

УДК 621.926.4

Вайтехович П.Е.*УО «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск, Беларусь***САМОБАЛАНСИРОВКА РОТОРА
БЫСТРОХОДНЫХ УДАРНЫХ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ**

Аннотация. В статье проведен анализ причин разбалансировки ротора быстроходных ударных мельниц и последствий этого явления. Приведено обоснование использования способа самобалансировки ротора, основанного на текучести жидких и сыпучих сред. Дано теоретическое подтверждение возможности самобалансировки с помощью текучего материала, в качестве которого предлагается применять мелкие металлические шарики.

Ключевые слова: ударный измельчитель, ротор, центробежная сила, жидкость, давление, самобалансировка, сыпучая среда, мелкие шарики.

Vaitekovich P.E.*Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus***ROTOR SELF-BALANCING OF QUICK-MILLING IMPACT GRINDERS**

Abstract. The article provides an analysis of the reasons for the imbalance of the rotor of high-speed impact mills and the consequences of this phenomenon. The rationale for the use of the method of self-balancing of the rotor, based on the fluidity of liquid and granular media. Theoretical confirmation of the possibility of self-balancing with the help of a fluid material, which is proposed to use small metal balls, is given.

Keywords: impact grinder, rotor, centrifugal force, liquid, pressure, self-balancing, granular medium, small balls.

Введение. Ударные измельчающие агрегаты широко используются во многих отраслях промышленности. Это помол сырьевых компонентов и клинкера в производстве цемента, измельчение стеклобоя, обогащение калийных руд. Ударные измельчители по сравнению с традиционными барабанными мельницами характеризуются меньшими удельными энергозатратами на проведение процесса помола [1]. Одновременно с этим, общая интенсивность износа рабочих органов в ударных измельчителях меньше, чем в барабанных. Однако даже самый большой износ мелющих тел (шаров, стержней), футеровки в барабанных мельницах не нарушает принципиально работу агрегата как механической системы, хоть и влияет на эффективность помола, производительность, удельные энергозатраты. В быстроходных же мельницах ударного действия даже на порядок меньший износ, неравномерный износ рабочих органов приводит к разбалансировке ротора и, как следствие, к вибрации, биениям. В результате разбиваются подшипники, изнашивается вал, элементы привода. Предотвращение этих нежелательных явлений требует частой остановки измельчителя для замены ударных элементов и последующей балансировки ротора. В зависимости от измельчаемого материала ресурс безостановочной работы ударных мельниц составляет в среднем несколько сотен часов, а в отдельных случаях даже менее ста часов. Увеличение этого ресурса в условиях реального производства является весьма актуальной задачей.

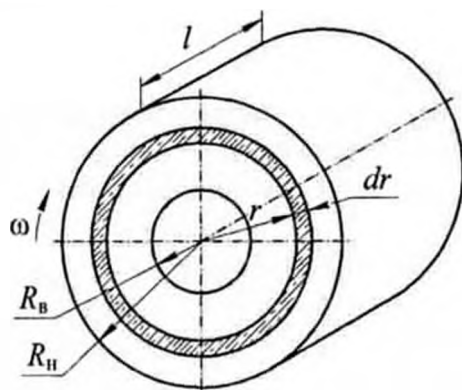
Основная часть. Как отмечается в теории решения изобретательских задач [2], идеальный конечный результат достигается тогда, когда объект «сам» преодолевает

имеющееся в нем противоречие, проблему. Это ключевое слово дало импульс на поиск путей решения проблемы в направлении самобалансировки. Она должна заключаться в том, что на вращающемся роторе необходимо наличие какого-то элемента, скорее всего подвижного, который компенсирует разбалансировку.

Анализ работы различного технологического оборудования в смежных отраслях промышленности показал, что существуют и успешно работают такие агрегаты. Это, прежде всего, центрифуги для разделения суспензий [3] в химической и пищевой промышленности. Подвижным элементом, обеспечивающим самобалансировку, в них является жидкость – жидкая фаза обрабатываемых суспензий.

