p g}. \quad (12)$$

Как показали проведенные исследования, с увеличением диаметра отверстий в решетке производительность дробилки возрастает. Отрицательный эффект при этом – увеличение модуля помола зернофуража. Противоречивость полученной зависимости позволила выдвинуть гипотезу

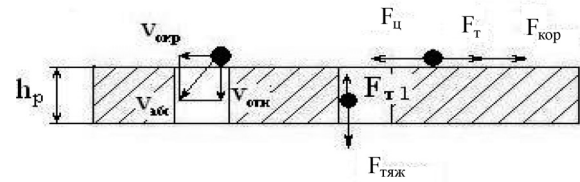


Схема для определения пропускной способности горизонтально расположенного решета

зу об организации последовательного измельчения зерна в дробилке с вертикально расположенной дробильной камерой. В этом случае на первой стадии зерно дробится на более крупные фракции, на второй стадии – на частицы, размер которых соответствуют заданным зоотехническим требованиям.

Для последовательного измельчения зернофуража предусматривается комплектация модуля из двух ярусов решёт. Диаметр отверстий в поярусно установленных решётах должен изменяться от большего значения в верхнем решете до меньшей величины в нижнем решете. При проверке выдвинутой гипотезы возникла проблема выбора диаметра отверстий в последовательно установленных решётах. Для ее устранения использованы результаты ранее проведенных исследований, на основании которых в нижнем ярусе необходимо установить решето с диаметром отверстий, равным 3 мм. В этом случае обеспечивается требуемое качество измельчения зернового продукта для крупного рогатого скота.

Для определения диаметра отверстий в верхнем решете проведен однофакторный эксперимент. В верхнем ярусе поочередно, устанавливали решёта с диаметром отверстий 4, 5 и 6 мм. Зазор между ними и ножами в каждом ярусе 5 мм. Другие элементы конструкции ротора на протяжении всего эксперимента оставались без изменений. Опыты проводили с трехкратным повтором по общепринятой методике.

Для каждой серии опытов вычислили среднее арифметическое \bar{y} и дисперсию воспроизводимости опыта S_y^2 , определяемую из выражения

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}{m - 1}, \quad (13)$$

где y_i – значение функции отклика в i -м опыте; m – число опытов в серии, $m = 3$.

Результаты расчета дисперсии воспроизводимости приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Результаты опытов и расчета дисперсий

Диаметр отверстий, мм	Значение функции отклика				
	y_1	y_2	y_3	\bar{y}	S_y^2
6	8,3333	8,3969	8,3650	8,365	0,001
5	7,9422	7,9422	7,9710	7,9518	0,0002
4	8,1784	8,2089	8,2089	8,1987	0,0001

Пр и м е ч а н и е. $\sum S_y^2 = 0,0013$.

Однородность дисперсий опытов проверяем по критерию Кохрена:

$$\sigma_p = \frac{S_{\max}^2}{\sum S_y^2} = \frac{0,001}{0,0013} = 0,76. \quad (14)$$

Табличное значение критерия σ_T при 5% -ном уровне значимости для $N = 3$ и $m = 1-2$ равно 0,8709. Так как полученное значение меньше табличного, то гипотеза однородности правомерна.

Убедившись в однородности дисперсий S_y^2 , вычислим дисперсию S^2 воспроизводимости эксперимента:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_y^2}{N} = \frac{0,0013}{3} = 0,00043. \quad (15)$$

Уравнение регрессии, описывающее однофакторный эксперимент, имеет вид

$$y = b_0 + b_1 x_1, \quad (16)$$

где b_0 , b_1 – коэффициенты регрессии; x_1 – кодированное значение фактора.

Для получения значений коэффициентов регрессии воспользуемся следующими формулами:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n y_i x_i \sum_{i=1}^n x_i}{N \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}; \quad b_1 = \frac{N \sum_{i=1}^n y_i x_i - \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i}{N \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}. \quad (17)$$

Результаты вычислений величин для определения коэффициентов регрессии представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Результаты определения коэффициентов регрессии

Номер опыта	Коэффициент регрессии						
	x_1	y	x_1^2	$y x_1$	y^2	$X + y$	$(x + y)^2$
1	+6	8,365	36	50,19	69,9732	14,365	206,3532
2	+5	7,9518	25	39,759	63,2311	12,9518	167,7491
3	+4	8,1987	16	32,7948	67,2187	12,1987	148,8082
Σ	15	24,5155	77	122,7438	200,4229	–	522,9106

Принимая во внимание данные табл. 2, определяем коэффициенты регрессии:

$$b_0 = \frac{24,5155 \times 77 - 122,7438 \times 15}{3 \times 77 - 15^2} = 7,76;$$

$$b_1 = \frac{3 \times 122,7438 - 24,5155 \times 15}{3 \times 77 - 15^2} = 0,083. \quad (18)$$

Тогда уравнение регрессии будет иметь вид

$$y = 7,76 + 0,083 x_1. \quad (19)$$

Для проверки значимости коэффициентов регрессии воспользуемся критерием Стьюдента. Определим доверительный интервал:

$$\Delta b = \pm t \sqrt{S^2} = 2,447 \times 0,021 = 0,051, \quad (20)$$

где t – табличное значение критерия Стьюдента. При числе степеней свободы $f = N(m - 1) = 3(3 - 1) = 6$ и 5%-ном уровне значимости $t = 2,447$.

