

УДК 6221.926.55

Ю.В. Дмитрак, Т.А. Зиновьева

К ВОПРОСУ О СИЛОВОМ АНАЛИЗЕ ПОМОЛЬНОЙ КАМЕРЫ ВИБРАЦИОННОЙ МЕЛЬНИЦЫ

Составлена расчётная схема взаимодействия мелюшей загрузки со стенкой помольной камеры вибрационной мельницы. Проведён анализ сил, действующих на центр масс мелюшей загрузки. Произведено разбиение помольной камеры на динамические зоны. Для каждой зоны найдены значения радиальных сил, действующих на стенки помольной камеры. Расчет конструкции проведён в системе MSC. NASTRAN.

Ключевые слова: вибрационная мельница, помольная камера, схемы нагружения.

Семинар № 19

В процессе исследования влияния мелюшей загрузки на формирование динамического портрета нагружения помольной камеры вибрационной мельницы масса шаров задаётся случайной величиной, распределённой по различным законам. После проведённого статистического анализа действующих на помольную камеру нагрузок представляется возможным для дальнейших вычислений в формулы для расчёта напряжённого состояния помольной камеры подставлять значения математических ожиданий этих нагрузок.

Геометрическая модель конструкции вибромельницы показана на рис. 1. Основными ее силовыми элементами являются помольная камера, несущая рама, приводной вал с подшипниковыми узлами и дебалансами и пружины, обеспечивающие колебательные движения мельницы при работе двигателя. Опыт эксплуатации вибромельниц показывает, что наиболее слабыми местами с точки зрения прочности и долговечности конструкции являются подшипниковые узлы, несущая рама и помольная камера. В настоящей работе решено было оста-

новиться на рассмотрении вопроса о прочности помольной камеры, т. к. именно на неё первоначально передаётся действие ударных сил со стороны мелюшей загрузки. Кроме того, в МГТУ накоплен большой опыт в исследовании динамики мелюшей загрузки и созданы предпосылки для начала исследований по определению влияния динамических параметров загрузки на прочностные характеристики помольной камеры [1]-[3]. В частности, группой исследователей кафедры ТПМ было разработано устройство по определению динамических характеристик мелюшей загрузки [4]. Впервые стало возможно получить картину распределения сил, действующих на стенку помольной камеры. Эти данные легли в основу настоящей работы.

Силовое воздействие на конструкцию мельницы характеризуется силами, обусловленными ударным воздействием шаров на стенки помольной камеры. Движение мелюшей загрузки можно описать следующим образом.

В какой-то момент загрузка отрывается от стенки помольной камеры, что эквивалентно состоянию удара:

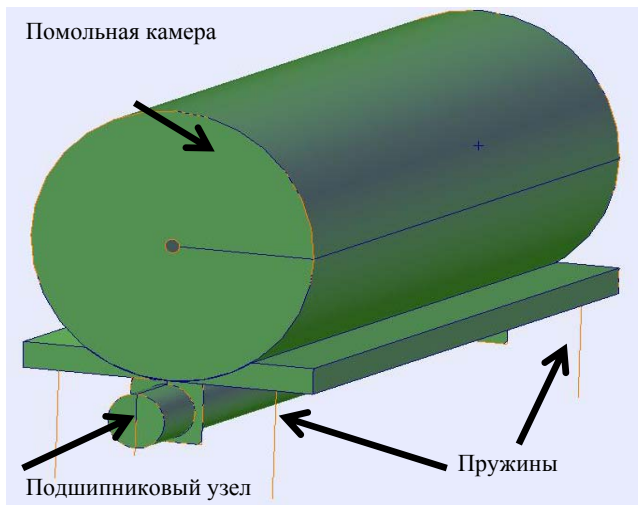


Рис. 1. Геометрическая модель конструкции вибрационной мельницы

мгновенно меняется колеблющаяся масса. На определённое время загрузка оказывается в положении невесомости, а затем происходит абсолютно неупругий удар о верхнюю стенку помольной камеры ближайшего к ней слоя шаров. Причём шары как бы нанизываются друг на друга, и в какой-то момент загрузка представляет собой одно целое. Затем она движется вниз вместе с камерой, после чего камера начинает подниматься и сталкивается с нижним слоем шаров мелюшей загрузки. Снова происходит абсолютно неупругий удар и вся загрузка поднимается вверх. Цикл заканчивается. Основной процесс измельчения материала происходит в момент, когда шары движутся по направлению к верхней и нижней частям камеры и частично к боковым частям.

Пусть амплитуда радиальной составляющей в нижней части оболочки равняется F_1 , а в верхней части – F_2 .

