

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
«МАССИВ – ВЫРАБОТКА – КРЕПЬ»
НА ИНФОРМАТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ
В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД**

**С. И. Скипочка, Т. А. Паламарчук, Л. В. Прохорец, А. А. Яланский,
Н. Т. Бобро**

Институт геотехнической механики им. Н. С. Полякова НАН Украины
ул. Симферопольская, 2-А, г. Днепр, 49005, Украина.
E-mail: office.igtm@nas.gov.ua

Оценен характер и степень влияния системы «массив – выработка – крепи и охранные конструкции» на свойства и состояние массива горных пород. Показано, что в качестве основного показателя эффективности крепления и безопасности эксплуатации выработок целесообразно использовать трещиноватость массива. Выполнены теоретические исследования и установлены закономерности распространения акустических волн в массиве горных пород сложной структуры; установлен характер зависимости напряженного состояния и других параметров исследуемой системы от скорости ведения очистных или любых других горных работ; показано, что с увеличением глубины отработки полезных ископаемых коэффициент запаса прочности уменьшается, что следует учитывать при принятии соответствующих мер для повышения безопасности ведения горных работ.

Ключевые слова: акустические параметры, геомеханический мониторинг, геомеханическая система, крепь, массив горных пород, трещиноватость.

**ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ ГЕОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ
«МАСИВ – ВИРОБКА – КРІПЛЕННЯ»
НА ІНФОРМАТИВНІ ПАРАМЕТРИ АКУСТИЧНИХ ПОЛІВ
У МАСИВІ ГІРСЬКИХ ПОРІД**

**С. І. Скіпочка, Т. А. Паламарчук, Л. В. Прохорець, А. О. Яланський,
М. Т. Бобро**

Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України
вул. Симферопольська, 2-А, м. Дніпро, 49005, Україна.
E-mail: office.igtm@nas.gov.ua

Основа для оцінки напружено-деформованого стану системи «масив – виробка – кріплення і охоронні конструкції» є комплексні методи досліджень, які включають аналітичний аналіз з використанням основ теорії пружності і пластичності, натурні спостереження в шахтах за впливом пустот відпрацьованих камер на стійкість гірського масиву і оголень в блоках. У даній роботі оцінено характер і ступінь впливу системи «виробка – кріплення і охоронні конструкції» на властивості і стан масиву гірських порід, розглянуті особливості роботи різних видів кріплення виробок і їх вплив на стан породного масиву, а також особливості моніторингу тріщинуватості масиву. Показано, що в якості основного показника ефективності кріплення і безпеки експлуатації виробок доцільно викорис-

товувати тріщинуватість масиву. Проведено оцінку впливу параметрів кріплення на напружено-деформований стан системи «виробка – кріплення – охоронна конструкція» і показано, що навантаження на кріплення є результатом взаємодії кріплення з масивом і залежить від обох взаємодіючих елементів, з чого випливає можливість управління напружено-деформованим станів гірничих виробок шляхом варіації параметрів кріплення і технології її зведення. Виконано теоретичні дослідження і встановлені закономірності поширення акустичних хвиль в масиві гірських порід складної структури, обґрунтовано застосування акустичного методу для контролю геомеханічної системи «масив – виробка – кріплення і охоронні конструкції», встановлено характер залежності напруженого стану та інших параметрів досліджуваної системи від швидкості ведення очисних або будь-яких інших гірських робіт. Показано, що зі збільшенням глибини відпрацювання корисних копалин коефіцієнт запасу міцності зменшується, що слід враховувати при прийнятті відповідних заходів для підвищення безпеки ведення гірничих робіт.

Ключові слова: акустичні параметри, геомеханічний моніторинг, геомеханічна система, кріплення, масив гірських порід, тріщинуватість.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Существуют определенные геомеханические отличия в поведении массива горных пород в выработках, закрепленных рамной, анкерной крепями и другими охранными конструкциями.

При оценке степени влияния системы «выработка – крепь» на массив горных пород необходимо также учитывать срок эксплуатации выработки. Чем длительнее срок службы выработки, тем выше в массиве напряжения, которые могут вывести ее из строя и повлечь за собой аварии и жертвы.

В целом крепь горных выработок должна удовлетворять следующим основным техническим и экономическим требованиям:

- быть прочной, устойчивой, долговечной, обеспечивать рабочее состояние выработок и безопасные условия труда в течение всего срока службы;
- иметь минимальные затраты на изготовление, доставку, возведение и эксплуатацию;
- не препятствовать выполнению производственных процессов при проведении выработок и её эксплуатации;
- занимать в выработке минимальную площадь в поперечном сечении;
- иметь минимальный коэффициент аэродинамического сопротивления.

