

УДК 621.926.5

С.М. Фёдоров

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИКИ ДВИЖЕНИЯ ШАРОВ В БАРАБАННОЙ И ВИБРАЦИОННОЙ МЕЛЬНИЦАХ

Семинар № 15

Барабанная шаровая мельница. Для изучения механики шаров в помольной камере шаровой барабанной мельницы в лаборатории кафедры горной механики и транспорта Московского государственного горного университета был смонтирован экспериментальный стенд шаровой мельницы (рис. 1).

Помольная камера 1 мельницы представляла собой цилиндрический нефутерованный барабан, который жестко закреплялся на валу электродвигателя. Одна из торцевых сторон помольной камеры была выполнена из плексигласа, что давало возможность наблюдать за механикой процессов, проходящих внутри камеры. Диаметр помольной камеры составлял 150 мм. В качестве привода 2 использовался трехфазный асинхронный электродвигатель переменного тока марки АИР63В4 мощностью 0,37 кВт. Номинальная частота вращения ротора электродвигателя составляла 1380 мин⁻¹. Электродвигатель жестко закреплялся на раме 3. Для управ-

ления приводом применялся частотный преобразователь (ЧП) марки FRS-520S ECR фирмы «Mitsubishi». При подключении двигателя через ЧП удавалось достигнуть минимального значения частоты вращения вала электродвигателя - 15 мин⁻¹.

Помольная камера заполнялась стальными шарами диаметром 10 мм на 30–40 % её объема. Движение шаров внутри помольной камеры фиксировалось с помощью видеокамеры. Затем видеоизображение в оцифрованном виде записывалось на жесткий диск ПК с целью дальнейшей обработки результатов. На рис. 2 приведены примеры видеок кадров движения шаров в помольной камере барабанной мельницы при различных режимах её работы.

Режим работы шаровой мельницы определялся частотой вращения барабана. Ниже рассмотрены режимы движения шаров в помольной камере барабанной шаровой мельницы более детально.

Каскадный режим движения шаров в помольной камере барабанной мельницы

Шары в помольной камере при каскадном режиме работы мельницы совершали циркуляционное движение в направлении вращения барабана, в данном случае против часовой стрелки, поднимаясь по круговым траекториям на угол α , и скатывались параллельными слоями каскадом

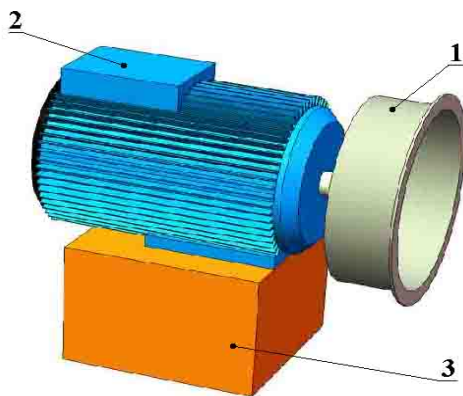


Рис. 1. Схема экспериментального стенда шаровой мельницы: 1 – помольная камера; 2 – электродвигатель; 3 – рама



Рис. 2. Видеокадры движения шаров в помольной камере барабанной мельницы при каскадном (а), водопадном режимах (б), и в режиме центрифугирования (в)

вниз.

В результате анализа видеопленки с каскадным движением шаров на рис. 3, а выделены 5 основных зон, влияющие на разрушение материала, а на рис. 3, б показаны траектории движения каждого из слоев.

В зоне 1 шары, контактирующие с внутренней стенкой помольной камеры, совершали циркуляционное движение по дуговой траектории с угловой скоростью ω_1 , которая составляла от 20 до 40 мин⁻¹. При этом слой шаров, контактирующий с внутренней стенкой барабана, перемещался с небольшим проскальзыванием относительно этой стенки, со скоростью $\omega_1 < \omega_6$. Разрушение измельчаемого материала в зоне 1 осуществляется силами трения между слоем шаров и поверхностью помольной камеры.