На шар действуют:

1) Нормальная переносная составляющая силы инерции,

$$\vec{F}_e^n = -m \cdot \vec{a}_e^n, \quad (1)$$

где a_e^n - нормальное переносное ускорение,

$$a_e^n = \omega_e^2 \cdot R, \text{ следовательно:}$$

$$F_e^n = m \cdot \omega_e^2 \cdot R,$$

где ω_e - угловая скорость вращения камеры;

2) Тангенциальная переносная составляющая силы инерции,

$$\vec{F}_e^r = -m \cdot \vec{a}_e^r, \quad (2)$$

при установившемся движении $F_e^r = 0$;

3) Нормальная относительная составляющая силы инерции,

$$\vec{F}_r^n = -m \cdot \vec{a}_r^n, \quad (3)$$

так как относительное движение является прямолинейным,

то $a_r^n = 0$ и $F_r^n = 0$.

4) Кориолисова составляющая силы инерции,

$$\vec{F}_k = 2m\vec{\omega}_e \times \vec{v}_r, \quad (4)$$

где \vec{v}_r - относительная скорость шара; так как $\vec{\omega}_e \perp \vec{v}_r$, то

$$F_k = 2m\omega_e \cdot v_r.$$

На рис. 2 показаны силы, действующие на центр масс мелюшей загрузки, зафиксированной в определённом положении. Нагрузки состоят из радиальной составляющей, которая пропорциональна массе ударных шаров, квадрату возбуждающей частоты колебаний и радиусу камеры и силы Кориолиса, направленной по касательной к оболочке. Расчёты показывают, что нормальная переносная составляющая силы инерции и сила Кориолиса являются величинами большего порядка по сравнению с другими силами, действующими на мелющую загрузку. Поэтому именно эти

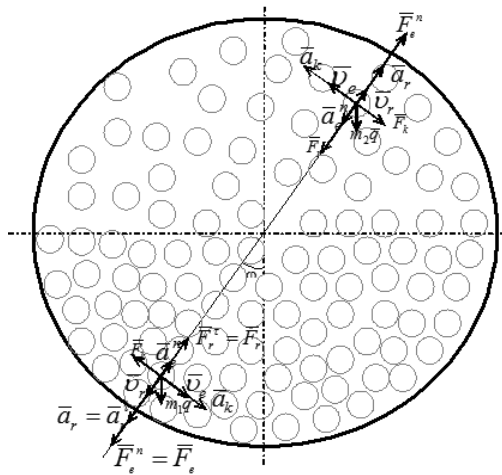


Рис. 2. Силы, действующие на центры масс мелюшей загрузки

силы в дальнейшем учитываются при проведении прочностных расчетов конструкции вибромельницы.

Характер нагружения камеры является стохастическим, при котором различные части мелюшей загрузки воздействуют в разные времена неравномерно на стенки помольной камеры. Тем не менее, из-за циклического изменения нагрузки, обусловленной поступательным движением камеры по круговой траектории, пространственную неравномерность нагружения можно считать периодической по времени. Для статического анализа конструкции мельницы можно рассмотреть квазистатические нагрузки, действующие в различные времена.

Вместе с тем значения сил, действующих на стенку помольной камеры со стороны мелюшей загрузки, носят вероятностный характер и зависят прежде всего от массы шаров, вступающих в контакт со стенкой помольной камеры в данный момент времени. Таким образом, для составления расчетной схемы нагружения помольной камеры необходимо установить

влияние массы контактирующих в данный момент времени со стенкой помольной камеры шаров на радиальную составляющую нагрузки, действующей на камеру.

При задании нагрузок в расчетной программе удобно пользоваться заданием компонент нагружения F_x и F_y . Компоненты нагружения могут быть легко получены из следующих соотношений:

$$\begin{cases} F_y = A(\varphi) \sin(\varphi) \\ F_x = A(\varphi) \cos(\varphi) \end{cases}, \quad (5)$$

где $A(\varphi)$ - амплитуда силы, действующей на камеру.

