УДК 631.363.21

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОСТАВНЫХ ДИСКОВ ДИСКОВОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ФУРАЖНОГО ЗЕРНА

Михаил Николаевич Яровой, кандидат технических наук,
зав. кафедрой механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции
Евгений Александрович Извеков, кандидат технических наук,
доцент кафедры механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции
Александр Арсентьевич Сундеев, кандидат технических наук,
доцент кафедры механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

DOI: 10.17238/issn2071-2243.2016.1.75

Целью данной работы является совершенствование конструкции дисковой мельницы МД-01. Предметом исследования являются измельчающие диски мельницы. Для сравнения существующих и разработанных измельчающих дисков использовался аналитический метод исследования. В результате исследований была оценена перспективность использования составных мелющих дисков с точки зрения срока их эксплуатации. При использовании в мельнице стандартных дисков при полном износе мелющей поверхности в центре диска, периферия изнашивается только на 37%. В статье предлагается использовать мелющие диски, состоящие из концентрических колец разного диаметра, закрепленных на основании, причем мелющие рифли нарезаются на обеих их поверхностях. В результате теоретической оценки интенсивности воздействия измельчаемого материала на диски было проведено сравнение времени износа стандартного и модернизированного дисков, а также их относительной стоимости. При использовании составных дисков с двухсторонней нарезкой рифлей, замена которых производится по мере износа каждого кольца, разница в степени износа внутренней и внешней части кольца уменьшается, что позволяет более полно использовать его ресурс. Построенная схема износа и замены колец мелющего диска позволяет визуально оценить скорость износа отдельных колец диска и периодичность их замены. Сравнительный расчет относительной стоимости использования дисков позволил сделать заключение, что применение предложенной конструкции дисков в 1,64 раза снижает затраты на их приобретение. Кроме того, использование составных дисков позволит обеспечить высокое качество измельчения зерна в течение всего срока эксплуатации мельницы. В заключение сделаны выводы о перспективности использования предложенной конструкции мелющих дисков.
КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дисковая мельница, мелющий диск, измельчение, износ.

The objective of this work was to improve the design of the MD-01 disk mill. The subject of study included grinding disks of the mill. For comparison of existing and developed grinding disks the authors used analytical method of research. The conducted research resulted in the evaluation of prospects of using composite grinding disks from the point of view of their operating life: when using standard disks in the mill complete wear-out of the grinding surface in the center of the disk is accompanied by only 37% wear of its periphery. In this article the authors propose to use grinding disks consisting of concentric rings of different diameter mounted on a base with the grinding grooves cut on two surfaces. Theoretical estimation of the intensity of the impact of crushed material on the disks resulted in a comparison of wearing times of standard and upgraded disks, as well as their relative cost. When using composite discs grooved from two sides and replaced according to wearing of each ring, the difference in the degree of wear of the inner and outer parts of the ring is decreased which helps making better use of its resource. A presented diagram of wear and replacement of rings of the grinding disk allows a visual assessment of the rate of wear of individual disk rings and frequency of their replacement. A comparative calculation of relative costs of disk usage allowed concluding that the use of the proposed disk design reduces the cost of their purchase by 1.64 times. Moreover, the use of composite disks will ensure higher quality of grain grinding during the whole life of the mill. The research allows for the conclusion on the prospects of the proposed design of grinding disks.
KEY WORDS: disk mill, grinding disk, grinding, wear.

Введение

В настоящее время в России и за рубежом для измельчения концентрированных кормов широко используются молотковые дробилки, имеющие простую конструкцию и высокую производительность [1], но данный вид измельчителей обладает большой

энерго- и металлоемкостью, что требует разработки более эффективных машин, способных выполнять операции по измельчению фуражного зерна [8, 9, 10]. Наличие большого количества фермерских хозяйств с различными видами выращиваемых животных требует от измельчителей небольшой производительности, малой металлоемкости и высокой энергоэффективности. К такому виду измельчителей относится дисковая мельница фуражного зерна МД-01, разработанная на кафедре МЖиПСХП Воронежского ГАУ [5, 6, 7].

Целью исследования является обоснование целесообразности использования в качестве рабочего органа дисковой мельницы составных мелющих дисков. Предметом исследования являются измельчающие диски мельницы МД-01 [6]. Метод исследования – аналитический.