Рассмотрим теоретические предпосылки такой самобалансировки с использованием расчетной схемы, рисунок 1.

Во вращающийся ротор центрифуги подается жидкая смесь. Под воздействием инерционной центробежной силы она равномерно распределяется по его стенкам, образуя своеобразную трубку толщиной $\delta = R_n - R_b$. Для того, чтобы определить центробежную силу, удерживающую слой смеси на стенках, выделим по ее толщине элементарный участок (трубку) толщиной dr и длиной l .



ω – скорость вращения; r – внутренний радиус элементарной трубки; R_b, R_n – внутренний и наружный радиусы жидкости
Рисунок 1. – Расчетная схема

Центробежная сила, действующая на него:

$$dF_{iu} = dm \cdot \omega^2 \cdot r. \quad (1)$$

Масса dm элементарной трубки:

$$dm = \rho \cdot dV = \rho \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \cdot l, \quad (2)$$

где ρ – плотность жидкой смеси;

dV – объем элементарной трубки.

Центробежная сила, которая возникает при вращении всего слоя толщиной δ :

$$F_{iu} = \int_{R_b}^{R_n} dF_{iu} = 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot l \cdot \omega^2 \int_{R_b}^{R_n} r^2 dr. \quad (3)$$

После интегрирования и подстановки пределов получим:

$$F_{iu} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot l \cdot \omega^2 \cdot (R_n^3 - R_b^3)}{3}. \quad (4)$$

Давление, которое оказывает смесь на стенки ротора:

$$p = \frac{F_{iu}}{S} = \frac{F_{iu}}{2 \cdot \pi \cdot R_n \cdot l}, \quad (5)$$

где S – площадь боковой поверхности ротора.

С учетом (4) формула для определения давления примет вид:

$$p = \frac{\rho \cdot \omega^2 \cdot (R_n^3 - R_b^3)}{3 \cdot R_n}. \quad (6)$$

По формуле (6) можно определить давление в любой точке по толщине слоя δ . Для этого вместо R_n надо подставить ее текущий радиус.

Конструкционно самобалансирующий элемент должен быть выполнен по образцу центрифуги в виде цилиндрической камеры, а лучше двух камер, заполненных жидкостью и прикрепленных по торцам ротора, например, молотковой мельницы. Тогда на жидкость в камере будет действовать две центробежные силы: от массы жидкости $F_{1ц}$ и массы молотков $F_{2ц}$. При хорошо сбалансированном роторе суммарная сила инерции равномерно распределяется по окружности ротора. Также равномерно в виде слоя одинаковой толщины распределяется и жидкость в дополнительных камерах. Давление в любой точке по окружности этого слоя будет одинаковым.

Центробежная сила, действующая на молоток:

$$F_{2ц} = m_m \cdot \omega^2 \cdot R_m, \quad (7)$$

где m_m – масса молотка;

R_m – радиус от оси вращения до его центра тяжести.

Общее давление на жидкость при этом:

$$p = \frac{F_{1ц} + F_{2ц}}{S}. \quad (8)$$

Схема действия этих сил показана на рисунке 2.

При хорошо сбалансированном роторе силы $F_{2ц}$ взаимно уравниваются. Жидкость в самобалансирующей камере под воздействием силы $F_{1ц}$ равномерно распределяется по ее стенкам – $\delta = \text{const}$. Давление во всех точках слоя жидкости тоже одинаковое.

