

2. **Андреев М.М.** Опытнo-промышленная проверка физико-химического метода прогноза метанообильности выемочного участка // Совершенствование технологических процессов добычи угля на шахтах Донбасса. — Донецк: Донуги, 1990.

© *Андреев М.М., Камышан В.В., Ярембаш М.И., 2005*

УДК 550.8.07/.08:681.518.54:622.02

Доктора. техн. наук УСАЧЕНКО Б.М., ЯЛАНСКИЙ А.А., ПАЛАМАРЧУК Т.А.,
канд. техн. наук СЕРГИЕНКО В.Н. (ИГТМ им. Н.С. Полякова НАНУ)

МЕТОДИКА КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ПОРОДНЫХ МАССИВОВ И СИСТЕМЫ «КРЕПЬ-МАССИВ»

Большое внимание разработке методического и аппаратного обеспечения при проведении контроля свойств и состояния горных пород в лабораторных, полевых и шахтных условиях постоянно уделялось исследователями ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины, УкрНИМИ, НГУ Украины. В результате этого многолетнего труда разработаны и изданы руководящие нормативные документы, утвержденные ВГО «Союзуглегеология» и Мингео СССР: «Методические указания по разработке руководства для экспресс-определения прочностных свойств углевмещающих пород по керну геологоразведочных скважин (на основе установления корреляционных связей между геологическими, акустическими и прочностными характеристиками горных пород)», «Руководство по экспресс-определению прочностных свойств углевмещающих пород Донбасса по их геологическим характеристикам и акустическим измерениям кернов геологоразведочных скважин», «Временные методические указания по экспресс-определению упругих свойств горных пород ультразвуковым методом на необработанных образцах керна геологоразведочных скважин», «Методические рекомендации по инженерно-геологическому изучению глубоких горизонтов месторождений твердых полезных ископаемых при разведке», «Руководство по геофизической диагностике состояния системы «крепь-породный массив» вертикальных стволов». В настоящее время для обеспечения массового высокопроизводительного оперативного и достоверного контроля в угольных шахтах нами разработана первая редакция комплексной методики экспресс-контроля свойств и состояния горных пород без их механической обработки, акустическими и электрометрическими методами [1–5].

Проведены теоретические, экспериментальные и опытно-методические исследования по взаимодействию искусственно созданных сооружений с породным и грунтовым массивами с учетом возможных изменений параметров объекта и окружающей среды во времени и пространстве. На базе экспериментальных данных из технически возможных методов контроля установлены преимущества виброакустического, электрометрического и электромагнитного, поскольку они являются наиболее информативными, оперативными, достоверными и экономичными при оценке эколого-технического состояния объектов.

Дано теоретическое обоснование применения виброакустического метода для контроля различных нарушений (заколов, отслоений) в кровле. Установлено, что на частоту собственных колебаний участков кровли оказывают влияние три фактора: тип породы, условия закрепления и размеры отслоений.

Для различных условий закрепления отслоения со сторонами a , b и толщиной d получены формулы для определения частоты его собственных колебаний, величин статического прогиба, а также возникающих в нем максимальных напряжений:

$$\omega_i = \alpha_i V_p^0 d \sqrt{\beta_i A \left(1 \pm \frac{\sigma_{zz}^0}{3K} \right)}; A_{cmi}^{max} = \frac{\gamma_i}{V_p^0 d^2 \beta_i A \left(1 \pm \frac{\sigma_{zz}^0}{3K} \right)};$$

$$\sigma_{ix}^{max} = \frac{\xi_i (a^2 + vb^2) \pi^2 \rho}{\beta_i da^2 b^2}, \quad (1)$$

где V_p^0 — скорости продольных волн в ненарушенном массиве; v — коэффициент Пуассона; A — акустический коэффициент трещиноватости; σ_{zz}^0 — компоненты начальных напряжений; K — модуль всестороннего сжатия (знак «-» соответствует сжатию, а знак «+» — растяжению); α_i , β_i , γ_i , ξ_i — коэффициенты для различных условий закрепления отслоения.

С уменьшением степени свободы отслоения кровли выработки наблюдается возрастание частоты собственных колебаний по параболическому закону, уменьшение статического прогиба и возникающих при этом максимальных напряжений по гиперболическому закону, что свидетельствует об увеличении устойчивости участка кровли. Об этом свидетельствуют также увеличение скорости упругих волн, уменьшение размеров кровли и коэффициента Пуассона, т.е. степени ее трещиноватости. Таким образом, частота и амплитуда собственных колебаний участка кровли горной выработки являются весьма информативными характеристиками его состояния.

Определены динамические параметры участков кровли с учетом потерь кинетической энергии при ударе. Установлено, что, чем выше скорость ударника в момент его удара о кровлю и ниже частота ее собственных колебаний, тем больше прогиб участка кровли и выше динамические напряжения.

