

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИБРАТОРА С ДИСБАЛАНСОМ

Интенсификация процессов разупрочнения и разрушения горных пород связана с созданием условий снижения контактной прочности в системе породоразрушающий инструмент – горная порода, а следовательно и уменьшения величины сопротивления разрушению.

Одним из эффективных способов снижения контактной прочности при разрушении горных пород является их виброобработка акустическими упругими волнами [1].

Анализ характеристик виброакустических генераторов показал, что к наиболее перспективным генераторам (с позиций создания в широком диапазоне частот и амплитуд акустических волн) можно отнести вибратор с дисбалансом. Несмотря на широкое применение данного генератора для обработки массива в настоящее время исследования по определению его режимных характеристик слабо отражены в литературе и особенно в плане установления условий резонанса при взаимодействии вибратора с упруго-пластичной средой.

Установление кинематических и динамических характеристик вибратора (а именно, φ , $\dot{\varphi}$, $\ddot{\varphi}$, ε , a , V_i , соответственно – угла поворота, угловой скорости, углового и линейного ускорений и линейной скорости как функции времени) связано в первую очередь с определением класса смешанных колебаний: взаимодействие вынужденных колебаний и параметрических колебаний, взаимодействие вынужденных колебаний и автоколебаний, взаимодействие параметрических колебаний и автоколебаний и, наконец, взаимодействие вынужденных колебаний, параметрических и автоколебаний [2]. На практике, установление класса колебаний неразрывно связано с определением степени неидеального источника энергии, определяемой известным физическим эффектом Зоммерфельда, а следовательно и с определением вида резонансной характеристики вибратора [3].

Кроме того, установление кинематических и динамических параметров вибратора с дисбалансом тесным образом связано с динамикой распространения волн внутри колеблющегося стержня вибратора и особенно на границе

вибратор-среда, определяющей глубину и интенсивность распространения волн в массив.

Нелинейная задача определения крутильных колебаний упругого стержня механического вибратора с дисбалансом решалась методом Бубнова-Галеркина [4].

При этом предполагалось, что механический вибратор представляет собой вал, одним концом опирающийся на твердую упругую среду и несущий на другом конце массу (дисбаланс), вращающуюся под действием силы $F_{(t)}$ с моментом инерции I_z (где z – ось симметрии вала) и заставляющую вал совершать крутильные колебания вокруг оси z на величину углового смещения $\varphi_{(t)}$.

В работе [5] показано, что мгновенные удары силы $F_{(t)}$, прикладываемые бегунком к оси вибратора можно представить в виде $F_{(t)} = S \delta(t - t_0)$, где S – мгновенный импульс $S = \int_{t_0}^t F(t) dt$, δ – дельта функции Дирака.

При обхвате вала бегунком мгновенно приложенная сила имела максимум в каждой точке линии контакта цилиндра и дисбаланса (и определялась в соответствии с законом $F_0 \sin \omega t$).

При отсутствии углового ускорения величина силы, действующая на ось вибратора, находилась из выражения [6]

$$F = \frac{12\pi\nu R^3 m}{S_1 \varepsilon^3 (2 + \lambda^2 \sqrt{1 - \lambda^2})} [\bar{\omega} \times \bar{r}]. \quad (1)$$

Отсюда видно, что сила направлена перпендикулярно плоскости расположения векторов $\bar{\omega}$ и $\bar{r}$ и зависит от ν , R , ε , λ (где ν – кинематический коэффициент вязкости смазки, R – радиус вала, $\varepsilon = (R' - R)$ – разность радиусов бегунка и вала, $\lambda = \varepsilon / r$, r – величина эксцентриситета, m – масса бегунка, S_1 – площадь сечения вала). Наибольшая величина возмущающего момента была равна M_0 . Кроме того с валом был связан демпфер (частично поглотитель энергии волн крутильных колебаний). Определение кинетических характери-

стик, φ , $\dot{\varphi}$, $\ddot{\varphi}$, ε , a , V_i – ограничивалось нахождением основной характеристики колебаний φ_0 – максимального углового смещения.