С точки зрения геомеханики главное назначение шахтной крепи – это предотвращение, сдерживание или снижение до допустимых значений процессов развития деформаций в прилегающей к горной выработке области породного массива.

Таким образом, систему «массив – выработки – крепи и охранные конструкции» можно рассматривать как замкнутую систему с обратной связью. Т. е. для мониторинга свойств и состояния указанной системы достаточно контролировать изменчивость структуры массива в процессе проходки выработок, возведения крепи и эксплуатации объекта. Такая задача успешно решается методами горной геофизики, принцип работы которых основан на возбуждении волн раз-

личной природы в породном массиве и регистрации изменений, происходящих в этих (или вторичных) волнах при прохождении их через нарушенную среду.

Рост природных и техногенных катастроф, вызванных смещениями массивов горных пород при строительстве и эксплуатации гражданских и промышленных объектов, отсутствие надежных методов и средств их прогноза и экстренных способов локализации и предотвращения массовых разрушений определяют необходимость решения проблемы оценки состояния и обеспечения устойчивости массивов горных пород в районах интенсивной инженерной деятельности человека. Успешное решение этой проблемы возможно лишь при объединении усилий ученых и специалистов различных отраслей науки и современных технологий (механики горных пород, динамики подземных вод, непрерывного высокоточного мониторинга, эффективных технических решений).

Контроль свойств и диагностика состояния горного массива предусматривает использование механического и геофизических методов, визуальных и маркшейдерских наблюдений при оценке влияния горных работ на массив и земную поверхность. Решение этой многофункциональной задачи возможно в рамках геомеханического мониторинга подземной геотехнологической системы. Создание и внедрение геомеханического мониторинга для месторождений сложной структуры на основе новых методов и технических средств, обеспечивающих дальнейшее повышение безопасности горных работ в предельных условиях напряженно-деформированного состояния породного массива, предрасположенного к горным ударам и обрушению пород, важная научная и практическая проблема, которая требует безотлагательного решения. Практика горных работ показывает, что, в связи с усовершенствованием технологий добычи твердых полезных ископаемых, элементы геомеханического мониторинга также нуждаются в своем дальнейшем усовершенствовании в направлении их адаптации, выбора более информативных параметров, интерпретации результатов, а также повышения надежности (исключения случайных показателей) принятия положительного заключительного решения и диагноза состояния системы «массив – выработки – крепи и охранные конструкции» [1–2].

Цель данной работы – установить закономерности влияния состояния геомеханической системы «массив – выработки – крепи и охранные конструкции» на информативные параметры акустических полей.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Исследование свойств системы «массив горных пород – выработка – крепи и охранные конструкции» является весьма сложной и в то же время важной задачей, определяющей ее устойчивость. Как известно, массив горных пород можно считать сплошной средой, если при переходе от точки к точке, бесконечно малому приращению координат соответствуют и бесконечно малые изменения величин, характеризующих свойства или состояние этой среды.

Что касается однородности массива горных пород, то следует отметить, что практически все породные массивы являются неоднородными. Определяющей особенностью массивов горных пород как среды действия прикладываемых сил, развития напряжений, деформаций и разрушений является его трещиноватость, а для осадочных метаморфизованных пород и слоистость.

Следует заметить, что при слабых силовых воздействиях в массиве пород могут происходить пликативные нарушения, которые вызывают незначительные смещения участка массива без нарушения его сплошности. Наиболее опасными нарушениями массива пород являются дизъюнктивные, приводящие к значительным разрывам сплошности и образованию сети трещин в массиве.

Кроме того, следует отметить, что свойства горных пород и породных массивов в значительной мере определяются их трещинной структурой (степенью нарушенности). Породные массивы обладают свойством иерархичности, заключающемся в подобии структуры на разных уровнях иерархии [3–4].

Свойства и состояние пород на любом уровне иерархии i определяется величиной критерия: $K = R_i/L_i$, где R_i – среднее расстояние между трещинами; L_i – средний размер трещины. Тогда для прогноза характеристик горных пород и их массивов следует определить их свойства на различных уровнях иерархии.

В зависимости от свойств пород, состояния массива, характера возводимых поверхностных или подземных сооружений определяются пути и способы решения задач о прогнозе деформаций и смещений массива.