В зоне 2 второй слой шаров совершал циркуляционное движение с угловой скоростью ω_2 . Значение угловой скорости $\omega_2 < \omega_1$, за счет чего второй слой шаров скользил по первому слою в направлении, противоположном направлению вращения барабана. Третий слой шаров совершал вращение с угловой скоростью ω_3 , которая в свою очередь была меньше угловой скорости ω_2 , и проскальзывал по второму слою. Таким образом, в зоне 2 разрушение материала происходит за счет истирания между первым, вторым и третьим слоями.

Из зон 1 и 2 шары перемещались в зону 3. В этой зоне шары параллельными слоями каскадом скатывались вниз, в зону 4, истирая материал. Скорость движения шаров в слоях зоны 3 также была различной. Верхний слой шаров перемещался с

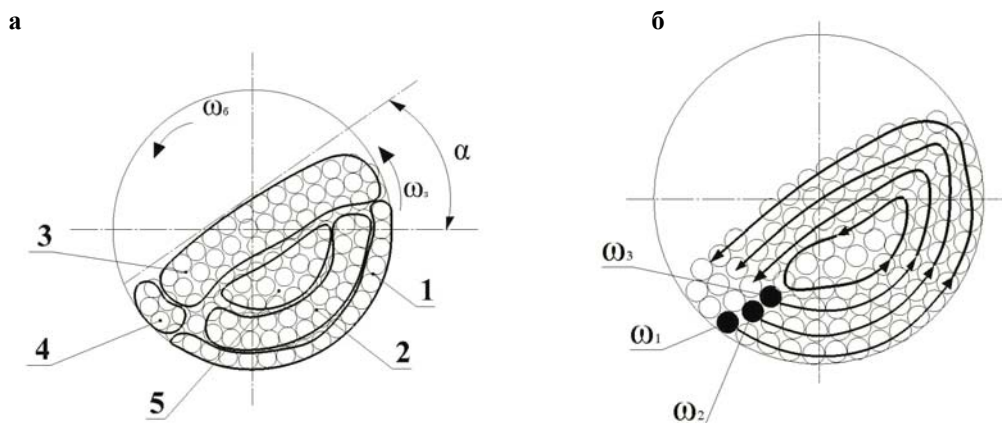


Рис. 3. Основные зоны разрушения материала в помольной камере барабанной мельницы (а), траектории движения слоев шаровой загрузки (б): ω_6 и α – угловые скорости барабана и загрузки

максимальной скоростью, а нижний с минимальной.

В зоне 4 шары соударялись с внутренней стенкой помольной камеры и вновь ложились на дуговые траектории движения. Материал в зоне 4 разрушается преимущественно за счет ударного воздействия шаров.

В зоне 5 образовывалось замкнутое малоподвижное ядро. Угловая скорость движения шаров в этой зоне была небольшой, а измельчение материала минимальное.

Таким образом, процесс разрушения материала в помольной камере барабанной мельницы при каскадном режиме её работы будет осуществляться преимущественно за счет истирания и в меньшей степени - ударом.

Водопадный режим движения шаров в помольной камере барабанной мельницы

По мере увеличения частоты вращения барабана угол наклона шаровой загрузки α увеличивался. Шары поднимались на большую высоту, по сравнению с каскадным режимом, и сходили с круговых траекторий на параболические, падая водопадом, и возвращаясь затем на круговые траектории.

На рис. 4, а выделены 4 основные зоны, движения шаров, а на рис. 4, б показаны их траектории движения в каждом из слоев.