Так как абсолютные величины коэффициентов регрессии больше доверительного интервала, то они являются статистически значимыми.

Дисперсию адекватности определим по формуле

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta y^2}{f} = 0,00126. \quad (21)$$

Здесь Δy^2 – остаточная сумма квадратов; f – число степеней свободы, $f = N - 2 = 3 - 2 = 1$.

Результаты определения остаточной суммы квадратов сведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Результаты определения остаточной суммы квадратов

Номер опыта	Значение суммы квадратов					
	y_1	y_2	y_3	\bar{y}_i	Δy	Δy^2
1	8,3333	8,3969	8,3650	8,365	0,32	0,00102
2	7,9422	7,9422	7,9710	7,9518	0,0096	0,0000922
3	8,1784	8,2089	8,2089	8,1987	0,102	0,0001

П р и м е ч а н и е. $\Sigma \Delta y^2 = 0,00126$.

Гипотезу об адекватности проверим, воспользовавшись критерием Фишера:

$$F = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S} = \frac{0,00126}{0,00043} = 2,83. \quad (22)$$

При 5 % -ном уровне значимости и числах степеней свободы $f_1 = N-2 = 3-2 = 1$ и $f_2 = N(m-1) = 3 \times 2 = 6$ табличное значение F -критерия равно 5,99. Так как $F < F_T$, то модель, представленная уравнением регрессии, адекватна.

В предложенном модуле для измельчения зернофуража влажностью до 14 % с двумя ярусами последовательно расположенных решёт выполняется важный технологический процесс – сепарация зернового продукта по мере его измельчения, дополнительные устройства при этом не применяются. Закрепленные в верхнем ярусе ножи обеспечивают равномерное распределение по периметру рабочей камеры загружаемого зернофуража. В результате не затрачивается энергия на преодоление перегрузки вала измельчителя и повышается производительность машины.

Выдвинутая гипотеза проверена на измельчителе вертикального типа, в рабочей камере которого установили два яруса решёт – в нижнем ярусе с диаметром отверстий, равным 3 мм, а в верхнем 5 мм. В указанной последовательности удельная энергоёмкость процесса составила 8,36 кВт·ч/т при производительности 2,63 т/ч. Новизна предложенного технического решения защищена патентами на полезную модель [2, 3].

Заключение. Пропускная способность решета в установленном режиме работы дробилки зернофуража зависит от ряда факторов. С увеличением отношения геометрических размеров рабочей камеры дробилки производительность будет возрастать. Для организации последовательного дробления зернофуража в вертикальном потоке предусматривается комплектование дробилки из двух ярусов решёт. Диаметр отверстий в поярусно установленных решётах должен изменяться от большего значения в верхнем решете до меньшей величины в нижнем решете. При этом выполняется важный технологический процесс – сепарация зерна по мере его измельчения, что обеспечивает зоотехнические требования и минимальные затраты энергии. Важным фактором, влияющим на пропускную способность решета, являются физико-механические свойства зерновых кормов. Установлено, что при измельчении зерна пленочных культур производительность дробилки ниже на 30–35 %, чем при измельчении зерна беспленочных культур. Отмечается, что производительность выше при измельчении зерновой смеси, чем при измельчении зерна одной культуры. Снижается производительность и при повышении влажности зерна.

Список использованной литературы

1. Сыроватко, В. И. О движении материала, измельчаемого на молотковой дробилке / В. И. Сыроватка // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1964. – № 4. – С. 38–39.
2. Измельчитель зерновых кормов: пат. 372 Респ. Беларусь, МПК7 А 01 F 29/00 / Л. С. Герасимович, В. И. Передня, А. В. Китун, О. Б. Жандаренко, Ю. А. Башко; заявитель Белорус. гос. аграрный ун-т. № и 20010060; заявл. 05.07.01; опубл. 30.12.01 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2001. – № 5. – С. 152.
3. Измельчитель кормов: пат. 5698 Респ. Беларусь, МПК6 А 01 F 29/00 / А. В. Китун, В. И. Передня; заявитель Белорус. гос. аграрный ун-т. № и 20090267; заявл. 01.04.09; опубл. 30.12.09 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2009. – № 20. – С. 150.

Поступила в редакцию 23.03.2015