Дисковая мельница имеет центральную загрузку, измельчаемое зерно подается через центральное загрузочное отверстие радиусом r (рис. 1). Производительность мельницы, так же как и других измельчителей с центральной загрузкой, определяется скоростью прохождения измельчаемого материала через это отверстие [3], в дальнейшем зерно распределяется между дисками, измельчается и двигается на периферию. Рассмотрим диск дисковой мельницы с максимальным радиусом R. Самой нагруженной и быстроизнашиваемой частью диска является зона центрального отверстия.

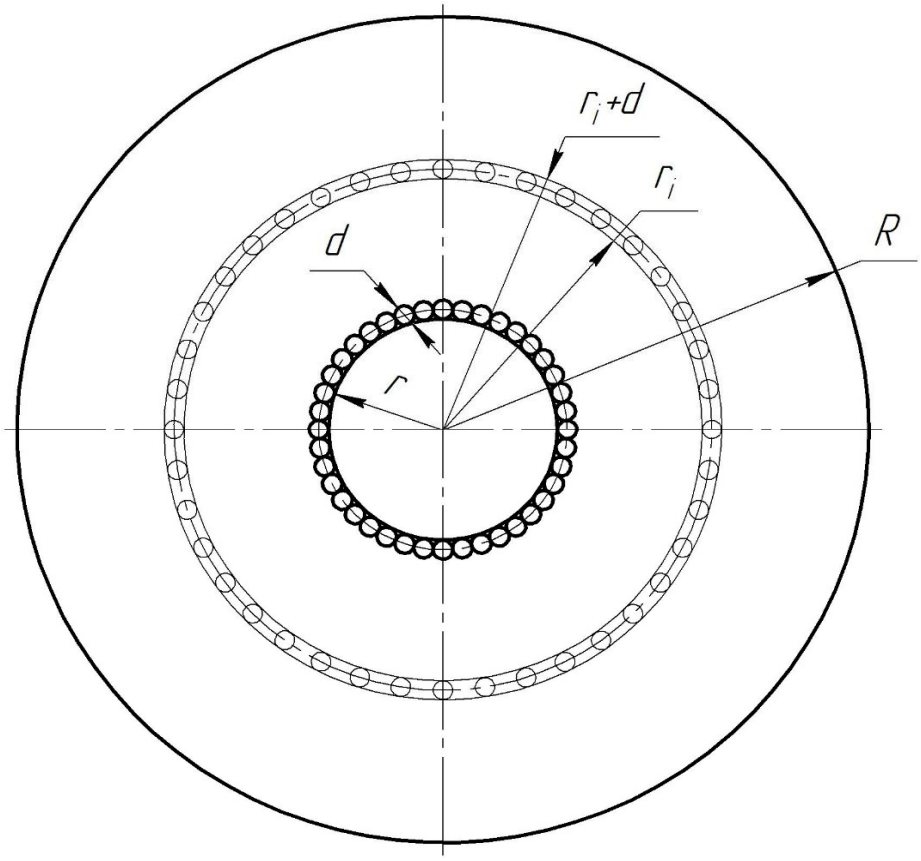

Рис. 1. Схема распределения частиц по поверхности диска:
***R* – внешний радиус мелющего диска; *r* – радиус центрального отверстия диска;**
***d* – диаметр измельчаемой частицы; r_i – *i*-й радиус диска ($r < r_i < R$)**

Для определения зависимости коэффициента заполнения междискового пространства от расстояния от центра диска расположим частицы шаровидной формы диаметром d вдоль центрального отверстия. В связи с большим числом частиц приблизительное их количество будет равно отношению длины окружности, проведенной через центры частиц к диаметру этих частиц:

$$n = \frac{l_{окр}}{d} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \left(r + \frac{d}{2} \right)}{d} = \pi \cdot \left(\frac{2 \cdot r}{d} + 1 \right). \quad (1)$$

Коэффициент заполнения первого слоя шириной d можно определить как отношение суммы проекций всех частиц на поверхность диска к площади кольца

$$k_{Зап1} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{2 \cdot r}{d} + 1 \right) \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}}{\pi \cdot (r + d)^2 - \pi \cdot r^2}. \quad (2)$$

После преобразования получим

$$k_{Зап1} = \frac{\pi}{4}. \quad (3)$$

Коэффициент заполнения междискового пространства на радиусе r_i будет равен

$$k_{Зап i} = \frac{\pi \cdot \left(\frac{2 \cdot r}{d} + 1 \right) \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}}{\pi \cdot (r_i + d)^2 - \pi \cdot r_i^2}. \quad (4)$$

