

## НЕКОТОРЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЕЗИНОВЫХ ФУТЕРОВОК БАРАБАННЫХ МЕЛЬНИЦ

Дырда В.И., ИГТМ НАН Украины  
Дюкарев В.П., АК «АЛРОСА», Россия  
Чижик Е.Ф., «ПОЛИМЕТ», Украина

**Общие сведения.** В общем и специальном машиностроении резиновые детали выполняют самые различные функции: защищают машины от вибронагрузок и износа, выполняют функции уплотнений и средств защиты от звукового давления, служат компенсаторами перекосов и неточностей монтажа, служат также в качестве упругих звеньев для передачи усилий и крутящего момента и т.д. Во всех случаях использования резиновые детали практически не соприкасаются с технологической нагрузкой и напрямую не оказывают влияния на технологический процесс. Их влияние может быть лишь косвенным, например, в вибрационных машинах, где упругие звенья определяют режим работы машины, влияя, в основном, на амплитуду и частоту колебаний рабочего органа.

Вместе с тем, имеется особый класс резиновых деталей – рабочие поверхности машин: футеровки, сита – которые помимо защиты рабочих органов машин от динамических нагрузок и износа принимают также непосредственное участие в технологическом процессе. Более того, в ряде случаев, как, например, в барабанных мельницах, такие детали определяют важные параметры технологического режима процесса измельчения и весомо влияют на качество исходного продукта.

Рассмотрим более подробно некоторые особенности их проектирования, акцентируя основное внимание на резиновых футеровках барабанных мельниц.

По видам мелющих тел мельницы различаются на шаровые, стержневые и самоизмельчения [1,2]. Барабанные мельницы, например, типов МШЦ (мельницы шаровые с центральной загрузкой) и МШР (мельницы шаровые с разгрузкой через решетку), а также мельницы ММС (мельницы мокрого самоизмельчения) представляют собой техническое сооружение, состоящее собственно из мельницы – вращающийся в подшипниках барабан с защитной футеровкой – привода, загрузочных и разгрузочных устройств и другого вспомогательного оборудования. Мельницы устанавливаются в технологических цепочках поточного производства и отказ любого из звеньев этой цепи может привести либо к остановке всего потока, либо к отказу его отдельных участков. В связи с этим для обеспечения бесперебойной работы всей технологической цепи к надежности работы мельницы, равно как и к остальным машинам и оборудованию, предъявляются повышенные требования.

С кинематической точки зрения барабанные мельницы весьма просты. Однако с учетом динамики их работы – вращающийся барабан с футеровкой и загрузкой, привод с системой смазки и системой управления технологией процесса измельчения, большой комплекс самостоятельных загрузочных и разгрузочных устройств, вспомогательное оборудование – они представляют собой довольно сложное техническое сооружение. Следует также подчеркнуть, что составляющие этого сооружения работают в экстремальных условиях эксплуатации, т.е. при постоянных ударных и циклических нагрузках, абразивном и абразивно-усталостном изнашивании, активном влиянии внешней среды.

В таблице 1 показаны основные параметры двух мельниц с резиновой футеровкой, дающие некоторые представления о

сложности сооружения и об объеме рабочей части, защищаемой этой футеровкой.

Таблица 1

Наименование мельницы	Диаметр барабана, м	Длина цилиндрической части, м	Рабочий объем, м <sup>3</sup>	Частота вращения, об/мин
ММС 105-54	10,5	5,4	420	7,7-11,6
МШР 3,6x4,0	3,6	4,0	36	18,1

Мельница мокрого самоизмельчения ММС 105-54 (АК «АЛРОСА») предназначена для избирательной дезинтеграции алмазосодержащих руд и рассчитана на максимальную крупность куска до 1200 мм. Мельница снабжена резиновой футеровкой типа «плита-лифтер».

Мельница шаровая МШР 3,6x4,0 (ОАО «ОЛКОН» – Оленегорский ГОК) предназначена для измельчения железосодержащих руд (шары диаметром 80 мм); снабжена резиновой футеровкой типа «волновая с нишами».