В зоне 1 шары совершали циркуляционное движение по круговым траекториям с различными угловыми скоростями. Внешний слой шаров, контактирующий с внутренней стенкой помольной камеры, совершал вращение с угловой скоростью ω_1 , которая составляла от 120 до 160 мин⁻¹. Угловая скорость этого слоя шаров была равна угловой скорости вращения барабана мельницы. Внешний слой центробежной силой прижимался к внутренней стенке помольной камеры. Истирание материала в зоне контакта шаров и внутренней стенки помольной камеры происходить не будет. Значение угловой скорости $\omega_2 < \omega_1$, за счет чего второй слой шаров проскальзывает по первому слою в направлении противоположном направлению вращения барабана. Верхний слой в зоне 1 совершал вращение с угловой скоростью $\omega_3 < \omega_2$. В зоне 1 разрушение материала происходит за счет его истирания между слоями шаров.

В зоне 2 шары совершали движение по параболическим траекториям, причем скорость движения слоя шаров, находящегося в верхнем ряду была максимальной. По мере перехода к нижним слоям скорость движения шаров уменьшалась.

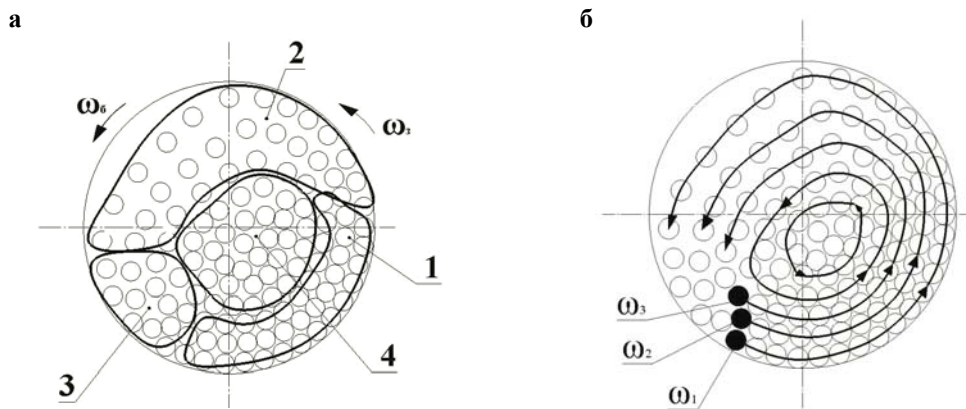


Рис. 4. Основные зоны разрушения материала в помольной камере барабанной мельницы (а), траектории движения слоев шаровой загрузки (б)

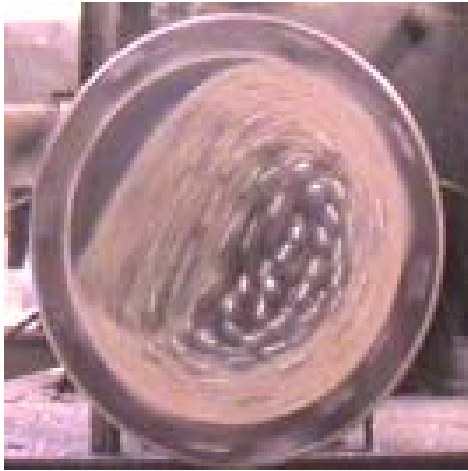


Рис. 5. Видеокادر механики шаров с материалом при водопадном режиме.

В зоне 3 шары соударялись с внутренней стенкой помольной камеры и ложились на круговые траектории, переходя в зону 1. Зона 3 – зона интенсивного разрушения материала ударом шаров о внутреннюю стенку помольной камеры.

Зона 4 является застойной зоной с малоподвижным ядром, в которой материал может только медленно истираться.

Таким образом, разрушение материал в помольной камере барабанной мельницы при водопадном режиме работы будет осуществляться в большей степени ударом в меньшей степени - истиранием и раздавливанием.

Стоит отметить два интересных факта для водопадного режима работы барабанной мельницы:

- шары большей массы и диаметра, при водопадном режиме работы загрузки, сосредотачиваются в центре загрузки, а не в крайних слоях. Этот результат можно объяснить так называемым эффектом сегрегации, т. е. шары меньшего диаметра вытесняют шары большего диаметра к центру помольной камеры и занимают место у периферии барабана;
- при наблюдении за механикой шаров с измельчаемым материалом, последний в виду малой массы и диаметра его частиц центробежной силой прижимался к стенке помольной камеры, а также

сосредотачивался между внешними слоями. В так называемой «застойной зоне» материал отсутствовал, поэтому шары в этой зоне работают «вхолостую» (рис. 5).

