

кріплення.

**Abstract.** The Western Donbass area refers to one of the most complicated geological conditions. Due to the watering, the enclosing rocks are got soaked, mine tunnel contour losses its stability, and marginal rocks fall.

A computer simulation was used for studying changes in the stress field and permeability around the mine tunnels with the frame supports and roof bolting when a flooded coal brat was located in the roof. A series of numerical experiments were carried out with different distances between the mine roof and watered coal brat. Distributions of the estimated values of geomechanical parameters and zones with inelastic deformations around the mine tunnel are shown for the cases under the consideration. The values of the rocks filtration permeability in the mine roofs are compared for the cases with frame supports and roof bolting. It is shown that when the roof bolting is used, difference between the maximum and minimum stress field components decreases by 25-30% and permeability in the mine roof decreases by 25-35%. The roof bolting prevents fractures around the mine tunnel from further development, retains enclosing rocks in their natural, solid state, and increases the tunnel stability even when a watered coal brat is located in its roof.

**Keywords:** water inflow into the mine tunnel, numerical methods, roof bolting.

*Статья поступила в редакцию 07.09.2015*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук С.П. Минеевым*

УДК 622.242.-555.4 (043.3)

**Минеев А.С.**, канд. техн. наук, доцент  
(Государственное ВУЗ «НГУ»)

### **ВОПРОСЫ ОЦЕНКИ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГЕОМАТЕРИАЛЫ**

**Мінєєв А.С.**, канд. техн. наук, доцент  
(Державний ВНЗ «НГУ»)

### **ПИТАННЯ ОЦІНКИ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИБРАЦІЙНОЇ ДІЇ НА ГЕОМАТЕРІАЛИ**

**Minieiev O.S.**, PhD. (Tech.), Associate Professor,  
(State H E I «NMU»)

### **ON THE ISSUES OF OPTIMAL PARAMETR ESTIMATION FOR VIBRATION IMPACT ON THE GEOMATERIALS**

**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.

Установлено, что средняя за период мощность потока энергии с удалением от источника вибрации убывает по экспоненциальному закону для больших расстояний, а для малых вносятся существенные поправки свойствами среды. Поэтому аналитически ее определить сложно и в работе ее определяли на основе численного расчета.

Анализ исследований позволил рекомендовать для эффективного рыхления смерзшегося

геоматериала использование режима многочастотного вибровоздействия.

© А.С. Минеев, 2015

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

**Актуальность.** В последнее время в некоторых отраслях промышленности начинают широко внедряться вибротехнологии, позволяющие реализации процессов 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, для интенсификации газоотдачи земных недр [1, 2], а также других сферах. Эти технологии основаны на общих физических закономерностях передачи потока виброэнергии для целенаправленного изменения свойств обрабатываемых сред.

Так, в результате периодического 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 стремится 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 в работе проведены исследования условий вибрационной обработки геоматериалов, при которых в среде возможна реализация максимума амплитуды напряжений.

**Изложение основного материала.** 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:

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

где  $P_0$  – амплитуда возмущающего давления;  $\omega$  – частота вынужденных коле-

баний;  $t$  – 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]

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

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]:

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

Постоянная  $A$  в соотношении (3) определяется из граничного условия (1) и имеет вид

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

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

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

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

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

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

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

Условие (7) выполняется, когда

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

или

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

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

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

и

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

Неравенство (11) невыполнимо. Следовательно, амплитуда радиальных напряжений  $|\sigma_{rr}(r, \omega)|$  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

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

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)

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

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

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

Если  $\nu_0 \rightarrow 0,5$ , то:

$$\begin{aligned} \lim_{\nu \rightarrow 0,5} \lambda &= \lim_{\nu \rightarrow 0,5} \frac{E \cdot \nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} = \infty; \\ \lim_{\nu \rightarrow 0,5} \mu &= \frac{1}{3} E ; \\ \lim_{\nu \rightarrow 0,5} K &= \lim_{\nu \rightarrow 0,5} \omega \sqrt{\frac{\rho}{\lambda + 2\mu}} = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Тогда (6) можно записать в виде