При строительстве поверхностных сооружений на достаточно слабых грунтах (глины, супеси, суглинки) наблюдаются значительные смещения массива пород вследствие отсутствия сцепления между отдельными их разновидностями. Под воздействием грунтовых вод происходит набухание пород, они становятся более пластичными и оползают. Значительные деформации и разрушения массивов горных пород происходят в результате изменения их напряженного состояния. Естественный (даже ненарушенный) массив в силу структурного образования не является идеально однородным. В нем содержится сеть микро- и макротрещин, которые влияют на прочность массива и характер его деформирования и разрушения.

Для полной оценки состояния нарушенного массива пород необходимо рассмотреть такой процесс, как образование и развитие трещин в массиве под воздействием внешних сил (природных, технологических).

Наличие системы трещин в породах приводит к дизъюнктивным нарушениям массива с потерей его сплошности. Эти нарушения формируются в результате ведения горных работ при подземной и открытой разработке месторождений полезных ископаемых. Сдвигения поверхности наблюдаются при подземной разработке, ведущейся на глубинах 250–300 м [5].

В работе [6] изучено влияние технологических факторов на напряженно-деформированное состояние (НДС) вмещающих пород вокруг выработок. Для уменьшения этого влияния предложено конструктивно-технологическое решение, в основу которого положены предпосылки создания охранной конструкции регулируемого (нарастающего) сопротивления, использование окружающего выработку массива пород в качестве несущего элемента, поэтапное усиление охранной конструкции путем введения в нее различных стабилизирующих элементов на базе учета ее временного взаимодействия с приконтурными породами, предусматривающего осуществление разгрузки массива без его разрушения и возведение постоянной крепи после достижения в системе статического равно-

весия. Установка постоянной обделки (дополнительный слой набрызгбетона или монолитный бетон) идет целиком в запас надежности крепи.

Как известно, прочность бетона на сжатие, определяющая несущую способность крепи, является функцией возраста бетона. Можно сказать, что учет фазы взаимодействия твердеющей крепи в призабойной зоне позволяет более точно осуществлять проектирование крепи. Путем варьирования прочностных свойств бетона можно осуществлять ограниченное управление системой «крепь – порода» при проходке ствола по совмещенной схеме, которое должно быть направлено на обеспечение эффективной разгрузки массива и недопущения в бетоне крепи максимальных напряжений. Для получения наиболее полной картины необходима параллельная оценка НДС окружающего массива с учетом его фактических прочностных и структурных свойств.

Современный уровень развития механики подземных сооружений основан на рассмотрении крепи горных выработок и окружающего породного массива как единой, деформируемой по тому или иному закону, системы, в результате взаимодействия которой на контакте крепи и массива возникают напряжения, определяющие напряженно-деформированное состояние конструкции крепи [7].

Таким образом, нагрузка на крепь является результатом взаимодействия крепи с массивом и зависит от обоих взаимодействующих элементов, из чего вытекает возможность управления напряженно-деформированным состоянием горных выработок путем вариации параметров крепи и технологии ее возведения [8].

Практическая реализация данного положения наиболее ярко представлена в новоавстрийском методе крепления выработок.

В работе [9] была проведена оценка влияния параметров крепи на напряженно-деформированное состояние системы «подготовительная выработка – крепь – охранная конструкция». Данная работа направлена на исследование охранной конструкции, параметров анкерования, которые существенно влияют на состояние выработки в зоне влияния очистных работ, а также параметров рамной крепи. Установлено, что только комплексная отработка параметров всей системы «подготовительная выработка – крепь – охранная конструкция» способна дать ощутимый эффект в части повышения устойчивости рассматриваемой геомеханической системы и снижения металлоемкости крепи без потери ее эффективности, а также повышения безопасности ведения горных работ.

Выполнено теоретическое обоснование применения акустического метода для контроля геомеханической системы «массив – выработки – крепи и охранные конструкции».

Достижения в отрасли фундаментальных наук (физики, химии, геофизики, теории катастроф), а также экспериментальные наблюдения в шахтах показали, что процессы в системе «массив – выработки – крепи и охранные конструкции» сопровождаются сменой во времени напряженно-деформированного состояния подземных сооружений и потерей их прочности.

Основой для оценки напряженно-деформированного состояния системы «массив – выработка – крепи и охранные конструкции» являются комплексные методы исследований, которые включают аналитический анализ с использованием основ теории упругости и пластичности, натурные наблюдения в шахтах за

влиянием пустот отработанных камер на устойчивость горного массива и обнажений в блоках, которые широко практикуются в Бельгии, Великобритании, Германии, Казахстане, Польше, Российской Федерации, США, Украине, Чили [10–12].