В рассматриваемых мельницах резиновые футеровки непосредственно участвуют в технологическом процессе измельчения материала и защищают от ударных нагрузок и износа все рабочие зоны барабана.

**Модель барабанной мельницы с резиновой футеровкой.** Используя методы структурного анализа [3], представим барабанную мельницу в виде эргономической системы (комплекс машина – человек – оператор), находящейся в состоянии функционирования. Это означает, что процессы, которые происходят в системе, позволяют стабильно реализовать поставленную цель, а динамика системы не имеет развития, т.е.

поставленная цель в процессе эксплуатации мельницы остается практически неизменной.

Структурную схему такой системы наиболее целесообразно представить в виде модели «черного ящика» (рис. 1), выделив в отдельную подсистему резиновую футеровку. Такой подход связан, прежде всего, с той особой ролью, которую футеровка играет в технологическом процессе измельчения, а также в связи с тем, что физико-механические свойства ее не остаются постоянными в процессе эксплуатации. Поэтому резиновую футеровку как подсистему удобно представить в виде динамической модели состава [4], свойства которой за счет поврежденности материала изменяются во времени – тип так называемой динамической системы развития.

На рис. 1 показана система  $S$ , управляемая специальным блоком управления посредством вектор-функции  $\bar{U}$ ; для наглядности система помещена также внутри блока управления.

Функционирование барабанной мельницы можно рассматривать как реакцию на входные внешние возмущения  $\bar{X}$ , управляющие  $\bar{U}$  и неуправляющие  $\bar{V}$  воздействия. В общем случае мельницы с резиновой футеровкой можно представить в виде функционирующей динамической системы (внутри системы со временем происходят изменения, не изменяющие ее цель), на входе которой действует вектор-функция внешних возмущений  $\bar{X}$ , вектор-функция управления  $\bar{U}$  и вектор-функция внутренних связей  $\bar{F}$ , т.е.

$$\bar{X} = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\},$$

$$\bar{U} = \{u_1(t), u_2(t), \dots, u_k(t)\},$$

$$\bar{F} = \{f_1(t), f_2(t), \dots, f_l(t)\}.$$

При этом термин вектор-функция означает, что на входе системы действуют  $n$  возмущающих и  $k$  управляющих воздействий, которые являются функциями времени  $t$ . Вектор-функция  $\bar{F}$  учитывает взаимодействие между рабочим орга-