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

При  $r = a$   $\lim_{\nu \rightarrow 0,5} \left| \hat{\sigma}_{rr}(a, \omega) \right| = P_0$ . В области  $r \neq a$  максимальную частоту вы-

нужденных 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

$$\omega^{*2} = 4\mu / \rho a^2 . \quad (16)$$

При идеальной сжимаемости материала, когда  $\nu \rightarrow 0$ , имеем

$$\begin{aligned}\lim_{\nu \rightarrow 0} \lambda &= \lim_{\nu \rightarrow 0} \frac{E \cdot \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} = 0 \quad ; \\ \lim_{\nu \rightarrow 0} \mu &= \frac{1}{2} E \quad ; \\ \lim_{\nu \rightarrow 0} K &= \lim_{\nu \rightarrow 0} \omega \sqrt{\frac{\rho}{\lambda + 2\mu}} = \omega \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad .\end{aligned}\tag{17}$$

С учетом (17) из (6) получим

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

При  $r=a$  выражение (18) соответствует граничному условию  $\sigma_{rr}(a, \omega) = P_0$ .

При  $r > a$   $\lim_{\nu \rightarrow 0} \left| \hat{\sigma}_{rr}(r, \omega) \right| = \infty$ , когда

$$(2 - K^2 a^2)^2 + 4K^2 a^2 = 0 \quad .\tag{19}$$

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

$$4E + a^2 \rho \omega^{*2} = 0 \quad .\tag{20}$$

Уравнение (20) не имеет действительных корней, т. е. когда  $\nu \rightarrow 0$  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 дилатационных волн в породной среде с учетом функциональных зависимостей свойств пород от частоты вибровоздействия. Таким параметром может быть отношение средней за период мощности потока энергии через замкнутую поверхность упруго-наследственной среды [5]  $\langle P_r \rangle$  к средней за период мощности потока энергии через поверхность возбуждения в этой среде  $\langle P_a \rangle$ , который называется параметром энергопроводности [3]:  $\Theta = \langle P_r \rangle / \langle P_a \rangle \cdot (r/a)^2$ . 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.

Для численной реализации приведенного выше алгоритма была написана программа на языке Object Pascal в среде разработки Delphi 7. Программа производит вычисление множества значений  $\mathcal{E}(w,r)$  и строит несколько 2D графиков, наглядно показывающих изменение значения  $\mathcal{E}$  в зависимости от изменения основных параметров. Эта программа определяет для каждого расстояния от точки среды до виброисточника частоту наилучшей энергопроводности и строит график значений этих частот [6]. При этом вектор записывается в файл для дальнейшей его передачи в программе Microocal Origin 6.0. с целью нахождения аппроксимирующей функции. Далее, в Origin 6.0., в полуавтоматическом режиме определяется наиболее подходящая аппроксимирующая функция, которая имеет погрешность не более 5%.

Расчеты проводились для следующих числовых параметров смерзшейся углеродной среды:  $T = -10^\circ\text{C}$ ;  $W = 20\%$ ;  $\chi = 0,2101$   $\beta = 0,23774$ ;  $E_0 = 1000\text{МПа}$ ;  $\nu_0 = 0,14$ ;  $a = 0,03\text{м}$ . Результаты оценки изменения параметра энергопроводности при вибровоздействии на углеродную среду при отрицательной температуре с удалением от источника волнового возбуждения приведены на рисунке 1.