После преобразования получим

$$k_{Зап i} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{d + 2 \cdot r}{d + 2 \cdot r_i}. \quad (5)$$

Если представить $r_i = r + \Delta r$, то выражение (5) примет вид

$$k_{Зап i} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{d + 2 \cdot r}{d + 2 \cdot (r + \Delta r)}. \quad (6)$$

Для определения суммарного коэффициента заполнения междискового пространства проинтегрируем выражение (5) по r_i от r до R-d [2]

$$\int_r^{R-d} \frac{\pi}{4} \cdot \frac{d + 2 \cdot r}{d + 2 \cdot r_i} dr_i = \frac{\pi \cdot (2 \cdot r + d)}{8} \cdot \left(\ln\left(R - \frac{d}{2} \right) - \ln\left(r + \frac{d}{2} \right) \right). \quad (7)$$

Скорость износа рабочей поверхности диска зависит от твердости поверхности диска и интенсивности воздействия на диск измельчаемого материала. Очевидно, что интенсивность воздействия материала на поверхность диска будет прямо пропорциональна коэффициенту заполнения междискового пространства. Так как наибольший коэффициент заполнения будет у загрузочного отверстия, то и интенсивность износа также будет максимальной в этой зоне. Примем интенсивность износа $J_{изн}$ для зоны центрального отверстия диска равной 1 и тогда будет справедливо равенство

$$J_{изн i} = k_{изн} \cdot k_{Зап i}, \quad (8)$$

где $J_{изн i}$ – интенсивность износа i-го слоя диска;

$k_{изн}$ – коэффициент пропорциональности, равный $k_{изн} = \frac{4}{\pi}$.

Время полного износа i-го слоя диска можно принять равным

$$T_{изн i} = \frac{k_{мат}}{J_{изн i}}, \quad (9)$$

где $k_{мат}$ – коэффициент износостойкости диска, зависящий от материала, способа обработки, формы и размеров рифлей.

Если учесть, что диск следует менять на новый в момент полного износа какой-либо его части, анализ формулы (9) покажет, что время работы диска определяется зоной с наибольшей интенсивностью износа, а именно зоной центрального отверстия диска.

При этом износ внешней части диска будет составлять

$$\frac{T_{изнг}}{T_{изнR}}\cdot 100\% = \frac{k_{мат}}{J_{изнг}}\cdot\frac{J_{изнR}}{k_{мат}}\cdot 100\% = \frac{\frac{\pi}{4}\cdot\frac{d+2\cdot r}{d+2\cdot(R-d)}}{\frac{\pi}{4}\cdot\frac{d+2\cdot r}{d+2\cdot r}}\cdot 100\% = \frac{2\cdot r+d}{2\cdot R-d}\cdot 100\%. \quad (10)$$

Для дисковой мельницы МД-1, диски которой имеют размеры $r = 50$ мм, $R = 145$ мм и частиц диаметром $d = 10$ мм, износ наружной части диска при полном износе внутренней будет составлять около 37% от допустимого, замена такого диска новым приводит к неполному использованию диска и, как следствие, к повышению затрат на обслуживание и ремонт мельницы. Для решения этой проблемы нами предлагается сделать диск составным, состоящим из трех колец (рис. 2), и менять диски по мере износа независимо друг от друга, причем средний и внешний диски должны иметь нарезку с обеих сторон, что позволит при износе одной рабочей поверхности, перевернув его, использовать вторую, тем самым увеличивая срок его эксплуатации.

Размеры составных дисков будут следующими:

внутренний диск: $r_1 = r$, $R_1 = r + \frac{R-r}{3} = \frac{2\cdot r+R}{3}$;

средний диск: $r_2 = \frac{2\cdot r+R}{3}$, $R_2 = \frac{2\cdot r+R}{3} + \frac{R-r}{3} = \frac{r+2\cdot R}{3}$;

внешний диск: $r_3 = \frac{r+2\cdot R}{3}$, $R_3 = R$.

Тогда, используя формулы (6), (8) и (9), определим основные показатели для составных дисков.