Рассмотрим акустические колебания в породах с чередующимися слоями. Одной из основных причин уменьшения энергии акустической волны является внутреннее трение в среде или ее вязкость.

Если амплитуды упругих волн малы, например ультразвуковые колебания, то нелинейным членом в выражении для тензора деформации можно пренебречь. Однако, так как линейная теория упругости не выявляет зависимости скорости распространения упругих волн и напряжений, следует воспользоваться уравнением движения с учетом начальных напряжений σ_{ij}^0 .

$$\rho \ddot{u}_i = \frac{\partial \omega_{jk}}{\partial x_k} \sigma_{ij}^0 + \frac{\partial \omega_{ji}}{\partial x_k} \sigma_{jk}^0 + e_{jk} \frac{\partial \sigma_{ij}^0}{\partial x_k} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}, \quad (i, j, k = 1, 2, 3), \quad (1)$$

где $e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$, $\omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$ – компоненты тензора деформаций.

Принимаем, что отличаются от нуля только напряжения σ_{11}^0 , σ_{22}^0 , σ_{33}^0 ; ось z направлена перпендикулярно к слоям. Пусть плоская волна распространяется в направлении z с угловой частотой ω :

$$u_j = A_j \exp i(\omega t - k'_j z); \quad (2)$$

$$\operatorname{Re}(k'_j) > 0; \operatorname{Im}(k'_j) > 0,$$

где A_j – амплитуды волны (величина, постоянная для каждого случая), м.

Предполагаем, что среда состоит из чередующихся слоев толщиной a и b с плотностями ρ' и ρ'' соответственно. Тогда средняя плотность среды $\rho \frac{a\rho' + b\rho''}{a+b}$.

Упругие свойства первой среды характеризуются постоянными Ламе λ и μ , а второй – $\bar{\lambda}$ и $\bar{\mu}$. Эффективные упругие параметры мелкослоистой среды выразятся через постоянные Ламе для двух сред следующим образом:

$$C_1 = \frac{(\lambda + 2\mu)(\bar{\lambda} + 2\bar{\mu})}{n(\bar{\lambda} + 2\bar{\mu}) + \bar{n}(\lambda + 2\mu)}; \quad (3)$$

$$C_5 = \frac{\mu \bar{\mu}}{2(n\bar{\mu} + \bar{n}\mu)},$$

где $n = \frac{a}{a+b}$; $\bar{n} = \frac{b}{a+b}$.

Пусть вязкоупругая среда подчиняется процессу максвелловской релаксации. Тогда модули сдвига μ и $\bar{\mu}$ представим в виде $\mu + \mu_0$ и $\bar{\mu} + \bar{\mu}_0$, а λ и $\bar{\lambda}$ – в виде $\lambda + \lambda_0 - \frac{2}{3}\mu_0$ и $\bar{\lambda} + \bar{\lambda}_0 - \frac{2}{3}\bar{\mu}_0$ соответственно, где μ_0 и λ_0 – вязкоупругие (интегрально-дифференциальные) операторы:

$$\lambda_0 = \frac{\lambda' \tau_1 D}{1 + \tau_1 D}; \quad \bar{\lambda}_0 = \frac{\bar{\lambda}' \bar{\tau}_1 D}{1 + \bar{\tau}_1 D};$$

$$\mu_0 = \frac{\mu' \tau_2 D}{1 + \tau_2 D}; \quad \bar{\mu}_0 = \frac{\bar{\mu}' \bar{\tau}_2 D}{1 + \bar{\tau}_2 D},$$
(4)

где $\lambda', \mu', \bar{\lambda}', \bar{\mu}'$ – экстраупругие параметры; $\tau_1, \tau_2, \bar{\tau}_1, \bar{\tau}_2$ – соответствуют временам релаксации с коэффициентами вязкости; D – дифференциальный оператор по времени, равный d/dt ; $\xi = \lambda' \tau_1, \eta = \mu' \tau_2$ и $\bar{\xi} = \bar{\lambda}' \bar{\tau}_1, \bar{\eta} = \bar{\mu}' \bar{\tau}_2$.

