УДК 622.64-531.6:65.011.56

А.С. Минеев

# К ОЦЕНКЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГЕОМАТЕРИАЛЫ

*Аннотация. В работе выполнена оценка оптимальных параметров вибрационного воздействия на упругие и неупругие геоматериалы, при которых в среде достигается максимум амплитуды напряжений. В случае неупругих материалов для оптимизации предложен информативный параметр, характеризующий степень передачи виброэнергии по среде. Анализ исследований позволил рекомендовать для эффективного рыхления смезшегося геоматериала использование режима многочастотного вибровоздействия.*

*Ключевые слова: Параметры, вибрация, воздействие, многочастотные, геоматериалы, смерзшийся, энергопроводность.*

В последнее время в некоторых отраслях промышленности начинают широко внедряться вибротехнологии, позволяющие реализации процессы дезинтеграции геоматериалов с различным целевым назначением. Например, перспективным направлением является использование вибрации в транспортной промышленности для эффективной разгрузки сыпучих слипшихся или смерзшихся геоматериалов, в строительстве, а также другие технологии. для интенсификации газоотдачи земных недр [1, 2]. Эти технологии основаны на общих физических закономерностях передачи потока виброэнергии для целенаправленного изменения свойств обрабатываемых сред. Так, в результате периодически изменения напряжений при вибрационном воздействии между элементами системы возникают упругие взаимодействия, макроскопически воспринимаемые как упрочнение материала при возрастании нагрузки и разупрочнение его при пластическом деформировании в обратном направлении из чего вытекает эффект вибрационного последействия. С возрастанием числа циклов вибрации роль микроупругих эффектов доминирует над эффектом изменения внутреннего трения, величина которого с течением времени стремиться к стабилизации и поэтому в среде весьма существенное значение приобретает остаточное пластическое изменение объема – «пластическое разрыхление». Эффективность происходящих в среде изменений, в первую очередь, определяется механизмом передачи волновой энергии по среде с учетом наследуемой циклической деформации. При этом существенное значение имеет проявление диссипативных характеристик среды, сопровождающееся значительным поглощением энергии циклических деформаций, обусловленные демпфированием колебаний. Поэтому одним из важнейших вопросов при разработке вибротехнологий является установление оптимальных параметров вибрационного воздействия для максимального использования динамического эффекта при дезинтегрировании среды. При этом, прежде всего, достигаются максимальные значения напряжений. Поэтому исследуем условия вибрационной обработки геоматериалов, при которых в среде возможна реализация максимума амплитуды напряжений.

Пусть на геоматериалы с определенными физико-механическими свойствами действует вибрационный источник. Будем считать породную среду бесконечной со сферической полостью, к границам которой приложено давление, изменяющееся по гармоническому закону:

$$P = P_0 e^{i\omega t} \qquad (1)$$

где $P_0$ – амплитуда возмущающего давления; $\omega$– частота вынужденных колебаний; t – время.

Оптимальные параметры вибровоздействия определяются, прежде всего, дисперсией дилатационных волн, которая, в свою очередь, обусловлена геометрическими и физическими особенностями среды. Геометрическая дисперсия появляется при некоторых соотношениях размера объекта с длиной распространения в нем волны. Физическая - связана с воздействием волны на молекулы среды, приводя ее к неравновесному состоянию [3]. Для упругой среды модуль объемного сжатия равен $K^2 = \omega^2/C^2$, (где $C$ – скорость продольных волн) и поэтому $dK/d\omega = const$, т. е. физическая дисперсия будет отсутствовать. Если же внешнему воздействию подвергаются неупругие породы, свойства которых описываются функциональными зависимостями, то дисперсионная зависимость будет функцией от $\omega$ [3]:


ISSN 1562-9945

$$C^{*2} = \frac{1-\nu^*}{\rho\left(1+\nu^*\right)} \quad 3K_0\,, \tag{2}$$

где $K_0$ - модуль объемного сжатия, соответствующий мгновенному нагружению; $\nu^*(\omega)$ - оператор Пуассона, устанавливающий функциональную зависимость коэффициента Пуассона от $\omega$.