Исходя из того, что значение амплитуды силы в начальный момент времени в нижней точке ($\varphi = \frac{3\pi}{2}$)

равно F_{1e} , а в верхней точке ($\varphi = \frac{\pi}{2}$) -

F_{1e} , используя линейную интерполяцию с помощью интерполяционного полинома Лагранжа, можно записать выражения для нахождения амплитуд нагрузок на дуге $\varphi \in [\frac{\pi}{2}; \frac{3\pi}{2}]$:

$$A(\varphi) = \frac{1}{\pi} \left(F_{1e} \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) - F_{2e} \left(\varphi - \frac{3\pi}{2} \right) \right). \quad (6)$$

Тогда компоненты нагрузки в рассматриваемой части камеры могут быть записаны следующим образом:

$$F_y(\varphi) = \frac{1}{\pi} \left(F_{1e} \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) - F_{2e} \left(\varphi - \frac{3\pi}{2} \right) \right) \sin(\varphi); \quad (7)$$

$$F_x(\varphi) = \frac{1}{\pi} \left(F_{1e} \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) - F_{2e} \left(\varphi - \frac{3\pi}{2} \right) \right) \cos(\varphi) \quad (8)$$

Аналогично можно записать выражения для вычисления амплитуды и компонент радиальной нагрузки на дуге $\varphi \in [-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}]$:

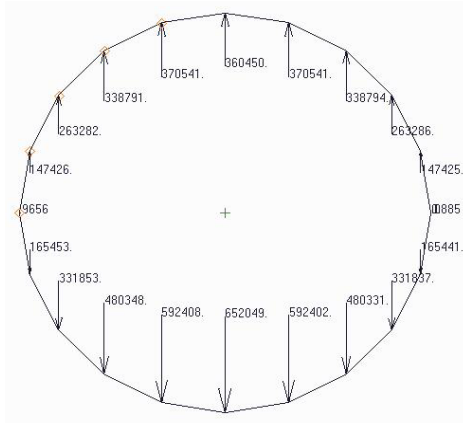
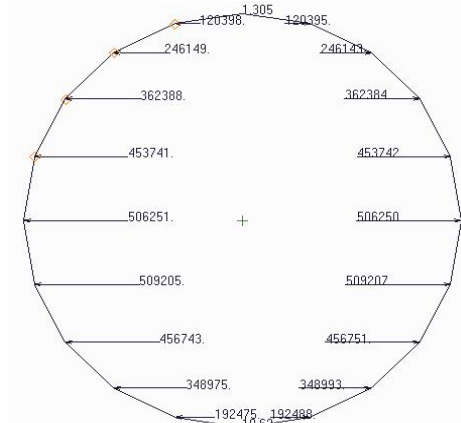
Компонента F_{y_e}Компонента F_{x_e}

Рис. 3. Базовые компоненты сил, действующих со стороны загрузки на помольную камеру

$$A(\varphi) = \frac{1}{\pi} \left(-F_{1e} \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) + F_{2e} \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) \right); \quad (9)$$

$$F_y(\varphi) = \frac{1}{\pi} \left(-F_{1e} \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) + F_{2e} \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) \right) \sin(\varphi); \quad (10)$$

$$F_x(\varphi) = \frac{1}{\pi} \left(-F_{1e} \left(\varphi - \frac{\pi}{2} \right) + F_{2e} \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) \right) \cos(\varphi). \quad (11)$$

Поскольку в системе расчета отсчет углов может начинаться со значения угла $\varphi = -\pi$, то удобным будет воспользоваться вышеприведенными формулами вычисления амплитуды и компонент нагрузки на отрезке

$$\varphi \in \left[-\pi, -\frac{\pi}{2} \right]:$$

$$A(\varphi) = \frac{2}{\pi} \left(F_{1e}(\varphi + \pi) - \frac{F_{1e} + F_{2e}}{2} \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) \right); \quad (12)$$

$$F_y(\varphi) = \frac{2}{\pi} \left(F_{1e}(\varphi + \pi) - \frac{F_{1e} + F_{2e}}{2} \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) \right) \sin(\varphi); \quad (13)$$

$$F_x(\varphi) = \frac{2}{\pi} \left(F_{1e}(\varphi + \pi) - \frac{F_{1e} + F_{2e}}{2} \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) \right) \cos(\varphi). \quad (14)$$

Для статического анализа при действии нагрузки со смещенными на определенный угол экстремальными значениями нагрузок достаточно только пересчитать компоненты нагружения в соответствующей цилиндрической системе координат, повернутой на этот угол вокруг оси Z.

На рис. 3 показаны базовые компоненты сил, действующих со стороны загрузки на помольную камеру. Амплитуды радиальной составляющей нагрузки в нижней и верхней частях камеры соответственно равнялись $F_{1e} = 652050$ Н и $F_{2e} = 360450$ Н. Амплитуды сил Кориолиса в нижней и верхней частях камеры соответственно равнялись $F_{1k} = 434700$ Н и $F_{2k} = 160200$ Н. Наиболее мощными средствами для анализа конструкций в настоящее время являются автоматизированные системы, основанные на методе конечных элементов.