Режим центрифугирования шаров в помольной камере барабанной мельницы

При частоте вращения барабана выше 200 мин^{-1} все шары центробежной силой прижимались к стенке помольной камеры (режим центрифугирования). При таком режиме работы мельницы, как известно, процесс измельчения материала не происходит.

Проведенный анализ механики движения мелющих тел в шаровой мельнице углубляет представления о процессе измельчения в ней материала, хотя в основном подтверждает рекомендации [1, 2], что более грубое измельчение целесообразно осуществлять при водопадном режиме, а тонкое – при каскадном, когда разрушение происходит в основном вследствие истирания.

Горизонтальная трубная вибрационная мельница

Для изучения механики движения шаров в помольной камере горизонтальной трубной вибрационной мельницы был смонтирован вибрационный стенд, схема которого представлена на рис. 6. Стенд позволял изменять частоту вращения и статический момент дебаланса в широких пределах. Одна из торцевых сторон помольной камеры была изготовлена из плексигласа, что дало возможность наблюдать за механикой процессов, проходящих внутри камеры. Диаметры шаров и помольной камеры составляли соответственно 10 мм и 150 мм. Амплитуда колебаний помольных камер варьировалась в пределах 2–10 мм. Для изменения частоты колебаний использовался частотный преобразователь, обеспечивающий регулирование частоты вращения вала электродвигателя. Движение

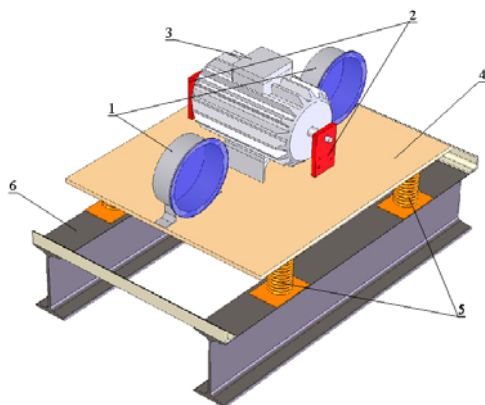


Рис. 6. Схема вибрационного стенда: 1 – помольные камеры; 2 – дебалансы; 3 – электродвигатель; 4 – плита; 5 – пружины; 6 – рама

Механика шаров в помольной камере вибрационной мельницы при резонансном режиме работы

В результате анализа видеофильмов в барабане вибрационной мельницы можно выделить 5 зон, различающихся характером движения шаров и загрузки (рис. 8).

В зоне 1 шары расположены возле внутренней стенки помольной камеры. Они совершали циркуляционное движение с угловой скоростью $\omega_{ц}$ и вращались вокруг своего центра тяжести со скоростью $\omega_{ш}$. В этой зоне будет происходить наиболее интенсивное истирание материала, при взаимодействии “мельющее тело – материал – внутренняя стенка помольной камеры”. Скорость циркуляции $\omega_{ц}$ определялась частотой и амплитудой колебаний и находилась в диапазоне 3–17 мин⁻¹, притом, что частота колебаний барабана составляла 20 – 45 Гц. Следует, также отметить, что направление угловой скорости дебалансов $\omega_{д}$ противоположно направлению циркуляции $\omega_{ц}$.

шаров внутри помольной камеры фиксировалось с помощью видеокамеры. Видеоизображение в оцифрованном виде записывалось на жесткий диск ПК с целью дальнейшей обработки результатов. Помольная камера была заполнена на 70 % своего объема стальными шарами.

На рис. 7 приведены примеры видеокадров движения шаров в помольной камере вибрационной мельницы при различных режимах работы.