В связи с этим, рассмотрим типичные случаи вибровоздействия на геоматериалы - когда среда обладает преимущественно упругими или неупругими свойствами. Для этого воспользуемся аналитическим решением задачи о сферическом источнике гармонических волн в упругой среде [4]. Среди всех компонент тензора напряжений реализация эффективного процесса дезинтеграции упругой породной среды связана, в основном, с радиальной компонентой напряжений, которую в упругом пространстве можно описать зависимостью [4]:

$$\sigma_{rr}(r,t) = A(2\mu(\frac{2}{r^3} - \frac{k^2}{r} + i\frac{2k}{r^2}) - \lambda\frac{k^2}{r})e^{-ikr}e^{i\omega t}\,. \tag{3}$$

Постоянная А в соотношении (3 определяется из граничного условия (1) и имеет вид:

$$A = \frac{P_0 a^3 e^{ika}}{4\mu(1+ika) - (\lambda+\mu)a^2k^2}\,, \tag{4}$$

где $k = \dfrac{\omega}{c}$ - волновое число; $a$ – радиус виброисточника; с– скорость продольных волн, равная, $c^2 = \dfrac{\lambda + 2\mu}{\rho}$; $\rho$ - плотность материала; постоянные Ламе λ и μ определяются через модуль упругости $E$ и коэффициент Пуассона $\nu$ зависимостью:

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}\,; \qquad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}\,. \tag{5}$$

Для оценки эффективных параметров вибровоздействия исследуем функцию $\sigma_{rr}$ на экстремум. При этом будем считать, что процесс виброобработки является стационарным (t=0) и k*r является малой величиной, что не искажает физику волнового процесса. С учетом изложенного на основании зависимости (3) амплитуду радиального напряжения можно записать в виде:

$$\left|\,\sigma_{rr}\left(r,\omega\right)\right| = P_0\left(\frac{a}{r}\right)^3 \frac{12\mu - \omega^2\rho\, r^2}{4\mu - \omega^2\rho\, a^2}\quad. \tag{6}$$

О поведении амплитуды напряжений в упругой среде можно судить по знаку производной в окрестности точки $r=a$. Если величина производной (6) положительна, то амплитуда напряжений возрастает вглубь массива:

$$\frac{d}{dr}\left|\sigma_{rr}(r,\omega)\right| = -P_0\frac{a^3}{r^4}\frac{12\mu-\omega^2\rho r^2}{4\mu-\omega^2\rho a^2} > 0. \qquad (7)$$

Условие (7) выполняется, когда:

$$\left.\begin{array}{l} 12\mu-\omega^2\rho a^2 > 0 \\ 4\mu-\omega^2\rho a^2 < 0 \end{array}\right\} \qquad (8)$$

или

$$\left.\begin{array}{l} 12\mu-\omega^2\rho a^2 < 0 \\ 4\mu-\omega^2\rho a^2 > 0 \end{array}\right\} \qquad (9)$$

Решения системы неравенств (8) и (9) имеют вид:

$$\frac{4\mu}{\rho a^2} < \omega^2 < \frac{12\mu}{\rho a^2} \qquad (10)$$

и

$$\frac{12\mu}{\rho a^2} < \omega^2 < \frac{4\mu}{\rho a^2}. \qquad (11)$$

Неравенство (11) невыполнимо. Следовательно, амплитуда радиальных напряжений $\left|\sigma_{rr}(r,\omega)\right|$ в упругой среде будет превосходить амплитуду напряжений на границе с виброисточника при частотах вынужденных колебаний $\omega^*$, которые удовлетворяют неравенству (10). Максимум $\omega^*$ будет достигаться в точке $r^*$, где (6) обращается в ноль:

$$r^{*2} = \frac{12\mu}{\omega^{*2}\rho}. \qquad (12)$$

В случае неупругой среды исследуем влияние ее дилатационных свойств на распространение гармонических возмущений. Последние характеризуются модулем объемного сжатия, определяющего скорость продольных волн в соотношении (2):

$$K_0 = \frac{E_0}{3(1-2\nu_0)}, \qquad (13)$$

где $E_0$ и $\nu_0$ – значения модуля упругости и коэффициента Пуассона, соответствующие мгновенному нагружению.

 ISSN 1562-9945

Величина коэффициента Пуассона $\nu_0$ в (13) определяет степень сжимаемости материала: если $\nu_0 \to 0{,}5$ - материал практически несжимаем, при $\nu_0 \to 0$ - имеет идеальную сжимаемость. Рассмотрим поведение амплитуды радиальных напряжений для предельных случаев $\nu_0$.

Если $\nu_0 \to 0{,}5$, то:

$$\lim_{\nu\to 0{,}5} \lambda = \lim_{\nu\to 0{,}5} \frac{E\cdot\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} = \infty;$$

$$\lim_{\nu\to 0{,}5} \mu = \frac{1}{3}E \quad ; \tag{14}$$

$$\lim_{\nu\to 0{,}5} K = \lim_{\nu\to 0{,}5} \omega\sqrt{\frac{\rho}{\lambda+2\mu}} = 0.$$

Тогда (6) можно записать в виде:

$$\lim_{\nu\to 0{,}5} \left|\hat{\sigma}_{rr}(r,\omega)\right| = P_0\left(\frac{a}{r}\right)^3 \frac{4\mu-\omega^2\rho\, r^2}{4\mu-\omega^2\rho\, a^2}. \tag{15}$$

При $r = a$ $\lim\limits_{\nu\to 0{,}5} \left|\hat{\sigma}_{rr}(a,\omega)\right| = P_0$. В области $r \neq a$ максимальную частоту вынужденных колебаний $\omega^*$ можно определить из условия равенства бесконечности предела (15), т.е. из условия $4\mu - \omega^{*2}\rho\, a^2 = 0$.