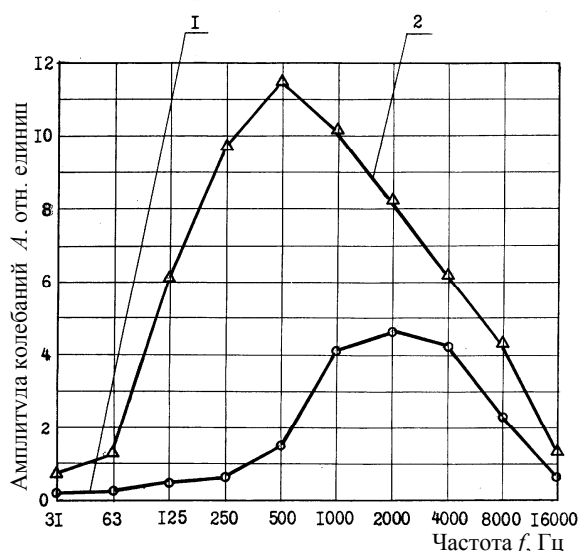


Рис. 1. Спектральный состав отклика на ударное воздействие для монолитного и нарушенного блоков

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработана методика виброакустического контроля, включающая критерии выбора мест измерений, наиболее оптимального количества точек измерений, условий контакта датчика колебаний с исследуемым объектом и требований к интерпретации результатов виброакустических измерений. Более высокий уровень амплитуды в любой области соответствует менее устойчивому заколу или отслоению (рис. 1). Мощность отслоения можно оценить по нахождению максимумов амплитуд — чем ниже частота максимума, тем больше мощность отслоения. Установлено, что на сильно нагруженных крепях, имеющих жесткий механический кон-

такт с массивом, спектр колебаний практически не содержит низкочастотных составляющих и имеет четкий пик в области 1–2 кГц; при ослаблении контакта крепи с породами максимум спектра смещается в область более низких частот.

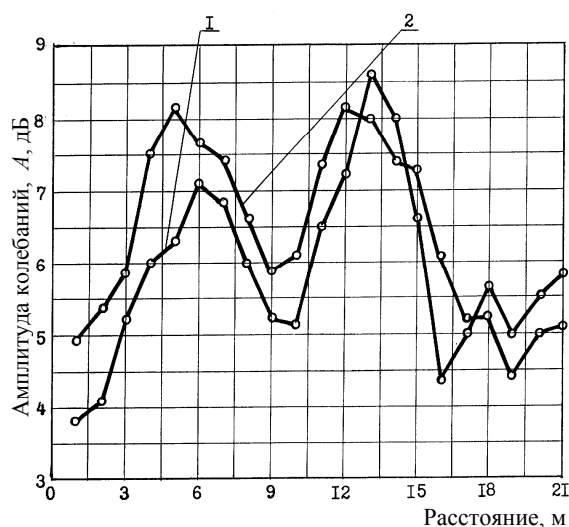


Рис. 2. Результаты оценки нагруженности арочной крепи виброакустическим методом в горизонтальной выработке: 1 — правая сторона выработки; 2 — левая сторона выработки

На рис. 2 для примера представлены результаты оценки нагруженности арочной крепи виброакустическим методом горизонтальной выработки. Наблюдается стабильная разница в величинах амплитуд между левыми и правыми сторонами выработки, что свидетельствует о влиянии посторонних постоянно действующих сил: геотектоники, очистных работ, зон неоднородностей массива.

В результате многочисленных экспериментальных исследований нами установлено, что для контроля скрытых заколов, отслоений и других нарушений в различных видах объектов наиболее информативным методом является метод виброакустического контроля. Разработаны унифицированные средства

виброакустического контроля, среди которых наиболее перспективными являются приборы ИСК и комплект аппаратуры ДВШ.

Прибор-индикатор ИСК-1 отличается высокой оперативностью и информативностью. Он представляет собой спектроанализатор акустических и электрических сигналов параллельного принципа действия, позволяющий оценить их уровни в десяти частотных диапазонах всего за несколько секунд при нанесении одного удара. Питание индикатора автономное от аккумуляторной батареи, время непрерывной работы — 20 часов. Прибор-индикатор предназначен для контроля видимых и скрытых отслоений, расслоений в различных объектах и оценки их относительной устойчивости.

Для контроля бетонной и железобетонной облицовки используется специализированная виброакустическая аппаратура ДВШ-2. В комплект этой аппаратуры входят два индикатора ДВШ-2-К для контроля конструкций и ДВШ-2-М, с помощью которого оценивают свойства материалов.

Индикатор ДВШ-2-К регистрирует в цифровом виде число свободных колебаний конструкций, превышающих заданный уровень. Для генерации пакета затухающих механических колебаний служит специальный возбудитель ударного действия. Индикатор ДВШ-2-М определяет длительность процесса ударного воздействия возбудителя на поверхности контролируемого материала.