Ниже рассмотрены варианты движения шаров в помольной камере вибрационной мельницы более детально (см. рис. 7).

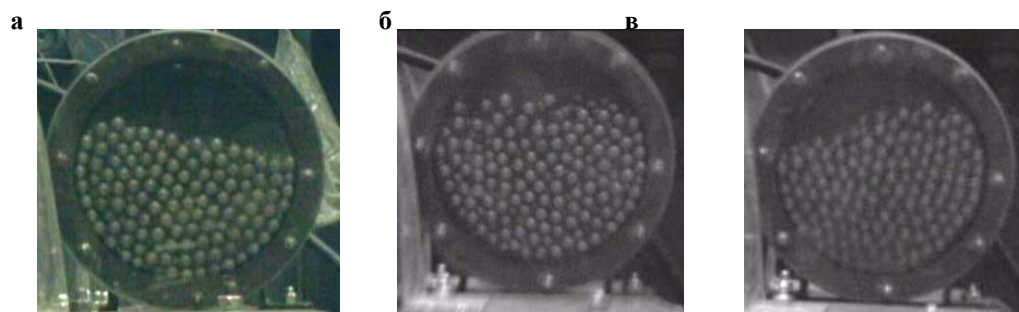


Рис. 7. Видеокадры движения шаров в помольной камере вибрационной мельницы: а – зарезонансный режим; в – дорезонансный режим; б – резонансный режим

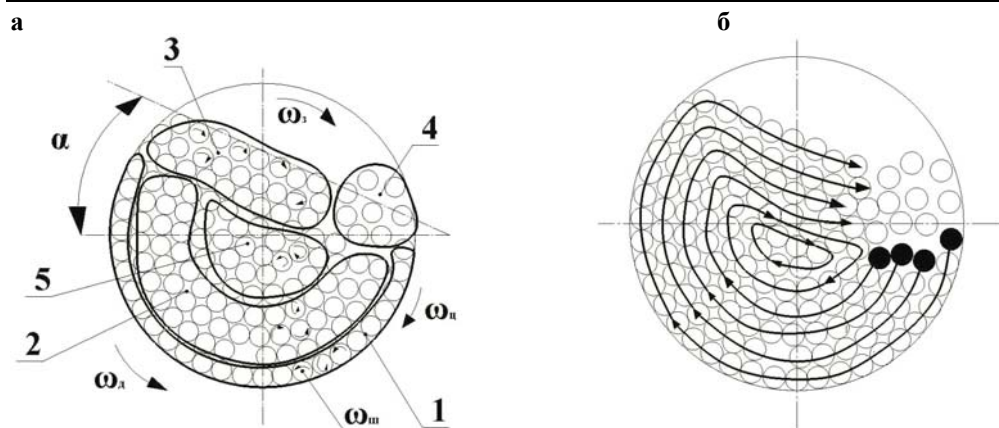


Рис. 8. Основные зоны разрушения материала в помольной камере вибрационной мельницы (а), траектории движения слоев шаровой загрузки (б)

В зоне 2 шары вращались хаотично относительно своих центров и циркулировали с угловой скоростью близкой к ω_2 . Истирание материала в этой зоне меньше, чем в зоне 1. Стоит отметить тот факт, что все слои шаровой загрузки вращались в помольной камере без проскальзывания относительно соседнего слоя.

Из зон 1 и 2 шары попадали в зону 3, а затем в зону 4. В зоне 3 происходит ударно - истирающее разрушение материала, а в зоне 4 – ударное. Чем выше был угол наклона загрузки α , тем с большей скоростью и ударным импульсом шары скатывались, соударяясь с шарами, находящимися слоем ниже, и попадали в зону 4. За счет увеличения угла наклона загрузки α возрастают ударные импульсы шаров в зоне 4. На величину угла α влияют частота вращения и статический момент дебаланса. С ростом частоты и амплитуды колебаний угол увеличивается и достигает максимального значения, при котором дальнейшее увеличение амплитуды и частоты колебаний не влияют на изменение угла α .