Коэффициенты заполнения дисков по внутреннему диаметру (5) будут равны:

$$k_{Зап1} = \frac{\pi}{4}\cdot\frac{d+2\cdot r}{d+2\cdot r} = \frac{\pi}{4}; \quad (11а)$$

$$k_{Зап2} = \frac{\pi}{4}\cdot\frac{d+2\cdot r}{d+2\cdot\frac{2\cdot r+R}{3}} = \frac{\pi}{4}\cdot\frac{3\cdot d+6\cdot r}{2\cdot R+3\cdot d+4\cdot r}; \quad (11б)$$

$$k_{Зап3} = \frac{\pi}{4}\cdot\frac{d+2\cdot r}{d+2\cdot\frac{r+2\cdot R}{3}} = \frac{\pi}{4}\cdot\frac{3\cdot d+6\cdot r}{4\cdot R+3\cdot d+2\cdot r}. \quad (11в)$$

Интенсивность износа дисков по внутреннему диаметру будет равна:

$$J_{изн1} = k_{изн}\cdot\frac{\pi}{4}; \quad (12а)$$

$$J_{изн2} = k_{изн}\cdot\frac{\pi}{4}\cdot\frac{3\cdot d+6\cdot r}{2\cdot R+3\cdot d+4\cdot r}; \quad (12б)$$

$$J_{изн3} = k_{изн}\cdot\frac{\pi}{4}\cdot\frac{3\cdot d+6\cdot r}{4\cdot R+3\cdot d+2\cdot r}. \quad (12в)$$

Время полного износа внутреннего диаметра каждого диска будет равно:

$$T_{изн1} = \frac{k_{мат}}{k_{изн}}\cdot\frac{4}{\pi}; \quad (13а)$$

$$T_{изн2} = \frac{k_{мат}}{k_{изн}}\cdot\frac{4}{\pi}\cdot\frac{2\cdot R+3\cdot d+4\cdot r}{3\cdot d+6\cdot r}; \quad (13б)$$

$$T_{изн3} = \frac{k_{мат}}{k_{изн}}\cdot\frac{4}{\pi}\cdot\frac{4\cdot R+3\cdot d+2\cdot r}{3\cdot d+6\cdot r}. \quad (13в)$$