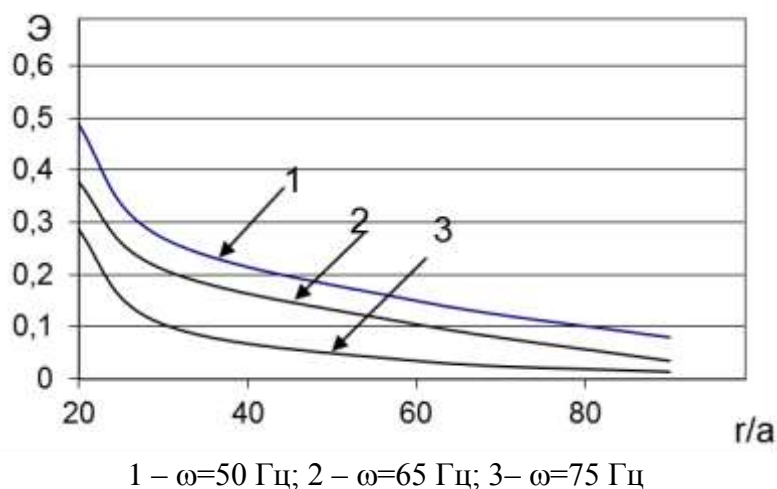


Рисунок 1 - Изменение параметра энергопередачи при вибровоздействии на смерзшуюся угольную среду при  $t = -10^\circ\text{C}$  с удалением от источника волнового возбуждения

Анализ численных расчетов, приведенных на рисунке 1 показывает, что независимо от частоты энергии вибровоздействия с удалением от источника возмущения убывает по логарифмическому закону

$$\mathcal{E} = A - B \ln(r/a - C), \quad (21)$$

где  $A$  равно 0,94; 0,86; 0,55 соответственно при 50, 65 и 75 Гц; аналогично  $B$  равно 0,2; 0,19; 0,13 и  $C = 8,0$ ; 4,3; 9,2.

Из рисунка 1, видно, что резкое падение энергопроводности происходит на расстоянии от виброисточника до  $r = 25 a$ . Далее затухание параметра энерго-

передачи  $\mathcal{E}$  носит более плавный характер. При этом энергопроводящая способность смерзшейся углепородной среды существенно зависит от частоты вынужденных колебаний. В связи с этим расчеты энергопередачи проводились для различных значений частоты вынужденных колебаний в зависимости от места расположения источника вибрационного воздействия.

Результаты расчетов, показывают, что эффективная частота вибровоздействия  $\omega^*$  для смерзшейся угольной среды, рассчитанная по модели упруго-наследственной среды не является одинаковой величиной для данной среды в отличие от упругой модели, а изменяется в зависимости от расстояния до виброобрабатываемой зоны. Об этом свидетельствуют установленные максимумы, которые располагаются не на одной вертикальной прямой, что соответствует одной частоте, а расположены со сдвигом в сторону низких значений частот [7]. То есть достаточно четко выделяется сдвиговый частотный диапазон, который для представленных расчетных зависимостей находится в пределах от 45 до 75 Гц. Дискретные значения эффективных частот в этом диапазоне соответствуют различным параметрам  $r/a$ . Следовательно, можно утверждать, что для смерзшейся углепородной среды эффективная частота вибровоздействия представляет собой функциональную зависимость от расстояния до виброисточника как это представлено на рисунке 2.

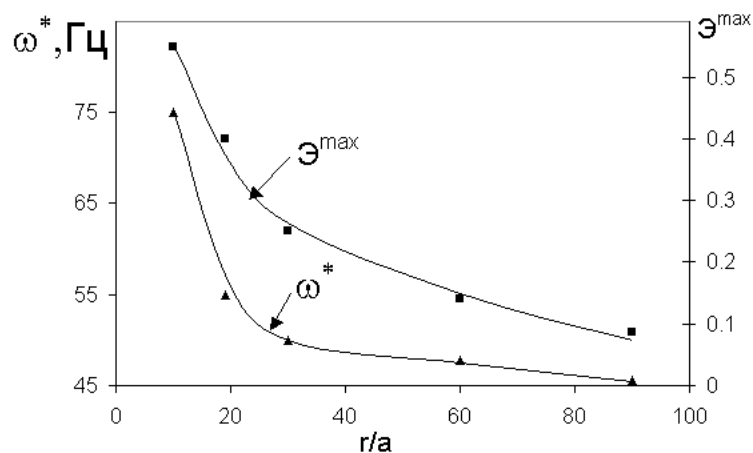


Рисунок 2 - Эффективная частота вибровоздействия ( $\omega^*$ ) и соответствующий ей параметр энергопередачи ( $\mathcal{E}^{\max}$ ) для смерзшейся угольной среды при  $t=-10^\circ\text{C}$  в зависимости от расстояния до виброисточника