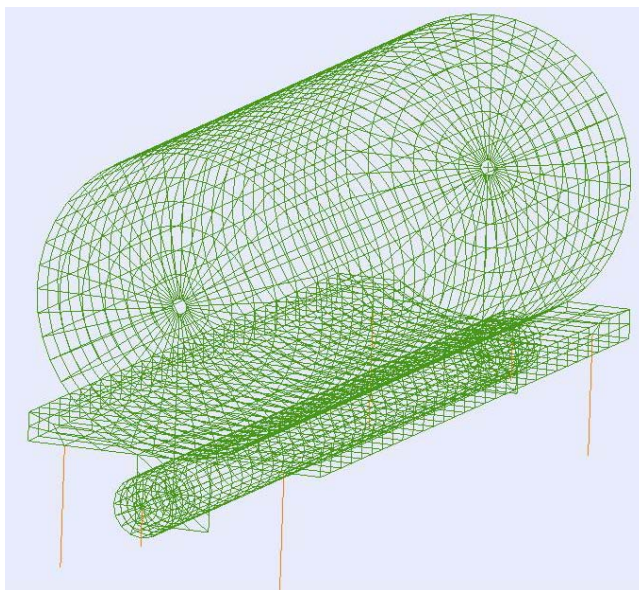


Рис. 4. Моделирование конструкции мельницы

В соответствии с этим методом производится дискретизация конструкции на мелкие конечные элементы, для которых известны способы построения элементных матриц жесткости. Как было отмечено выше, полная матрица жесткости системы получается путем суммирования таких элементных матриц. Аналогично векторы нагрузок отдельных элементов суммируются в общий вектор нагрузки на всю конструкцию. Граничные условия состоят в фиксации определенных степеней свободы отдельных узлов для избегания движения рассчитываемого объекта как твердого тела. Задача сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных перемещений по всем незафиксированным степеням свободы. После определения перемещений легко могут быть определены деформации и на-

пряжения во всех элементах конструкции.

Отметим некоторые особенности моделирования конструкции вибротмельницы. Одним из основных требований при подготовке модели была необходимость генерации элементов с надлежащей формой. Так, четырехугольные элементы должны быть как можно ближе по форме к квадрату (допускаемое удлинение элемента не должно превышать значение, равное 4), а треугольные – к равностороннему треугольнику. Контроль качества конечно-элементной сетки проводился с помощью соответ-

ствующих средств программного обеспечения. Генерация КЭ модели осуществлялась в препроцессорной программе MSC. PATRAN на основе предварительно подготовленной геометрической модели, показанной на рис. 1. Расчет конструкции проводился в системе MSC. NASTRAN.

Для моделирования помольной камеры и рамы использовались оболочечные элементы CQUAD4, а для моделирования элементов пружин – балочные элементы CBAR. Элементы CBAR также использовались для моделирования ребер для подкрепленной оболочки помольной камеры (рис. 4). Предполагалось, что вся конструкция мельницы выполнена из стали (модуль упругости $E = 210$ кПа).

В результате произведенных расчетов были получены распределения напряжений и перемещений в базовой конструкции мельницы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бедим В.В.* Обоснование и выбор параметров наклонных вибрационных мельниц для измельчения влажных отходов карбонатных, карьеров: Дисс. ... канд. техн. наук. – М.: МГУ, 1985. – 180 с.
2. *Бушуев Л.П.* Многорежимная планетарная мельница // Изв. вузов. Горный журнал. – 1965. – № 10. – С. 148–154.
3. *Дмитрак Ю.В., Красовский Б.П.* К вопросу об исследовании кинематических и динамических параметров вибрационных мельниц с большой амплитудой колебаний помольной камеры. – В сб.: Оборудование для комплексного использования сырья горного производства. – М.: МГИ, 1987.
4. *Дмитрак Ю.В.* Мелюшее тело устройства для измельчения материалов. Положительное решение от 01.12.99 по заявке № 99114492/03(015574) на получение патента РФ. **ПАТ**

Коротко об авторах

Дмитрак Ю.В. – профессор, доктор технических наук, Московский государственный горный университет, Moscow State Mining University, Russia, ud@msmu.ru
Зиновьева Т.А. – кандидат технических наук, доцент, Новомосковский институт РХТУ им. Д.И. Менделеева, rector@muctr.ru



ДИССЕРТАЦИИ

**ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ
ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ**

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН			
САВЧЕНКО Андрей Владимирович	Совершенствование скважинной технологии гидроимпульсного воздействия на горные породы при добыче полезных ископаемых	25.00.22 05.05.06	к.т.н.
ТИМОНИН Владимир Владимирович	Обоснование параметров породоразрушающего инструмента и гидравлической ударной машины для бурения скважин в горных породах	05.05.06	к.т.н.