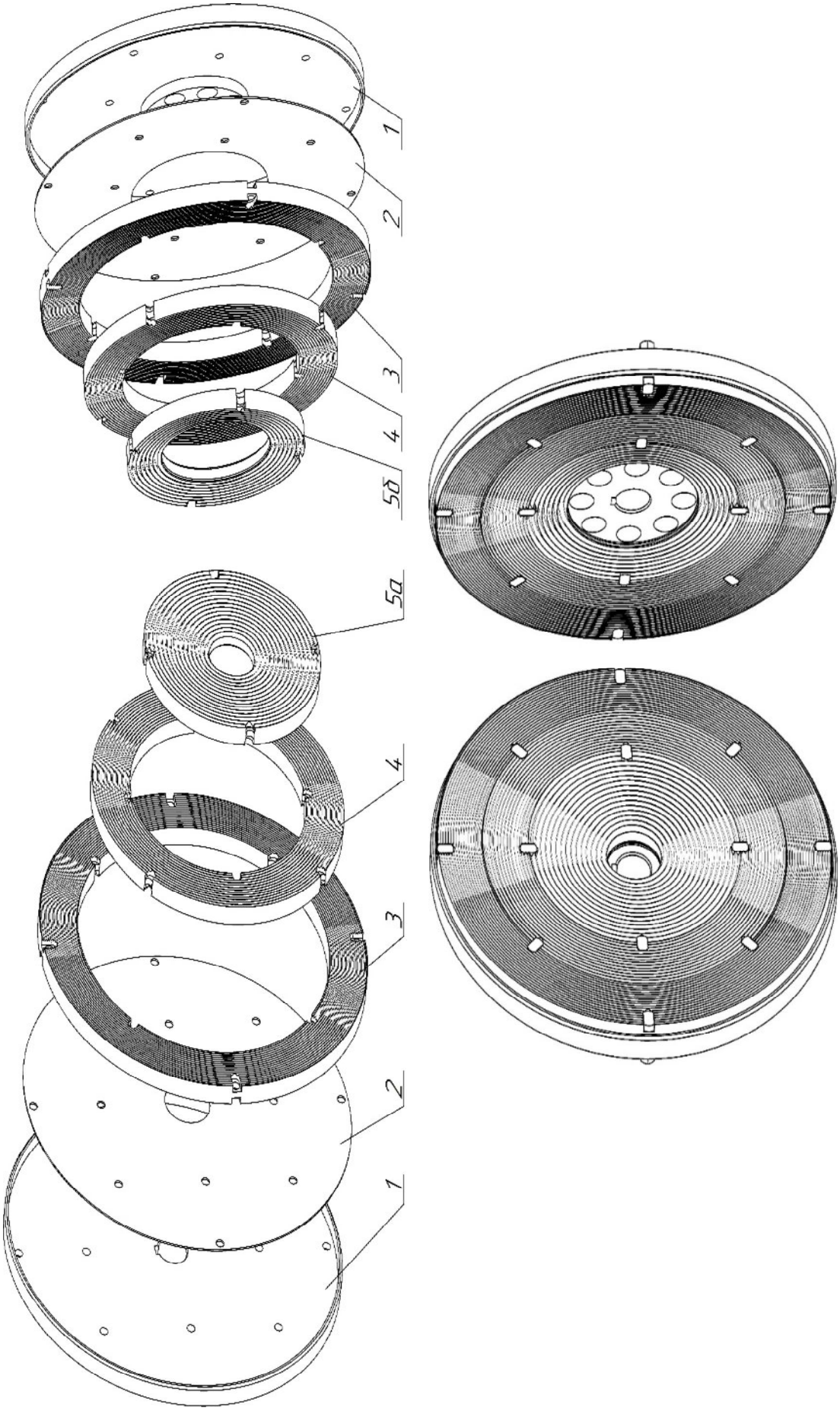

Рис. 2. Схема модернизированных дисков: а – схема в разобранном виде; б – схема собранных дисков; 1 – основание диска; 2 – прокладка; 3 – внешнее кольцо; 4 – среднее кольцо; 5а и 5б – внутренние кольца ведомого и ведущего дисков

Для оценки эффективности использования составных дисков по сравнению со стандартным необходимо сравнить затраты на приобретение стандартных и составных дисков за время полного износа диска с наибольшим временем работы. Наибольшее время работы будет у внешнего кольца составного диска. При расчете учитывается то, что среднее и внешнее кольцо имеют двухстороннюю нарезку, следовательно, могут использоваться дважды.

Количество изношенных стандартных дисков и внутреннего кольца составного диска будут равны между собой, так как имеют одинаковый внутренний диаметр и их количество определяется по формуле

$$n_{станд} = n_{внутр} = \frac{2 \cdot T_{изн3}}{T_{изн1}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{4 \cdot R + 3 \cdot d + 2 \cdot r}{d + r}. \quad (14)$$

Количество средних колец составных дисков будет равно

$$n_{сред} = \frac{2 \cdot T_{изн3}}{2 \cdot T_{изн1}} = \frac{4 \cdot R + 3 \cdot d + 2 \cdot r}{2 \cdot R + 3 \cdot d + 4 \cdot r}. \quad (15)$$

Схема износа и замены колец диска представлена на рисунке 3.