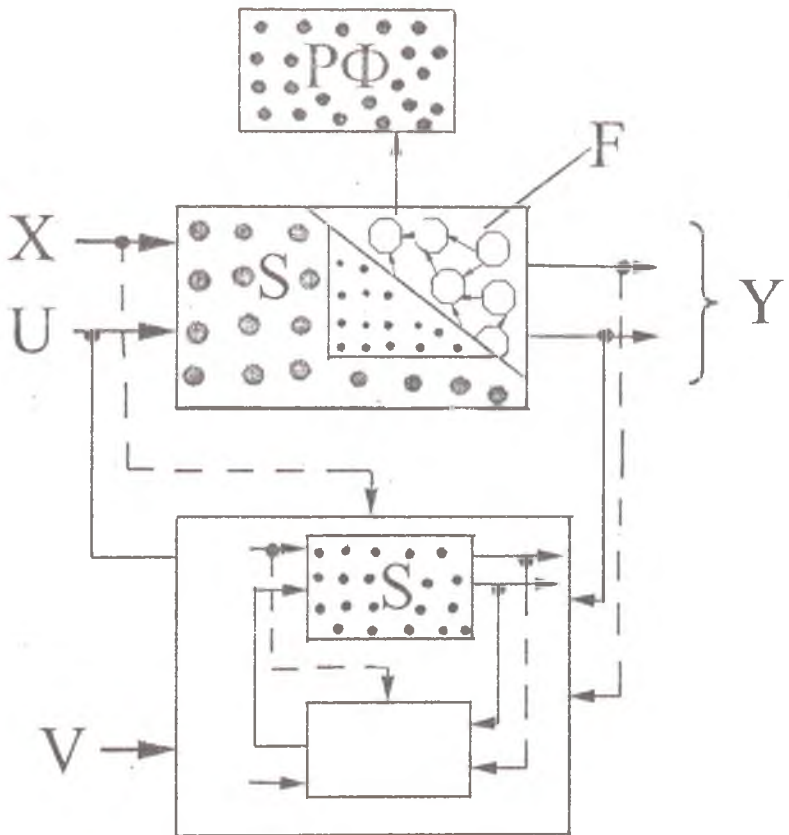


Рис. 1. Схема функционирования управляемой динамической системы:  $S$  – система;  $P\Phi$  – подсистема (резиновая футеровка)

ном (барабан с резиновой футеровкой, решеткой и т.д.) и загрузкой мельницы.

Выходные параметры системы представляет вектор-функция

$$\vec{Y} = \{y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t)\},$$

которая характеризует поведение мельницы в реальных условиях эксплуатации.

Вектор внешних возмущений  $\vec{X}$  включает массу загрузки, крутящий момент, свойства измельчающей среды и т.д.; выходной вектор  $\vec{Y}$  - расход мощности, выход исходного продукта и т.д.; вектор  $\vec{U}$  управляющих воздействий включает частоту вращения барабана, дополнительное увеличение массы загрузки шарами (при режиме полуизмельчения) и т.д.

Число компонент  $n, k, i, m$  векторов зависит от степени учета параметров, характеризующих работу мельницы в целом.

Такая информационная схема позволяет построить математическую модель мельницы, т.е. установить вид и структуру некоторого оператора  $W$ , определяющего степень преобразования машиной входящих воздействий, т.е.

$$Y = W[X, U, F].$$

Это соотношение и соответствующая схема (рис. 2) могут быть использованы для построения математической системы в пространстве состояний, т.е. фазовом пространстве. При этом под состоянием системы или ее технологического процесса обычно понимают совокупность величин, определяющих положение машины в данный момент времени, например, значением некоторой вектор-функции  $Y^*$ .

Указанная модель «черного ящика» является формальной и относится ко всем мельницам рассматриваемого типа. Чтобы получить модель заданной системы, необходимо придать ей конкретное содержание. В настоящей работе ограничимся формальной моделью, а для дальнейших исследований выде-

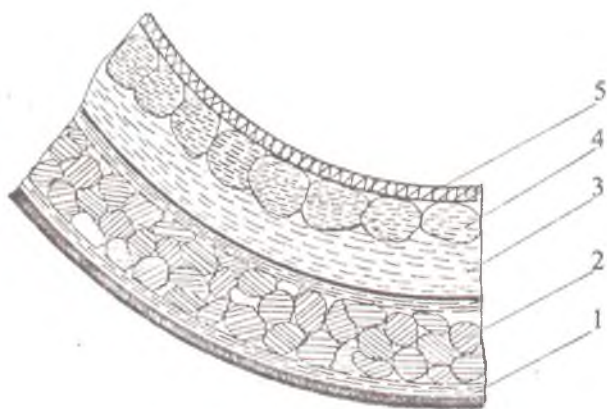


Рис. 2. Гистологическое строение стенки мышечного отделения желудка утки: 1 – адвентициальная оболочка; 2 – мышечный слой; 3 – подслизистая оболочка; 4 – слизистая оболочка; 5 – кутикула