Из рисунка 2 видно что, значение эффективной частоты  $\omega^*$  уменьшается с удалением от источника вибрационного возбуждения. Эта зависимость аппроксимируется логарифмической функцией в виде

$$\omega^*[\text{Гц}] = A - B \cdot \ln(r/a - C), \quad (22)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – константы аппроксимации, равные  $A=64,0$ ;  $B=4,22$ ;  $C=10,0$ .

Оптимальной частоте, выраженной соотношением (22) при указанных численных значениях констант соответствует параметр максимальной энергопере-



дачи (рис. 2), изменяющийся также по логарифмическому закону:

$$\mathcal{E}^m = 0,8 - 0,17 \ln(r/a - 5). \quad (23)$$

Функциональная зависимость (22) описывает эффективный режим вибровоздействия на смерзшуюся углепородную среду. Константы  $A$ ,  $B$ ,  $C$  в соотношении (22) определяются физико-механическими свойствами геоматериала. Поэтому при изменении температуры и свойств среды эти константы будут изменяться. Причем необходимо отметить, что практическая реализация эффективного режима вибровоздействия в соответствии с функциональной зависимостью (22) возможна лишь на основе автоматизированного управления вибрационной установкой. В случае ручного управления, эффективный режим виброобработки будет, согласно расчетам, достигаться, если, как минимум, три раза изменить частоту вибровоздействия. Например, если необходимо виброобработать область рассматриваемой в работе смерзшейся угольной среды на глубину до  $r=90 \cdot a$ , то можно принять значения оптимальных частот, как следует из рисунка 2, равными  $\omega_1 = 45$  Гц;  $\omega_2 = 55$  Гц и  $\omega_3 = 90$  Гц.

Анализ полученных выражений показывает, что затухание параметра энергопроводности  $\mathcal{E}$  будет носить плавный характер, при этом энергопроводящая способность смерзшейся геоматериала зависит от частот воздействия, т.е. от параметров оптимального использования многочастотного воздействия.

**Выводы.** Таким образом, исходя из анализа закономерностей волнового возмущения смерзшегося геоматериала в целом, можно сделать заключение о том, что эффективность его виброрыхления базируется не на одной эффективной частоте, а 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 углепородной среды.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Потураев, В.Н. О некоторых эффектах, реализуемых в горном массиве при вибровоздействии / В.Н. Потураев, С.П. Минеев, А.А. Прусова // Науковий вісник НГА України.- Днепропетровск. Вип.2. - 1999.- С. 11-14.
2. Минеев, С.П. Вибрационное и волновое рыхление агрегированной сыпучей горной массы / С.П. Минеев, А.Л. Сахненко, С.А. Обухов. - Днепропетровск: Дніпро-Вал, 2005. - 212с
3. Жарий, О.Ю. Введение в механику нестационарных колебаний и волн / О.Ю. Жарий, А.Ф. Улитко.- Киев: Вища школа, 1989. – 184 с.
4. Новацкий, В. Теория упругости / В. Новацкий. – М.: Мир, 1975.- 872 с.
5. Работнов, Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1977.- 383 с.
6. Минеев, О.С. Автоматизація вібророзпушувальної установки для розвантаження сипких змерзлих вантажів: автореф. дис.. ...канд. техн. наук: 05.13. / Минеев О.С. - Дніпропетровськ: ДВНЗ «НГУ», 2012.- 20 с.
7. Слесарев, В.В. Математическая модель виброрыхления агрегированной углепородной среды / В.В. Слесарев, А.С. Минеев // Вісник НГУ, 2012.- №1. –С. 113-117.