Найденное уравнение крутильных колебаний методом поэтапного интегрирования имело вид:

$$\varphi_0 = -\frac{\sigma p}{(q-p)} \frac{1}{\cos\left(\sqrt{\frac{q}{p}} \omega r\right)} \left[\sin \beta \sqrt{\frac{p}{q}} \sin\left(\sqrt{\frac{q}{p}} \omega r\right) \cdot \cos \omega(\tau + \beta) + \sin \omega(t + \beta) \right], \quad (2)$$

где $\sigma = m_0/\omega^2$ — постоянный коэффициент, $m_0 = M_0/I_z$, $P = \omega^2/K_2^2$, $K_2^2 = C_2/I_z$,

C_2 — жесткость демпфера, $q = K_1^2/K_2^2 = C_1/C_2$ — отношение жесткости вала к жесткости демпфера, β — время, характеризующее опережение по фазе действующих моментов сил сопротивления от возмущающих моментов.

Величина максимального углового смещения, найденная из решения нелинейной задачи крутильных колебаний вала вибратора с дисбалансом имела вид:

$$\varphi_0 = \frac{\pi m_0}{\sqrt{K_1^2 - K_2^2} + \pi^2(K^2 - \omega^2)} \sin \left[\omega t - \arctg \left(\frac{1}{\pi} \frac{K_1^2 - K_2^2}{K^2 - \omega^2} \right) \right], \quad (3)$$

где $K^2 = \frac{1}{2}(K_1^2 + K_2^2)$.

При сравнении двух решений видно, что при отсутствии момента сопротивления, когда «треугольная характеристика» вырождается в линейную с коэффициентом жесткости системы равной C , т.е. при $K_1^2 = K_2^2$ уравнения (1) и (3) принимают обычный вид для соответствующей линейной задачи:

$$\varphi_0 = \frac{m_0}{K^2 - \omega^2} \sin \omega t.$$

Однако в условиях нелинейной возвращающей силы, такой резонанс, как в линейной задаче, не существует.

Если система имеет «жесткую» характеристику, то собственная частота увеличивается с ростом амплитуды с наклоном вправо (относительно пика резонансной кривой идеальной системы), тем больше, чем больше степень нелинейности. В случае, если система имеет «мягкую» характеристику, то амплитуда резонанса растет с наклоном влево. Такие системы называются системами с насыщением. Обычно это системы с нелинейными упругими связями, которые можно представить в виде функции перемещения $f(x)$, где x — перемещение системы. Условие насыщения системы является $\lim d[f(x)/dx] = 0$ при $x \rightarrow x_0$, т.е. кривая насыщения имеет ярко выражен-

ные асимптоты, в случае, если предел не равен нулю, то систему называют с условным насыщением. При этом для «жесткой» характеристики системы проекция силы упругости будет равна $F_x = -C_1x - C_3x^3$, а для «мягкой»

$$F_x = -C_1x + C_3x^3.$$

Анализ формулы (2) показывает, что при увеличении q (т.е. увеличении жесткости вала вибратора) амплитуда φ_0 убывает, а в случае $p = q$ амплитуда неограниченно возрастает и $\left(\sigma \cdot \frac{p}{q} - p\right) \rightarrow \infty$. По мере увеличения момента сил сопротивления, т.е. при $q > 1$, наибольшая амплитуда колебаний имеет место не при $\omega/K = 1$, а смещается в сторону увеличения ω/K (жесткая характеристика) или смещается в сторону уменьшения ω/K (мягкая характеристика).

Экспериментальные исследования характеристик вибратора с дисбалансом (как с жесткими, так и с мягкими характеристиками) показали, что для случая с большим сопротивлением $q \approx 3$, резонанс наблюдался при повороте системы на угол, кратный $n\omega r \approx 77^\circ$ (где $n = 1, 2, 3$). При малых значениях момента силы сопротивления, т.е. при $1 < q < 1,25$ угол наибольшего отклонения $n\omega r$ лежал при резонансе в пределах $88^\circ < n\omega r < 90^\circ$, что в пределах ошибки совпадало с оценками, произведенными по формулам (2) и (3).

Таким образом, теоретические и экспериментальные исследования кинематических и динамических характеристик вибратора с дисбалансом показали, что для достижения в системе резонанса при обработке пласта необходимо учитывать характеристики не только самого вибратора, но и непосредственно связывать их с характеристиками системы вибратор-среда, т.е. учитывать свойства горных пород, в соответствии с принципом Зоммерфильда для неидеальных источников колебаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Механика управления гетерогенным, упруго-наследственным горным массивом / А.Н. Зорин, Н.Н. Долинина, В.Г. Колесников. - Киев: Наук. думка, 1980. - 288 с.
2. Алифов А.А., Фролов К.В. Взаимодействие нелинейных колебательных систем с источником энергии. - М.: Наука, 1985. - 328 с.