С учетом особенностей горной геофизики разработаны теоретические основы электрометрического контроля состояния плоскопараллельных породных структур. Получена аналитическая связь между кажущимся электрическим сопротивлением горных пород или любого другого объекта геотехнических систем и их влажностью, пористостью, механическими напряжениями, деформационными параметрами, а значит и трещиноватостью среды.

Такой теоретический подход позволяет оценить основные влияющие факторы на электрическое сопротивление геоматериалов при отработке методики их диагностики в различных условиях.

Для горных пород различной степени влажности с учетом начальных напряжений в породном массиве, при условии некоторых допущений, получены следующие выражения для определения удельного электрического сопротивления для слоев горных пород с коэффициентом водонасыщения, меньшим 0,8:

$$\rho_i = \frac{\sqrt{6}\rho_c^{1/2}\rho_e^{1/2}\left(1 \pm \frac{\sigma_{ii}^0}{3K}\right)^{3/2}}{\pi\left(1 \pm \frac{\sigma_{ii}^0}{E}\right)^2 W_e^{1/2}\gamma_1^{1/2}}, \quad (2)$$

а для горных пород с коэффициентом водонасыщения, большим 0,8:

$$\rho_i = \frac{1,12\rho_c^{1/2}\rho_e^{1/2}\left(1 \pm \frac{\sigma_{ii}^0}{3K}\right)^{3/2}}{\sqrt{\pi}\left(1 \pm \frac{\sigma_{ii}^0}{E}\right)^2 m_0^{1/2}}, \quad (3)$$

где ρ_e , ρ_c — удельные электрические сопротивления воды в порах и в минеральном скелете соответственно; W_e — влажность горных пород на единицу сухой массы в долях единицы; γ_1 — отношение удельного веса горных пород к удельному весу воды; m_0 — пористость горных пород; (по индексу i нет суммирования).

Из полученного решения следует, что на величину удельного электрического сопротивления оказывает влияние как объемное напряженное состояние, так и величина напряжений, действующих в направлении, в котором производятся замеры.

С целью выявления зависимости удельного электрического сопротивления от открытой пористости или трещиноватости геосреда рассмотрена как система, состоящая из твердой, жидкой и газообразной фаз. Так как выражения, полученные при точном решении задачи, весьма громоздки, то, приняв ряд допущений, получено уравнение:

$$\rho_{ni} = \left(\frac{1 - m_n}{\rho_n} - \frac{m_n^2(1 - m_n)^3}{\rho_e} \right)^{-1}, \quad (4)$$

где ρ_n — удельное электрическое сопротивление ненарушенного горного массива; m_n — открытая пористость или степень трещиноватости исследуемого участка.

Из приведенного уравнения следует, что зависимость удельного электрического сопротивления среды от пористости изменяется по гиперболическому закону, что совпадает с результатами экспериментальных исследований (погрешность не превышает 17%).

Электрометрические методы позволяют контролировать трещиноватость объектов и оценивать фильтрационные процессы в грунтах и горных породах. Для работы в стволах предпочтительными являются электропрофилирование путем использования четырехэлектродного зонда со скользящими контактами и бесконтактное высокочастотное профилирование с емкостным автогенераторным преобразовате-

лем. Бурение шпуров в стволах достаточно трудоемкое, поэтому оно применяется в основном при выполнении тампонажных работ.

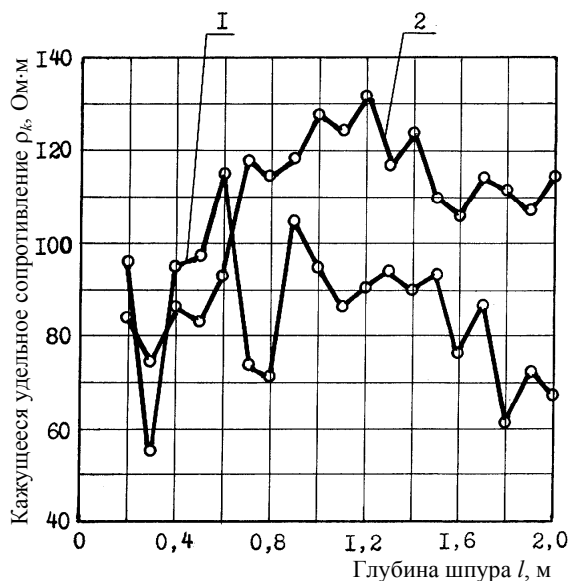


Рис. 3. Характерные зависимости кажущегося удельного сопротивления от расстояния к контуру горизонтальной выработки