Значения скорости вращения шаров вокруг своего центра тяжести в зонах 1, 2, и 3 различны и были в пределах $\omega_{ш} = 120 - 180$ об/мин.

В застойной зоне 5 разрушающее воздействие шаров на материал минимально, так как ударные импульсы шаров, передаваемые от нижней внутренней стенки помольной камеры, в результате демпфирования резко уменьшаются. Материал в этой зоне практически не разрушается. Наличие неэффективной зоны 5 и её увеличение ведёт к уменьшению пропускной способности мельницы, производительности, и, как следствие, повышению удельных энергозатрат на её измельчение.

Эти результаты исследований механики движения шаров наглядно показывают, почему нельзя добиться повышения производительности горизонтальных вибрационных мельниц увеличением диаметра их барабанов и подтверждают рекомендации работ [3].

Таким образом, процесс измельчения материала в помольной камере при резонансном режиме работы мельницы будет происходить за счет:

- истирания о внутреннюю стенку при циркуляции загрузки относительно неподвижной камеры;
- истирания материала между шарами, вращающимися вокруг своего центра;
- высокочастотного ударного воздействия шаров на материал.

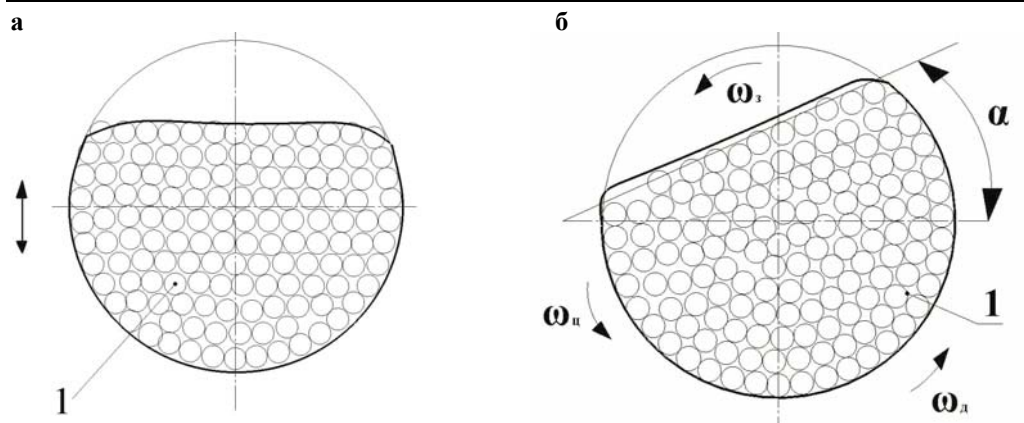


Рис. 9. Схемы расположения шаров в помольной камере вибрационной мельницы в резонансном (а) и дорезонансном (б) режимах

Механика шаров в помольной камере вибрационной мельницы при резонансном режиме работы

При резонансном режиме работы мельницы движения шаров по сечению камеры были однообразными. Ударные импульсы передавались от внутренней стенки сечению помольной камеры (рис. 9, а), контактирующему со стенкой слою шаров и далее шарам соседних слоев.

Режим характеризуется большими амплитудами колебаний шаровой загрузки, значительно превышающими амплитуды колебаний при зарезонансном режиме. Траектории колебаний близкие к линейным (на рис. 9, а обозначены стрелками). Застойной зоны при данном режиме не наблюдалось. Резонансный режим можно рекомендовать при грубом разрушении материала.

Процесс измельчения материала при резонансном режиме осуществляется в основном за счет ударных воздействий шаров.

Механика шаров в помольной камере вибрационной мельницы при дорезонансном режиме работы

В дорезонансном режиме работы шаровая загрузка в помольной камере вращалась в ту же сторону, что и дебаланс.