Поскольку дифференцирование по времени дает множитель $i\omega$, выражения (2) будут комплексными. При этом скорости упругих волн определяются соотношением $v_j = \frac{\omega}{Re k'_j}$, амплитудные коэффициенты затухания $a_j = Im k'_j$, а сдвиг фаз между двумя поперечными волнами после прохождения волной слоя толщиной q выражением:

$$\delta = q Re(k_1 - k_2). \quad (5)$$

Представим C_5 и C_I в виде:

$$C_5 = H + iB; \quad C_I = M + iN, \quad (6)$$

где $H = \frac{n\mu(\bar{\mu}^2 - \bar{\mu}_0^2) + \bar{n}\bar{\mu}(\mu^2 - \mu_0^2)}{2[(n\bar{\mu} + \bar{n}\mu)^2 - (n\bar{\mu}_0 + \bar{n}\mu_0)^2]}; \quad B = \frac{n\mu_0(\bar{\mu}^2 - \bar{\mu}_0^2) + \bar{n}\bar{\mu}_0(\mu^2 - \mu_0^2)}{2i[(n\bar{\mu} + \bar{n}\mu)^2 - (n\bar{\mu}_0 + \bar{n}\mu_0)^2]},$

$$M = \frac{(a_0 \bar{a} - b_0 \bar{b}_0)(n \bar{a}_0 + \bar{n} a_0) - (a_0 \bar{b}_0 + \bar{a}_0 b_0)(n \bar{b}_0 + \bar{n} b_0)}{(n \bar{a}_0 + \bar{n} a_0)^2 - (n \bar{b}_0 + \bar{n} b_0)^2},$$

$$N = \frac{(a_0 \bar{a}_0 - b \bar{b}_0)(n \bar{b}_0 + \bar{n} b_0) + (a_0 \bar{b}_0 + \bar{a}_0 b_0)(n \bar{a}_0 + \bar{n} a_0)}{(n \bar{a}_0 + \bar{n} a_0)^2 - (n \bar{b}_0 + \bar{n} b_0)^2},$$

где $a_0 = \lambda\mu + \lambda_0\mu_0 - \frac{2}{3}\mu_0^2; \quad b_0 = \frac{1}{i}\left(\lambda_0\mu + \lambda\mu_0 - \frac{2}{3}\mu\mu_0\right);$
 $\bar{a}_0 = \bar{\lambda}\bar{\mu} + \bar{\lambda}_0\bar{\mu}_0 - \frac{2}{3}\bar{\mu}_0^2; \quad \bar{b}_0 = \frac{1}{i}\left(\bar{\lambda}\bar{\mu} + \bar{\lambda}_0\bar{\mu}_0 - \frac{2}{3}\bar{\mu}\bar{\mu}_0\right).$

Тогда из уравнения (1) получим:

$$k'_1 = \omega \sqrt{\frac{\rho}{4(H+iB) - \frac{1}{2}(\sigma_{11}^0 - \sigma_{33}^0)}};$$

$$k'_2 = \omega \sqrt{\frac{\rho}{4(H+iB) - \frac{1}{2}(\sigma_{22}^0 - \sigma_{33}^0)}};$$

$$k'_3 = \omega \sqrt{\frac{\rho}{M + iN}}.$$
(7)

Представляя подкоренное выражение в тригонометрической форме и извлекая квадратный корень, получаем:

$$\begin{aligned} v_1 &= R_1 \sqrt{\frac{2}{\rho(R_1+4B)}}; & \alpha_1 &= \frac{\omega}{R_1} \sqrt{\frac{\rho(R_1-4B)}{2}}; \\ v_2 &= R_2 \sqrt{\frac{2}{\rho(R_2+4B)}}; & \alpha_2 &= \frac{\omega}{R_2} \sqrt{\frac{\rho(R_2-4B)}{2}}; \\ v_3 &= R_3 \sqrt{\frac{2}{\rho(R_3+N)}}; & \alpha_3 &= \frac{\omega}{R_3} \sqrt{\frac{\rho(R_3-N)}{2}}; \end{aligned} \quad (8)$$

где $R_1 = \sqrt{\left(4H + \frac{\sigma_{33}^0 - \sigma_{11}^0}{2}\right)^2 + 16B^2}$; $R_2 = \sqrt{\left(4H + \frac{\sigma_{33}^0 - \sigma_{22}^0}{2}\right)^2 + 16B^2}$;
 $R_3 = \sqrt{M^2 + N^2}$.

Аналогично можно решить задачу распространения волн вдоль слоев. Необходимо отметить, что решение этой задачи будет справедливо и для среды с системой плоскопараллельных заполненных трещин.

Поскольку механизм распространения упругих волн в слоистых и трещиноватых средах одинаков при условии, что длина волны значительно больше расстояния между трещинами, зависимости для мелкослоистой среды можно отнести и к зоне трещиноватости, в которой установилась основная система трещин.

Проанализировав полученные формулы, можно сделать вывод, что скорости с увеличением напряжений возрастают, а коэффициенты поглощения уменьшаются, причем коэффициенты поглощения больше зависят от частоты, чем от скорости. Эти выводы подтверждаются экспериментально.