#### REFERENCES

1. Poturaev, V.M., Minieiev, S.P. and Prusova, A.A.(1999), "Some effects witch implemented in mining area with the vibration influence" *Naukovy Visnik Natsionalnoi girnychoi akademii*, no. 2, pp 11-14.
2. Minieiev, S.P., Sakhnenko, A.L. and Obukhov, S.A. (2005), *Vibratsionnoe I volnovoe rykhlenie agregirovannoy supuchey gornoy massy* [Vibration and wave scarifying of aggregated friable coal mass], Dnipro-Val, Dnepropetrovsk, Ukraine.
3. Zhariy, O.Y. and Ulitko, A.F.(1989), *Vvedenie v mekhaniku nestatsionarnykh kolebaniy i voln* [Introduction to mechanic of non-stationary vibrations and waves], Vischa shkola, Kiev, Ukraine.
4. Novatsky, V.(1975), *Theoria uprugosti* [Theory of elasticity], Mir, Moscow, USSR.
5. Rabotnov, Y.N. (1977), *Elementy nasledstvennoy mekhaniki tverdykh tel* [Basic hereditary mechanics of solids], Mir, Moscow, USSR.
6. Minieiev, A.S. (2012), "Automatization of vibrascarifying unit for unloading fiering frozen cargos", Abstract of Ph. D. dissertation, "Automatization management processing", SHEI "National Mining University", Dnepropetrovsk, Ukraine.
7. Slesarev, V.V. and Minieiev, A.S.(2012), "Math model vibroscarifying of aggregated coal area", *Vistnik Natsionalnogo girnychogo universytetu*, no.1, pp 113-117.

---

### Об авторе

**Минеев Александр Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и управления, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (ГБУЗ «НГУ»), Днепропетровск, Украина, [skullik@i.ua](mailto:skullik@i.ua).

### About the author

**Minieiev Aleksandr Sergieievich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associated Professor of System Analyzes and Management Department, State Higher Educational Institution «National Mining University» (SHEI «NMU»), Dnepropetrovsk, Ukraine, [skullik@i.ua](mailto:skullik@i.ua).

---

**Анотація.** У роботі виконано оцінку оптимальних параметрів вібраційної дії на пружні і непружні геоматеріали, при яких в середовищі досягається максимум амплітуди напруги. У разі непружних матеріалів для оптимізації запропонований інформативний параметр, що характеризує міру передачі віброенергії по середовищу.

Встановлено, що середня за період потужність потоку енергії з видаленням від джерела вібрації убуває за експоненціальним законом для великих відстаней, а для малих вносяться істотні поправки властивостями середовища. Тому аналітично її визначити складно і в роботі її визначали на основі чисельного розрахунку.

Аналіз досліджень дозволив рекомендувати для ефективного розпушування змерзлого геоматеріала використання режиму багаточастотної вібродії.

**Ключові слова:** параметри, вібрація, вплив, багаточастотні, геоматеріали, змерзлий, енергопровідність.

**Abstract.** The author estimated optimal parameters for the vibration impact on the elastic and inelastic geomaterials at which maximal stress amplitudes could be achieved in the medium. In case of inelastic geomaterials, an informative parameter was proposed which characterized degree of the vibration energy transferring throughout the medium.

It is stated that average power of the energy flow, as moving away from the source of vibration, decreases by exponential law in case of large distances, while with small distances, the medium properties should be essentially corrected. Therefore, it is difficult to determine the power of the energy flow by analytical method, and in this research it was determined by numeral calculation.

The findings allowed to recommend using of the mode of multifrequency vibrating impact for effective loosening of the frozen geomaterial.

**Keywords:** parameters, vibration, impact, multifrequency, geomaterials, frozen, energy conductance.

*Рекомендовано к печати д-ром геол.-минерал. наук В.А. Барановым*