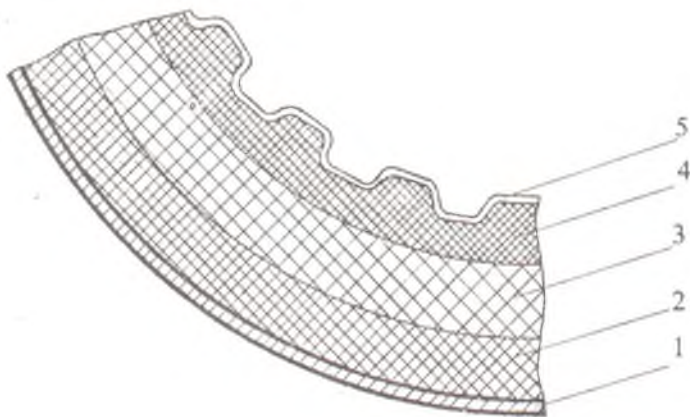


Рис. 3. Строение «идеализированной» резиновой футеровки мельницы: 1 – барабан; 2 – нижний слой; 3 – средний демпфирующий слой; 4 – наружный износостойкий слой; 5 – защитный износостойкий слой

лим место и роль, которую выполняет резиновая футеровка в структурной модели мельницы.

В кинематической схеме футеровку следует рассматривать как неотъемлемую часть барабана; в структурной схеме она определяет (наряду с другими составляющими: частотой вращения, структурой материала загрузки и т.д.) режим процесса измельчения и описывается одной из компонент вектор-функции внутренних связей  $\vec{F}$ .

**Некоторые принципы конструирования барабанных мельниц с резиновой футеровкой.** На основе многолетнего опыта эксплуатации барабанных мельниц с резиновой футеровкой можно сформулировать следующие принципы их конструирования:

1. Принцип минимума (по аналогии с законом Либиха<sup>\*\*</sup>): надежность мельницы определяется звеном, имеющим минимальную надежность; т.е. наработка на отказ мельницы в целом будет определяться долговечностью звена, имеющего самую минимальную наработку на отказ.

Из этого принципа вытекает весьма важное правило: долговечность резиновой футеровки должна быть достаточно высокой, а наработка на отказ всех ее элементов должна соответствовать межремонтному периоду барабана и привода, естественно, без учета текущих ремонтов, т.е. резиновая футеровка должна быть равнонадежной остальным элементам мельницы как по устойчивости к разрушающему действию от ударных нагрузок и износа, так и по способу крепления ее к барабану.

2. Принцип динамически совершенной системы: мельница должна обладать пониженной виброактивностью, не передавать на подшипники и фундамент чрезмерных нагрузок,

<sup>\*\*</sup> Закон Либиха – существование и выносливость организмов определяется самым слабым звеном в цепи их экологических потребностей; величина урожая определяется количеством в почве того элемента, потребность которого удовлетворяется меньше всего.



оказывать допустимое (с учетом санитарных норм) звуковое давление, иметь малый износ элементов, не нарушать экологию окружающей среды, быть безопасной в эксплуатации.

Из этого принципа вытекает, по крайней мере, два правила:

- первое: барабан вместе с резиновой футеровкой должен быть многослойным и состоять из металлической оболочки и эластичной футеровки, позволяющей достаточно эффективно противостоять ударным нагрузкам и износу, а также снижать виброактивность мельницы и звуковое давление;

- второе: для уменьшения виброн нагруженности мельницы ее подшипниковые узлы следует устанавливать на виброизоляторы; этот конструктивный прием позволяет также снизить звуковое давление.

3. Принцип стабильности процесса измельчения: резиновая футеровка не должна изменять технологический процесс измельчения в сторону ухудшения качества исходного продукта и заметно увеличить потребляемую мощность (кВт/т материала): она также должна быть экологически чистой.

**Функциональное назначение резиновой футеровки.** В рассматриваемых мельницах при вращении барабана перерабатываемый материал вместе с измельчающей средой (стержни, шары, рудная галля) с помощью специальной конструкции профиля футеровки поднимается на определенную высоту, после чего падает (скатывается, сползает) вниз.