Зависимость коэффициентов затухания от частоты может служить предпосылкой для определения характера изменения трещиноватости с помощью частотного анализа ультразвуковых осциллограмм. Так, с увеличением степени трещиноватости горных пород в результате фильтрации упругих волн происходит смещение максимального значения спектральной плотности в сторону низких частот.

В случае проведения горных работ можно учитывать и влияние скорости подвигания очистного забоя на изменение напряженно-деформированного состояния:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^0 (0,11 \ln V + 1), \quad (9)$$

где σ_{ij} – напряжение в массиве горных пород при нагружении со скоростью V , МПа; σ_{ij}^0 – начальные напряжения в массиве горных пород при отсутствии ведения горных работ, МПа.

Для повышения безопасности ведения горных работ необходимо учитывать изменение коэффициента запаса прочности в зависимости от скорости ведения горных работ на различных глубинах залегания пород. Результаты выполненных исследований приведены на рис. 1.

Из рисунка следует, что для всех глубин при увеличении скорости ведения горных работ необходимо увеличение коэффициента запаса прочности. Приведенные на рисунке графики аппроксимируются следующими уравнениями:

- $\eta = 0,45V + 6,8$ при $H = 30$ м;
- $\eta = 0,35V + 5,1$ при $H = 40$ м;
- $\eta = 0,2V + 4,3$ при $H = 50$ м;
- $\eta = 0,15V + 2,1$ при $H = 100$ м.

Из приведенных зависимостей следует, что с увеличением глубины отработки полезных ископаемых коэффициент запаса прочности уменьшается и нужно своевременно принимать соответствующие меры для повышения безопасности ведения горных работ.

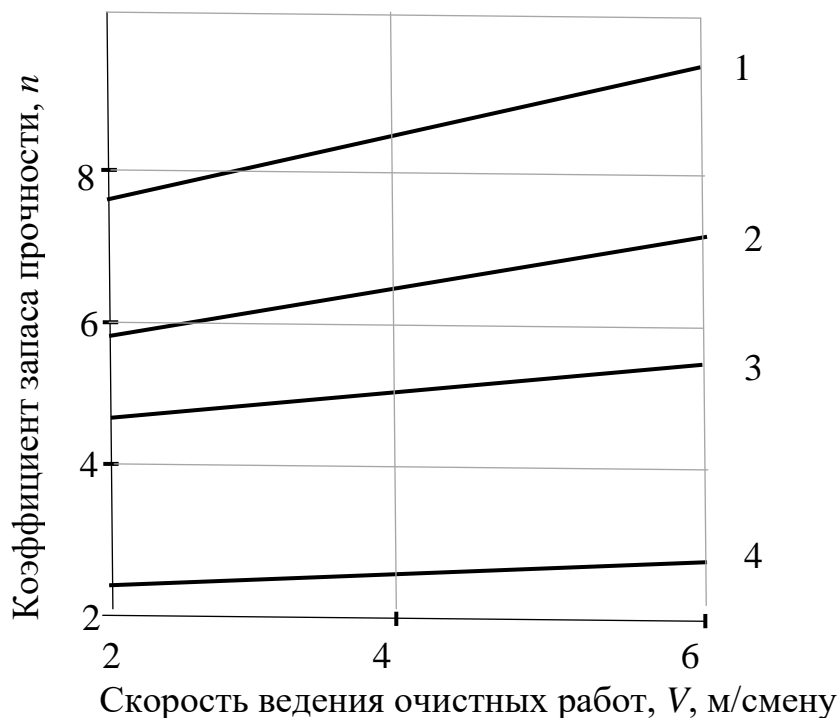


Рисунок 1 – Изменение коэффициента запаса прочности в зависимости от скорости ведения очистных работ на различных глубинах залегания:
1 – $H = 30$ м; 2 – $H = 40$ м; 3 – $H = 50$ м; 4 – $H = 100$ м

ВЫВОДЫ. 1. Установлено существенное влияние системы «выработка – крепи и охранные конструкции» на свойства и состояние массива горных пород. Показано, что в качестве основного показателя эффективности крепления и безопасности эксплуатации выработок целесообразно использовать параметр «наведенная трещиноватость массива».

2. В слоистой среде возникает физическая и геометрическая нелинейность, которая служит причиной зависимости скорости и затухания акустических волн от направления их распространения. С ростом напряжений скорости акустических волн увеличиваются, коэффициенты затухания уменьшаются, при этом они больше зависят от частоты, чем от скорости. Характер зависимости от трещиноватости противоположный.