При этом также как и в резонансном режиме характер движения шаров был однообразным (рис. 9, б)

Однако в отличие от зарезонансного режима загрузка совершала циркуляционное движение с образованием угла α в сторону вращения дебаланса. Частота вращения загрузки ω_n была невысокой и составляла 3-5 мин^{-1} при частоте вращения дебалансов 480 мин^{-1} . Застойной зоны и вращения шаров вокруг их центров тяжести не наблюдалось. Амплитуда колебаний загрузки, так же, как и при резонансном режиме была высокой. Дорезонансный режим можно рекомендовать для грубого измельчения материала.

На рис. 10 приведены схемы движения шаровой загрузки в помольных камерах вибрационной мельницы при различных режимах её работы.

Как видно из рисунка движение шаров и направления их циркуляции в зарезонансном режиме противоположно направлению вращения дебалансов, а в дорезонансном режиме эти направления совпадают.

Вывод

- Механика шаров в барабанной шаровой мельнице при каскадном режиме работы и в вибрационной мельнице при зарезонансном режиме похожи: в помоль-

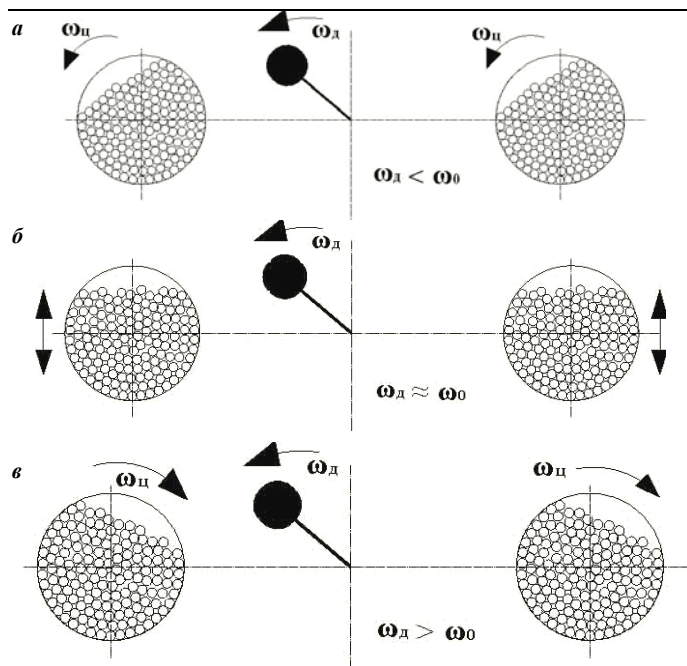


Рис. 10. Схемы вращения загрузки в помольных камерах вибрационной мельницы: а – дорезонансный режим; б – резонансный режим; в – зарезонансный режим; ω_0 – круговая частота упругих элементов (пружин), 50 с^{-1}

ных камерах обеих мельниц можно выделить 5 основных зон разрушения материала; наблюдается угол наклона загрузки α ; застойная зона находится в центре загрузки; происходит процесс истирания материала между слоями. Отличия: частота соударений шаров в барабанной мельнице на порядок меньше,

чем в вибрационной мельнице; направление вращения загрузки в барабанной мельнице совпадает с направлением вращения барабана, в то время как в вибрационной мельнице загрузка вращается в противоположную сторону по отношению к вращению дебаланса.

- Исходя из механики движения шаров в мельницах, разрушение измельчаемого материала более эффективно происходит в вибрационной мельнице за счет истирания материала при вращении шаров вокруг их центров тяжести, такое вращение шаров в барабанной мельнице не наблюдается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Серго Е.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. – М.: Недра. 1985.
2. Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. – М.: Недра. 1980.
3. Балаян В.А. Диссертация к.т.н. «Определение рациональных параметров наклонных вибрационных мельниц для измельчения отходов карбонатных карьеров». М., 1982.

Коротко об авторах

Фёдоров С.М. – аспирант, кафедра «Горная механика и транспорт», Московский государственный горный университет.