Под действием падающей измельчающей среды и трения между слоями технологической загрузки материал измельчается. Процесс измельчения осуществляется вследствие ударных нагрузок и сил скалывания. При этом барабан с футеровкой подвергается разрушающему действию интенсивных ударных нагрузок и абразивному или абразивно-усталостному изнашиванию. От конструкции футеровки зависят технико-экономические показатели работы мельницы в целом. За счет выбора рациональной конструкции резиновой футеровки и подбора соответствующего материала можно

повысить производительность мельницы по готовому классу и качество исходного продукта, снизить удельный расход электроэнергии (кВт/т материала), повысить срок службы футеровки, снизить расход материала футеровки (г/т материала).

Таким образом, функциональное назначение резиновой футеровки следующее:

- обеспечить оптимальный режим движения измельчающей среды в барабане мельницы;

- обеспечить защиту барабана от износа и ударных нагрузок.

**Требования, предъявляемые к конструкции резиновой футеровки барабанных мельниц.** Резиновая футеровка должна обеспечивать:

- эффективную защиту металлического барабана от действия ударных нагрузок и износа, что позволило бы уменьшить толщину его стенки до минимума, естественно, не нарушая жесткости всей системы в целом;

- высокую устойчивость всех элементов против действия абразивного и абразивно-усталостного износа, особенно при малых углах встречи с измельчаемым материалом;

- унификацию элементов для различных мельниц с целью сокращения номенклатуры запасных частей; взаимозаменяемость элементов;

- простоту монтажа и демонтажа; ремонтпригодность отдельных элементов;

- экологическую чистоту исходного продукта;

- соответствие технологическому процессу измельчения: конструкция резиновой футеровки не должна ухудшать процесс измельчения и качество исходного продукта;

- малый вес, что имеет важное значение для уменьшения динамических нагрузок на подшипники и фундамент;

- устойчивость против агрессивной внешней среды;

- уменьшение вибронегруженности барабана мельницы и снижение звукового давления;

- устойчивость против ударных нагрузок и механических повреждений (порезы, сколы, вырывы и т.д.): для этого материал футеровки должен обладать достаточно высокой прочностью, быть высокодемпфирующим и иметь высокую энергию распространения трещин.

### **Использование принципов биомеханики при конструировании резиновой футеровки.**

В известной литературе имеется множество примеров когда технологические особенности и устройства заимствовались из живой природы. Достаточно привести крупные монографии [5,6] в этой области, чтобы убедиться в том, что машины, механизмы и сооружения, используемые человеком в своей практической деятельности, являются в большинстве случаев лишь слабой механистической моделью более совершенных устройств природы.

Еще Г.Галилей в книге «Беседы и математические доказательства» [6] приводил интересную аналогию между сопротивлением разрушению технических конструкций и творений живой природы: «В заключение нашей сегодняшней беседы мне хотелось бы прибавить несколько замечаний относительно сопротивления полых твердых тел, которыми как мастерство, так и природа пользуются в тысячи ладов. В них без возрастания веса достигается возрастание прочности в весьма большой степени, как то легко можно видеть на костях птиц и на тростнике, которые при большой легкости отличаются и большой сопротивляемостью изгибу и излому».

Представим процесс измельчения в барабанной мельнице, например, мельнице мокрого самоизмельчения (ММС), в виде некоторой феноменологической модели; при вращении барабана перерабатываемый материал, измельчающая среда (крупные куски руды, металлические шары, рудная галля) и пульпа, имеющая довольно агрессивный характер, в зависимости от режима – каскадного, смешанного или водопадного – формируется в виде «комка»; процесс измельчения в этом

«комке» осуществляется за счет ударных нагрузок и истирания между слоями.

Если рассматривать процесс измельчения именно так, то наиболее близкую аналогию можно найти в работе желудка птиц [7].