3. Впервые выявлено, что для всех глубин залегания пород при росте скорости проведения горных работ необходимо увеличивать коэффициент запаса прочности охранных конструкций.

4. Установлен характер зависимости напряженного состояния и других параметров исследуемой системы от скорости ведения очистных или любых других горных работ.

5. Установлено, что с увеличением глубины отработки полезных ископаемых коэффициент запаса прочности уменьшается и нужно своевременно принимать соответствующие меры для повышения безопасности ведения горных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геомеханічний моніторинг підземних геотехнічних систем / А.В. Анцифоров, С.І. Скіпочка, А.О. Яланський та ін. Донецьк: Ноулідж, 2010. 253 с.

2. Skipochka S.I., Palamarchuk T.A., Sergienko V.N. Geomechanical monitoring for underground mining mineral deposits. *Innovative development of resource-saving technologies for mining. Multi-authored monograph*. Sofia: St. Ivan Rilski, 2018. P. 147–167.

3. Садовский М.А. Избранные труды: Геофизика и физика взрыва. М.: Наука, 2004. 440 с.

4. Латышев О.Г., Казак О.О. Влияние нарушенности горных пород на их свойства и состояние. *Известия УГТУ*. 2017. Вып. 4 (48). С. 62–65.

5. Гудков В.М., Катков Г.А. Устойчивость массива горных пород. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008. № 2. С. 119–121.

6. Демин В.Ф., Яворский В.В., Демина Т.В. Исследование напряженного состояния приконтурного массива вокруг выемочных выработок в зависимости от влияния горно-технологических факторов. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2015. № 7. С. 196–200.

7. Плешко М.С., Крошнев Д.В. Влияние свойств твердеющего бетона на взаимодействие системы «крепь-массив» в призабойной зоне вертикального ствола. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008. № 9. С. 320–325.

8. Эффективные способы поддержания выработок в сложных условиях шахт Западного Донбасса / А.В. Солодянкин и др. *Сучасні ресурсозберігаючі технології гірничого виробництва*. Кременчук: КрНУ ім. Остроградського, 2016. Вип. 2 (18). С. 41–48.

9. Оценка влияния параметров крепи на напряженно-деформированное состояние системы «подготовительная выработка – крепь – охранная конструкция» / С.Ю. Шепеленко, С.Н. Гапеев, А.О. Логунова, Ю.В. Каргаполов. *Форум гірників – 2014: матеріали міжнар. конф., 1-4 жовтня 2014 р.* Дніпропетровськ: НГУ, 2014. Т. 2. С. 207–211.

10. A constitutive equation and generalized Gassmann modulus for multimineral porous media / J.M. Carcione, H.B. Helle, J.E. Santos, C.L. Ravazzoli. *Geophysics*. 2005. V. 70, № 2. P. 17–26.

11. Никитин А.Н., Иванкина Т.И., Игнатович В.К. Особенности распространения продольных и поперечных упругих волн в текстурированных горных породах. *Изв. РАН. Физика земли*. 2009. № 5. С. 57–69.

12. Комплексные исследования геомеханических процессов в геомассиве и сдвижения земной поверхности при строительстве наклонных стволов в условиях шахт Ерунаковского района / С.В. Риб, В.А. Волошин, А.В. Зелинский, В.Н. Фрянов. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2016. № 1 (15). С. 20–27.

THE LAWS OF THE GEOMECHANICAL SYSTEM "MASSIF – WORKING – SUPPORT" INFLUENCE ON INFORMATIVE PARAMETERS OF ACOUSTIC FIELDS IN THE ROCK MASSIF