Откуда следует, что $\omega^*$ независимо от расстояния от виброисточника будет равно:

$$\omega^{*2} = 4\mu/\rho\, a^2 . \tag{16}$$

При идеальной сжимаемости материала, когда $\nu \to 0$, имеем:

$$\lim_{\nu\to 0} \lambda = \lim_{\nu\to 0} \frac{E\cdot\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} = 0 \quad ;$$

$$\lim_{\nu\to 0} \mu = \frac{1}{2}E \quad ; \tag{17}$$

$$\lim_{\nu\to 0} K = \lim_{\nu\to 0} \omega\sqrt{\frac{\rho}{\lambda+2\mu}} = \omega\sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad .$$

С учетом (17) из (6) получим:

$$\lim_{\nu\to 0} \left|\hat{\sigma}_{rr}(r,\omega)\right| = P_0\left(\frac{a}{r}\right)^3 \sqrt{\frac{\left(2 - K^2r^2\right)^2 + 4K^2r^2}{\left(2 - K^2a^2\right)^2 + 4K^2a^2}}. \tag{18}$$

При $r=a$ выражение (18) соответствует граничному условию $\sigma_{rr}(a,\omega)=P_0$. При $r>a$ $\lim\limits_{\nu\to 0}\left|\hat{\sigma}_{rr}(r,\omega)\right|=\infty$, когда:

$$\left(2-K^2a^2\right)^2+4K^2a^2=0. \qquad (19)$$

Следовательно, критическую частоту вынужденных колебаний $\omega$* можно определить из условия (19), выразив $K$ через $\omega$ в соответствии с выражением (17). В результате получим:

$$4E+a^2\rho\,\omega^{*2}=0. \qquad (20)$$

Уравнение (20) не имеет действительных корней, т. е. когда $\nu \to 0$ не существует такой частоты, которая могла бы доставлять максимальное значение амплитуде радиальных напряжений.

Проведенные исследования амплитуды радиальных напряжений для предельных случаев сжимаемости горной породы позволяют предположить, что для пород, характеризующихся неупругими свойствами, оптимальные параметры вибрационного воздействия рационально устанавливать не по амплитуде радиальных напряжений, а по наиболее информативному параметру, описывающему дисперсию дилатанционных волн в породной среде с учетом функциональных зависимостей свойств пород от частоты вибровоздействия. Таким параметрам может быть отношение средней за период мощности потока энергии через замкнутую поверхность упруго-наследственной среды [5] $<P_r>$ к средней за период мощности потока энергии через поверхность возбуждения в этой среде $<P_\alpha>$, который называется параметром энергопроводности [3]: $Э=<P_r>/<P_a>\cdot(r/a)^2$. При этом, определяющее значение, как следует из проведенных исследований, будет иметь учет оператора Пуассона, устанавливающего взаимосвязь отношения поперечных и продольных деформаций в среде с частотой вибрационного воздействия.

Анализ полученных выражений показывает, что затухание параметра энергопроводности *Э* будет носить плавный характер, при этом энергопроводящая способность смерзшейся геоматериала зависит от частот воздействия, т.е. от параметров оптимального использования многочастотного воздействия.

Таким образом, исходя из анализа закономерностей волнового возмущения смерзшегося геоматериала, можно сделать заключение о

 ISSN 1562-9945

том, что эффективность его виброрыхления базируется на режиме многочастотного вибровоздействия. Этот режим описывается функциональной зависимостью $\omega^* = \omega(r/a)$, которую необходимо устанавливать в соответствии с разработанным в работе алгоритмом расчета с учетом численных значений физико-механических свойств смерзшейся среды.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Потураев В.Н., Минеев С.П., Прусова А.А. О некоторых эффектах, реализуемых в горном массиве при вибровоздействии // Науковий вісник НГА Украіни.- Днепропетровск. - Вип.2. - 1999.- С. 11-14.
2. Минеев С.П., Сахненко А.Л., Обухов С.А. Вибрационное и волновое рыхление агрегированной сыпучей горной массы. - Днепропетровск: Дніпро-Вал, 2005. - 212с
3. Жарий О.Ю., Улитко А.Ф. Введение в механику нестационарных колебаний и волн.- Киев: Вища школа, 1989. – 184 с.
4. Новацкий В. Теория упругости. – М.: Мир, 1975.- 872 с.
5. Работнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел. – М.: Наука, 1977.- 383 с.