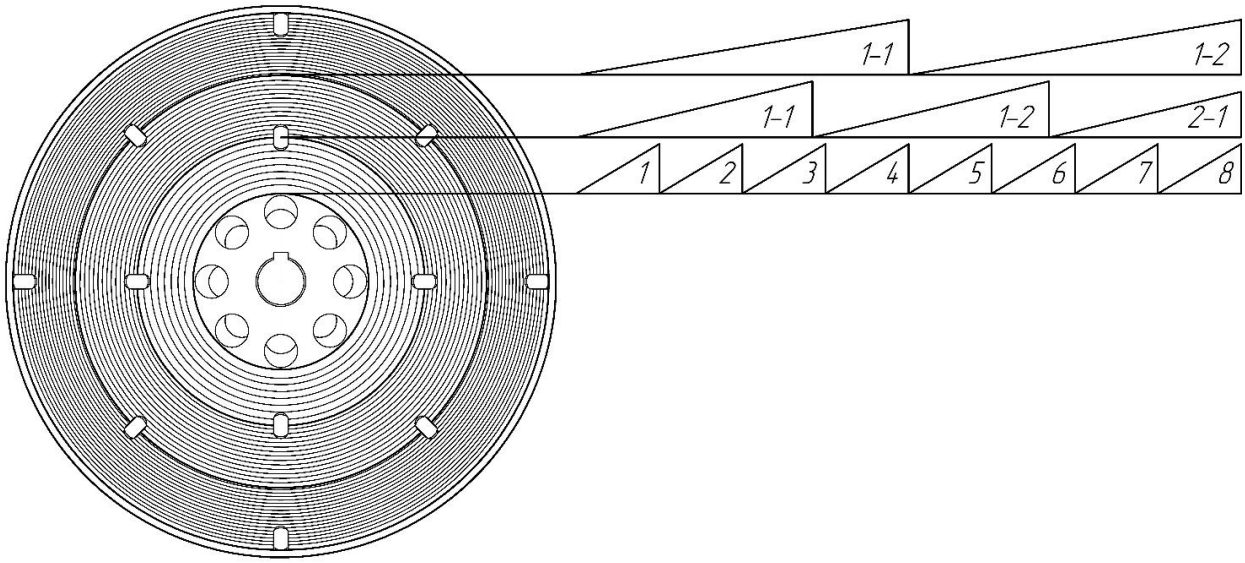

Рис. 3. Схема износа и замены колец составного диска

Для сравнения затрат на приобретение стандартных и составных дисков определим суммарную стоимость замененных стандартных и составных дисков за время полного износа внешнего кольца составного диска.

Стоимость стандартных дисков будет равна

$$C_{станд} = n_{станд} \cdot Ц_{станд}, \quad (16)$$

стоимость составных дисков составит:

$$C_{сост} = n_{внутр} \cdot Ц_{внутр} + n_{сред} \cdot Ц_{сред} + Ц_{внеш}, \quad (17)$$

где $Ц_{станд}$, $Ц_{внутр}$, $Ц_{сред}$, $Ц_{внеш}$ – соответственно цены стандартного, внутреннего, среднего и внешнего колец диска.

Примем стоимость стандартного диска за условную единицу стоимости диска (УЕСД), а стоимости колец составного диска пропорционально их массе с учетом коэффициента удорожания $k_{уд}$.

Масса стандартного диска равна

$$M_{станд} = \rho \cdot g \cdot t \cdot \left(R^2 - r^2\right), \tag{18}$$

где t – толщина диска.

Массы составных дисков будут равны:

$$M_{внут} = \rho \cdot g \cdot t \cdot \left(\left(\frac{2 \cdot r + R}{3}\right)^2 - r^2\right) = \rho \cdot g \cdot t \cdot \frac{R^2 + 4 \cdot R \cdot r - 5 \cdot r^2}{9}; \tag{19а}$$

$$M_{сред} = \rho \cdot \pi \cdot t \cdot \left(\left(\frac{r + 2 \cdot R}{3}\right)^2 - \left(\frac{2 \cdot r + R}{3}\right)^2\right) = \rho \cdot \pi \cdot t \cdot \frac{R^2 - r^2}{3}; \tag{19б}$$

$$M_{внеш} = \rho \cdot \pi \cdot t \cdot \left(R^2 - \left(\frac{r + 2 \cdot R}{3}\right)^2\right) = \rho \cdot \pi \cdot t \cdot \frac{5 \cdot R^2 - 4 \cdot R \cdot r - r^2}{3}. \tag{19в}$$

Относительная цена составных дисков будет равна

$$Ц_{внутр} = \frac{M_{внутр}}{M_{станд}} \cdot k_{уд} = \frac{\rho \cdot g \cdot t \cdot \frac{R^2 + 4 \cdot R \cdot r - 5 \cdot r^2}{9}}{\rho \cdot g \cdot t \cdot \left(R^2 - r^2\right)} \cdot k_{уд} = \frac{R + 5 \cdot r}{9\left(R + r\right)} \cdot k_{уд}; \tag{20а}$$

$$Ц_{сред} = \frac{M_{сред}}{M_{станд}} \cdot k_{уд} = \frac{\rho \cdot g \cdot t \cdot \frac{R^2 - r^2}{3}}{\rho \cdot g \cdot t \cdot \left(R^2 - r^2\right)} \cdot k_{уд} = \frac{1}{3} \cdot k_{уд}; \tag{20б}$$

$$Ц_{внеш} = \frac{M_{внутр}}{M_{станд}} \cdot k_{уд} = \frac{\rho \cdot g \cdot t \cdot \frac{5 \cdot R^2 + 4 \cdot R \cdot r - r^2}{9}}{\rho \cdot g \cdot t \cdot \left(R^2 - r^2\right)} \cdot k_{уд} = \frac{5 \cdot R + r}{9\left(R + r\right)} \cdot k_{уд}. \tag{20в}$$