Желудок – *ventriculus, gaster*- состоит из двух отделений – железистого и мышечного; в железистом отделении вырабатываются ферменты; в мышечном – происходит механическая обработка пищи; в птиц мышечное отделение заменяет жевательный аппарат. Сокращается желудок ритмически 2-3 раза в минуту, имеет давление 265-280 мм ртутного столба и температуру до 42 °С. Поступившая в желудок кормовая масса вместе с ферментами формируется в виде «комка» и тщательно растирается, а находящиеся в желудке гравий и другие камни увеличивают степень дробления.

Стенка измельчительной части желудка (рис. 2) состоит из слизистой оболочки с подслизистой основой, мышечной и адвентициальной оболочек. Мышечная оболочка образована гладкой мышечной тканью и состоит из трех слоев; адвентициальная (наружная оболочка) образована фиброзной соединительной тканью с большим количеством эластических волокон; слизистая оболочка состоит из эпителия, вырабатывающего вязкую слизь, и рыхлой соединительной ткани. Поверхность слизистой покрыта плотной кератино-подобной пленкой – кутикулой, которая в процессе истирания самовосстанавливается. Поверхность кутикулы покрыта столбиками, которые обуславливают ее шероховатость и улучшают способность к перетиранию пищи. Кутикула вместе со слизью предохраняет слизистую оболочку от механических повреждений; кутикула способствует также перетиранию пищи.

Как видно, технологический процесс измельчения материала в барабанной мельнице и желудке птицы (исключая, естественно, его физиологическую сторону) в механическом смысле вполне совпадает. Для дальнейших исследований выделим некоторые особенности строения желудка (следует

подчеркнуть, что эти особенности с небольшими изменениями характерны [8] для гистологического строения всех элементов пищеварительного тракта большинства животных, птиц и человека).

1. Механическую модель желудка можно представить в виде многослойной эластической оболочки, в которой с помощью мышечной энергии измельчается «комочек» твердого материала; процесс измельчения осуществляется в основном за счет истирания между слоями загрузки, в том числе с помощью более твердой измельчающей среды (гравий, камни).

2. Стенка желудка представляется многослойной и состоит из трех основных слоев: внешнего слоя из прочных гибких соединительнотканых волокон; среднего мышечного слоя и внутреннего слизистого слоя, состоящего из рыхлой соединительной ткани, у птиц она дополнительно покрыта плотным износостойким слоем (кутикулой).

3. С точки зрения динамики наибольшую прочность и жесткость имеет внешний слой; наибольшую диссипацию средний и внутренний слои; наибольшую сопротивляемость к истиранию имеет внутренний слой.

4. Защита мышечного слоя от механических повреждений и слизистой от повреждения и изнашивания обеспечивается как особенностями строения слизистой оболочки (рыхлая ткань с большим коэффициентом диссипации, наличие на поверхности многочисленных сосочков, складок, самовосстанавливающейся износостойкой пленки кутикулы и т.п.), так и выделением особой слизи, которая существенно уменьшает трение между «комочком» пищи и слизистой (в суставах для этой же цели служит синовиальная жидкость).

Если рассматривать желудок с чисто механической точки зрения, то следует подчеркнуть, что именно отмеченные особенности его строения обеспечили создание такой совершенной системы защиты мышечного слоя от повреждений и изнашивания. Часть этих особенностей, безусловно, можно использовать при создании защитных резиновых футеровок и

покрытий машин, в том числе и рассматриваемых конструкций барабанных мельниц.

**Основные принципы конструирования резиновых футеровок.** Все сказанное выше позволяет сформулировать в общих чертах основные принципы конструирования многослойных футеровок барабанных мельниц и других машин и сооружений, в которых имеются большие потоки крупнокусковой руды, и ударные нагрузки сочетаются с интенсивным изнашиванием, мельницы других типов, кузова автомобилей, горные питатели, рудоспуски и т.д. Безусловно, автоматическое перенесение особенностей гистологического строения стенки желудка на конструкцию резиновой футеровки вряд ли возможно, а в некоторых случаях и экономически нецелесообразно. Поэтому ниже ограничимся общими принципами для создания варианта «идеализированной» (рис. 3) конструкции футеровки.