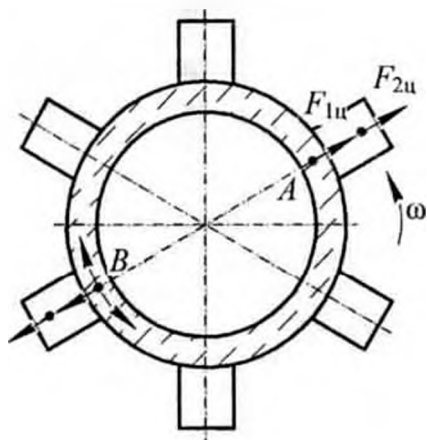


Рисунок 2. – Схема ротора молотковой мельницы с самобалансирующей камерой

В процессе эксплуатации ударные элементы изнашиваются неодинаково и, например, масса молотка, закрепленного в точке A , стала меньше, чем в точке B ($m_A < m_B$). В этом случае и центробежная сила $F_{2ц}$ в этой точке уменьшится пропорционально массе. Естественно, что и давление жидкости в соответствующем сечении самобалансирующей камеры станет меньше. А, как известно из гидродинамики, жидкость всегда движется из точки B с большим давлением к точке A с меньшим. Это движение продолжается до тех пор, пока давление по всему слою жидкости в камере не выровняется. И так жидкость реагирует на любое изменение центробежных сил $F_{2ц}$, действующих на ударные элементы (молотки), и способствует предотвращению такого нежелательного явления, как разбалансировка.

Открытым остается вопрос о жидкости, которую можно использовать для самобалансировки. Вода для этой цели малопригодна, поскольку ее плотность почти в восемь раз меньше плотности стали, из которой выполнен ротор измельчителя. Чтобы размеры самобалансирующей камеры были не очень большими, плотность жидкости должна быть, по возможности, больше плотности конструкционного материала.

Первым, что появляется в фокусе мысли, это жидкие металлы, например, ртуть. Но это экологически опасное вещество, и применять его в условиях производства недопустимо. С другой стороны, функции жидкости может выполнить сыпучая среда. Более того, многочисленными исследованиями [4] доказана идентичность расчетных уравнений и законов их движения.

Наиболее доступной сыпучей средой можно считать кварцевый песок. Однако из-за меньшей плотности по сравнению с металлами и высокой абразивности он не очень подходит для самобалансировки. Более приемлемым материалом для этих целей могут стать мелкие металлические шарики, например, свинцовая дробь. Указанный материал доступен, малоабразивен. И что самое главное, атомная масса свинца почти в четыре раза выше, чем железа. Конечно, насыпная масса будет немного меньше, но это не окажет существенного влияния на положительные качества сыпучей среды в виде мелких шариков.

Выводы. Таким образом, в данной статье приведено обоснование использования одного из способов самобалансировки рабочих органов быстроходных ударных измельчителей. Способ основан на текучести и самобалансирующих свойствах жидкой среды. Причем в качестве такой среды предложено применять аналог жидкости – сыпучую среду в виде мелких металлических шариков. Конечно, такая самобалансировка не продлит срок службы ударных элементов до бесконечности, но увеличен он будет существенно.

Список использованных источников

1. Вайтехович, П.Е. Интенсификация и моделирование процессов диспергирования в поле инерционных сил: монография / П.Е. Вайтехович. – Минск: БГТУ, 2008. – 220 с.
2. Альтшуллер, Г.С. Найти идею. Введение в теорию решения изобретательских задач / Г.С. Альтшуллер. – Новосибирск: Наука, 1991. – 225 с.
3. Шкоропад, Д.Е. Центрифуги и сепараторы / Д.Е. Шкоропад, О.П. Новиков. – М.: Химия, 1987. – 384 с.
4. Генералов, М.Б. Механика твердых дисперсных сред в процессах химической технологии / М.Б. Генералов. – Калуга: Издательство Н. Бочкаревой, 2002. – 592 с.

Информация об авторе

Information about the author

Вайтехович Петр Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Машины и аппараты химических и силикатных производств», УО «Белорусский государственный технологический университет» (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь), e-mail: vpe51@mail.ru.

Vaitekhovich Piotr – D. Sc. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Machines and Apparatus for Chemical and Silicate Production, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova Str., 220006, Minsk, Belarus), e-mail: vpe51@mail.ru.

Поступила в редакцию 14.01.2020 г.