S. Skipochka, T. Palamarchuk, L. Prohorec, A. Yalanskiy, N. Bobro

M. S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU)

vul. Simpheropolskaya 2-A, Dnepr, 49005, Ukraine. E-mail: office.igtm@nas.gov.ua

Purpose. To establish the laws of influence of the geomechanical system “massif–working–support” state on the informative parameters of acoustic fields. **Methodology.** Analyses and synthesis of experimental and theoretical investigation on this problem, and methods of elasticity, mechanics of continuous medium and rock mechanics. **Results.** The nature and degree of influence of the “massif–working–support” system on the properties and state of the rock massif are evaluated, considered the features of various types of workings and their influence on the state of the rock massif, and features of the massif fracture monitoring. It is shown that it is advisable to use the fracture of the massif as the main indicator of the mounting efficiency and operational safety of the workings. An assessment of the influence of support parameters on the stress-strain state of the “massif–working–support” system has been carried out and it has been shown that the load on the support is the result of support interaction with the massif and depends on both interacting elements, which implies the ability to control stress-strain states of mine workings by varying the support parameters and the technology of its erection. Theoretical studies were carried out and laws were established for the propagation of acoustic waves in rocks massif of a complex structure, the use of an acoustic method to control the geomechanical system “massif–working–support” was substantiated, the nature of the dependence of the stress state and other parameters of the system on the speed of treatment or any other mining work. It is shown that with an increase of the depth of mineral resources mining, the factor of safety decreases. **Originality.** The laws of the acoustic waves propagation in an array of complex structures with unequal component initial stress are established, taking into account the intensification of mining operations, which makes it possible to identify and establish the most informative parameters for monitoring the state of the “massif–working–support” system. **Practical value.** The use of operational and current geophysical monitoring, in particular, the acoustic control method, will allow timely identification of hazardous areas of the “massif–working–support” system and prevent possible accidents, thereby increasing the safety of mining operations.

Key words: acoustic parameters, geomechanical monitoring, geomechanical system, support, rock massif, fracturing.

REFERENCES

1. Antsiferov, A.V., Skipochka, S.I., Yalansky, A.O. and etc. (2010), *Geomekhanichniy monitoring pidzemnih geotekhnichnih system* [Geomechanical monitoring of underground geotechnical systems], Noulidzh, Donetsk, Ukraine.
2. Skipochka, S.I., Palamarchuk, T.A., Sergienko, V.N. (2018), “Geomechanical monitoring for underground mining mineral deposits”, *Innovative development of resource-saving technologies for mining. Multi-authored monograph*. Sofia: St. Ivan Rilski, pp. 147–167.
3. Sadovsky, M.A. (2004), *Izbrannie trudi: Geofizika I fizika vzriva* [Selected works: Geophysics and physics of the explosion], Nauka, Moscow, Russia.
4. Latyshev, O.G., Kazak, O.O. (2017), “Influence of disturbed rocks on their properties and condition”, *Izvestiya UGGU*, vol. 4 (48), pp. 62–65.
5. Gudkov, V.M., Katkov, G.A. (2008), “Resistance of the rock mass”, *Gorniy informatsionno-analiticheskiy bulletin*, no. 2, pp. 119–121.
6. Demin, V.F., Yavorsky, V.V., Demina, T.V. (2015), “The study of the stress state of the marginal array around excavation workings, depending on the influence of mining and technological factors”, *Mezhdunarodniy zhurnal prikladnih I phundamentalnih issledovaniy*, no. 7, pp. 196–200.
7. Pleshko, M.S., Kroshnev, D.V. (2008), “Influence of the properties of hardening concrete on the lining-array system interaction in the bottomhole zone of a vertical well”, *Gorniy informatsionno-analiticheskiy bulletin*, no. 9, pp. 320–325.
8. Solodyankin, A.V. and etc. (2016), “Effective way to maintain working difficult conditions of mines Western Donbass”, *Suchasni resursoenergozberigauchi tehnologiyi girnichogo virobnitstva*, no. 2 (18), pp. 41–48.
9. Shepelenko, S.Yu., Gapeev, S.N., Logunova, A.O., Kargapolov, Yu.V. (2014), “Assessment of the influence of lining parameters on the stress-strain state of the system “preparatory development-lining-security design”, *Phorum girnikiv-2014. Materialy mizhn. Conf.* [Miners Forum - 2014: materials International conf.] Dnipropetrovsk, October 1-4, 2014, pp. 207–211.
10. Carcione, J.M., Helle, H.B., Santos, J.E., Ravazzoli, C.L. (2005), “A constitutive equation and generalized Gassmann modulus for multimineral porous media”, *Geophysics*, vol. 70, no. 2, pp. 17–26.
11. Nikitin, A.N., Ivankina, T.I., Ignatovich, V.K. (2009), “Features of the propagation of longitudinal and transverse elastic waves in textured rocks”, *Izv. RAN. Fizika zemli*, no. 5, pp. 57–69.
12. Rib, S.V., Voloshin, V.A., Zelinsky, A.V., Fryanov, V.N. (2016), “Comprehensive studies of geomechanical processes in the geo-massif and displacement of the earth's surface during the construction of inclined trunks in the conditions of the mines of the Erunakovsky district”, *Vestnik Sibirskogo Gosudarstvennogo industrialnogo universiteta*, no. 1(15), pp. 20–27.

Стаття надійшла 03.12.2018.