Используя формулы (16) и (17), определим эффективность использования составных дисков по сравнению со стандартными

$$\frac{n_{станд} \cdot Ц_{станд}}{n_{внутр} \cdot Ц_{внутр} + n_{сред} \cdot Ц_{сред} + Ц_{внеш}} = \frac{9 \cdot \left(4 \cdot R^2 + 6 \cdot R \cdot r + 3 \cdot d \cdot R + 2 \cdot r^2 + 3 \cdot d \cdot r\right)}{10 \cdot R^2 + 46 \cdot R \cdot r + 15 \cdot d \cdot R + 16 \cdot r^2 + 21 \cdot d \cdot r} \cdot \frac{1}{k_{уд}}. \tag{21}$$

Так как диаметр частицы измельчаемого материала во много раз меньше размеров диска и в процессе измельчения он продолжает уменьшаться, преобразуем формулу (21) с учетом уменьшения d до 0 [4]

$$\lim_{d \to 0} \frac{9 \cdot \left(4 \cdot R^2 + 6 \cdot R \cdot r + 3 \cdot d \cdot R + 2 \cdot r^2 + 3 \cdot d \cdot r\right)}{10 \cdot R^2 + 46 \cdot R \cdot r + 15 \cdot d \cdot R + 16 \cdot r^2 + 21 \cdot d \cdot r} \cdot \frac{1}{k_{уд}} = \frac{9 \cdot \left(2 \cdot R^2 + 3 \cdot R \cdot r + r^2\right)}{5 \cdot R^2 + 23 \cdot R \cdot r + 8 \cdot r^2} \cdot \frac{1}{k_{уд}}. \tag{22}$$

Результат. Подставив в полученное уравнение размеры реального диска и приняв коэффициент удорожания $k_{уд} = 1{,}25$, получаем, что использование стандартных дисков обходится в 1,64 раза дороже, чем составных.

Вывод. Таким образом, использование предложенной конструкции дисков позволит значительно снизить затраты на ремонт и обслуживание мельницы, а также более полно использовать ресурс дисков. Кроме того, при работе мельницы с составными дисками эффективность измельчения и качество измельченного продукта получается более стабильным из-за меньшего износа рабочих поверхностей мелющих дисков.

Список литературы

1. Борщев В.Я. Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы : учебное пособие / В.Я. Борщев. – Тамбов : Тамбовский ГТУ, 2004. – 75 с.
2. Зельдович Я.Б. Высшая математика для начинающих физиков и техников / Я.Б. Зельдович, И.М. Яглом. – Москва : Наука, 1982. – 512 с.
3. Золотарев С.В. Ударно-центробежные измельчители фуражного зерна (основы теории и расчета) / С.В. Золотарев. – Барнаул : ГИПП «Алтай», 2001. – 200 с.
4. Москалев П.В. Высшая математика. Краткий курс : учеб. пособие для самостоятельной работы / П.В. Москалев, В.П. Богатова, И.В. Гриднева ; под ред. В.П. Шацкого. – Воронеж : Воронежский ГАУ, 2009. – 239 с.
5. Оробинский В.И. Агроинженерный факультет. 85 лет / В. И. Оробинский, В.С. Воищев, В.П. Шацкий [и др.]. – Воронеж : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2015. – 24 с.
6. Пат. 2361673 Российская Федерация, МПК B02C7/10 (2006.01). Дисковая мельница / Труфанов В.В., Барбицкий А.П., Яровой М.Н., Позигунов С.Н.; заявитель и патентообладатель Воронежский государственный аграрный университет им. К.Д. Глинки. – № 2007145688/03; заявл. 10.12.2007; опубл. 20.07.2009, Бюл. №1. – 6 с.
7. Труфанов В. В. Мельница МБ-15-01 с новыми дисками / В.В. Труфанов, А.П. Барбицкий, М.Н. Яровой, А.В. Алныкина // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2010. – №10. – С. 15-16.
8. Труфанов В.В. Снижение удельной энергии дробления ударно-центробежного измельчителя / В.В. Труфанов, Е.С. Тарабрин, Р.А. Дружинин // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2013. – Вып. 2 (37). – С. 277-281.
9. Федоренко И.Я. Ресурсосберегающие технологии и оборудование в животноводстве / И.Я. Федоренко, В.В. Садов. – Москва : Лань, 2012. – 304 с.
10. Федоренко И.Я. Технологические процессы и оборудование для приготовления кормов / И.Я. Федоренко. – Москва : Форум, 2011. – 176 с.