1. Резиновая футеровка должна быть многослойной; толщина каждого слоя диктуется следующим: диаметром барабана, крепостью руд, режимом измельчения, наличием крупных кусков руды и металлических шаров и т.д.

2. Верхний слой футеровки (непосредственно примыкающий к барабану) должен обладать большой прочностью, жесткостью и низкими релаксационными свойствами – время релаксации по возможности должно быть минимальным, последнее условие необходимо для более надежного метода крепления футеровки к барабану с помощью механической системы «винт-гайка».

3. Средний слой должен состоять из высокодемпфирующего материала, способного поглощать большие ударные нагрузки и предохранять (совместно с верхним слоем) металлический барабан от разрушительного действия ударных нагрузок.

4. Нижний слой должен состоять из высокоэластического износостойкого материала, он непосредственно соприкасается с перерабатываемой средой и поэтому испытывает как

ударные нагрузки, так и интенсивное истирание с механическим повреждением верхнего слоя: сколы, острые порезы и т.д. Поэтому нижний слой футеровки должен быть защищен:

- специальной жидкостью, уменьшающей трение;
- защитным слоем более износостойкого материала, например, полиуретаном, сплавом металлов и т.д.;

- иметь специальную конструкцию поверхности, позволяющую снижать ударные нагрузки за счет: а) эластичных гребней для эффективного уменьшения ударных импульсов (принцип «поддаться, чтобы устоять»); такой профиль футеровки особенно важен при малых углах встречи футеровки с измельчаемым материалом, т.е. при наличии так называемого эффекта контакта при скольжении «комка» загрузки; б) специальных ниш, которые в процессе эксплуатации заполняются измельченным материалом и металлическими шарами, создавая тем самым некоторый промежуточный слой типа «третьего слоя»; такой слой предохраняет резиновую футеровку от ударных нагрузок и износа и для некоторых мельниц является довольно эффективным; так, на мельницах мокрого самоизмельчения в линии измельчения российско-монгольского предприятия «ЭРДЭНЭТ» установлена футеровка, на поверхности которой были выполнены ниши, заполняемые в процессе работы шарами и измельченным материалом. Нарботка на отказ такой футеровки повысилась на 50 % по сравнению с футеровкой обычной конструкции.

В той или иной степени эти принципы уже использованы в известных конструкциях резиновых футеровок горных машин и оборудования [2,9]. Однако, долговечность их, особенно для мощных барабанных мельниц, пока не удовлетворяет инженерную практику. Поэтому изложенные принципы, безусловно, будут полезны при создании новых более совершенных конструкций резиновых футеровок.

## Список литературы

1. Бедрань Н.Г. Машины для обогащения полезных ископаемых. – М.: Недра, 1980. - с.
2. Повышение износостойкости горно-обогатительного оборудования / Н.С. Пенкин, Е.П. Капралов, В.П. Маляров, А.А. Тарасенко, А.И. Денисенко, Е.Ф. Чижик. – М.: Недра, 1992. – 270 с.
3. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. – М.: Высшая школа, 1989. – 367 с.
4. Чижик Е.Ф., Дырда В.И. Феноменологическая модель разрушения резины при абразивно-усталостном износе // Геотехническая механика. – Днепропетровск: Полиграфист, 1999. - Вып. 11. – С. 226-256.
5. Дж. Эдсолл, Х. Гатфренд. Биотермодинамика. – М.: Мир, 1986. – С. 220.
6. Галилей Г. Избранные труды. – М.: Наука, 1964. – Т. 2.
7. Селянский В.М. Анатомия и физиология сельскохозяйственной птицы. – М.: Агропромиздат, 1986. – С. 273.
8. Вилли К. Биология. – М.: Мир, 1968. – С. 808.
9. Дырда В.И., Чижик Е.Ф., Кияшко В.И., Карачабан Н.Г. Резиновые детали в инженерной практике. – Днепропетровск: Полиграфист, 1998. – 303 с.