Наиболее эффективным методом, дающим интегральную оценку глубины трещиноватой зоны по завышенному значению кажущегося удельного сопротивления, является низкочастотная контактная электрометрия. Она же позволяет по минимуму сопротивления выделить положение зоны опорного давления и оценить ее асимметрию в горизонтальном сечении (рис. 3). Использование электрометрии после выполнения тампонажа позволяет оценить его качество. Критерием в этом случае служит степень равномерности значений электрического сопротивления. При необходимости выделения отдельных трещин, пересекающих шпур, следует использовать аппаратуру высокочастотного бесконтактного каротажа с использованием мини-

возможного по размерам первичного преобразователя. Методика натуральных измерений электрометрическим методом без предварительной механической обработки горных пород включает: электрическое зондирование, профилирование, метод кажущегося сопротивления и токовый каротаж. Установлены критерии и выявлены наиболее эффективные параметры геофизического контроля проявлений горного давления в различных геофизических структурах [6].

Базовым образцом для электрометрического контроля является прибор ИШИС-3. С учетом конкретных технических характеристик разработанных приборов и научного обоснования использования методов диагностики и принципов интерпретации данных для конкретных объектов разработаны конкретные методики. Проведено внедрение средств и отраслевых методик на объектах министерств угольной промышленности, транспорта.

Искробезопасный измеритель сопротивления ШИИС-3 предназначен для измерения кажущегося удельного электрического сопротивления грунтов и горных пород в массиве, а также горизонтальных бетонных поверхностей, что позволяет контролировать трещиноватость объектов и оценивать фильтрационные процессы в грунтах вдоль магистральных каналов. Рекомендуется для применения в шахтах, подземных и наземных сооружениях, в том числе опасных по взрыву, газу и пыли.

Значительно возрос интерес к связным полям, к которым относится сейсмоэлектрика. Влияние сейсмоэлектрических свойств некоторых горных пород на распространение в них акустической (сейсмической) волны состоит в том, что при этом может индуцироваться электромагнитная волна.

Решена система уравнений, описывающих распространение акустических волн в сейсмоэлектрически активных горных породах с учетом начального напряженного состояния, и получены выражения для скоростей и коэффициентов затухания продольных и поперечных волн, модифицированных электрическим полем.

Плотности энергий продольной и поперечной акустических и электромагнитных волн равны:

$$W_u = \rho u_0^2 \omega^2 / 2; \quad (5)$$

$$W_E = \varepsilon \varepsilon_0 E^2 / 2, \quad (6)$$

где u – вектор смещения; ε — диэлектрическая проницаемость; ε_0 — электрическая постоянная; E — напряженность электрического поля.

Экспериментальные плотности энергий акустических и электромагнитных колебаний могут быть определены из следующих выражений:

$$W_u = \sum_{i=1}^n (A_i^u)^2 T_i^u; \quad (7)$$

$$W_E = \sum_{i=1}^n (A_i^E)^2 T_i^E, \quad (8)$$

где $A_i^{u,E}, T_i^{u,E}$ — амплитуды и длительности акустических и электромагнитных импульсов.

После простых преобразований (5)–(8) получаем выражение, из которого следует, что напряженное состояние горных пород можно определить по основным ее упругим и электрическим параметрам, а также по отношению энергий электромагнитного и акустического излучений.

Исследования, проведенные в последние десятилетия, позволили установить, что процесс разрушения горных пород при создании новых свободных поверхностей связан с генерацией импульсного электромагнитного излучения в широком спектральном диапазоне. Максимум спектральной плотности импульсного электромагнитного излучения зависит от скорости образования новых поверхностей и контролируемого объема породного массива. При лабораторных исследованиях процесса разрушения породных образцов установлены величины характерных частот, которые составляют $\sim 100 \text{ кГц} \div 10 \text{ МГц}$. Взаимное перемещение отдельных блоков породного массива, ограниченных тектоническими образованиями, вызывают генерацию импульсных колебаний частот от $1 \div 90 \text{ Гц}$.

В качестве примера использования метода ЭМИ для контроля состояния массива горных пород при разработке угольных месторождений приведено изменение интенсивности ЭМИ приконтурной области угольного массива вдоль лавы (рис. 4).

Как показали проведенные исследования для условий нерудных месторождений, заметный градиент напряженности электромагнитного поля возможен для расстояний порядка 10 м. Характерный диапазон частот для масштабов такого порядка — $1\text{--}90 \text{ кГц}$.

При регистрации природного электромагнитного излучения возможна фиксация как электрических, так и магнитных компонент поля. Однако более высокие технические показатели аппаратуры, при условии ограниченности ее размеров, обеспечиваются при регистрации магнитных компонент путем использования антенн с магнитными сердечниками.

Сложность с точки зрения геомеханики системы разработки исследуемых условий обуславливает несколько возможных вариантов контроля для выявления пре-

валирующей роли того или иного фактора при деформировании распределения механических напряжений в породном массиве.

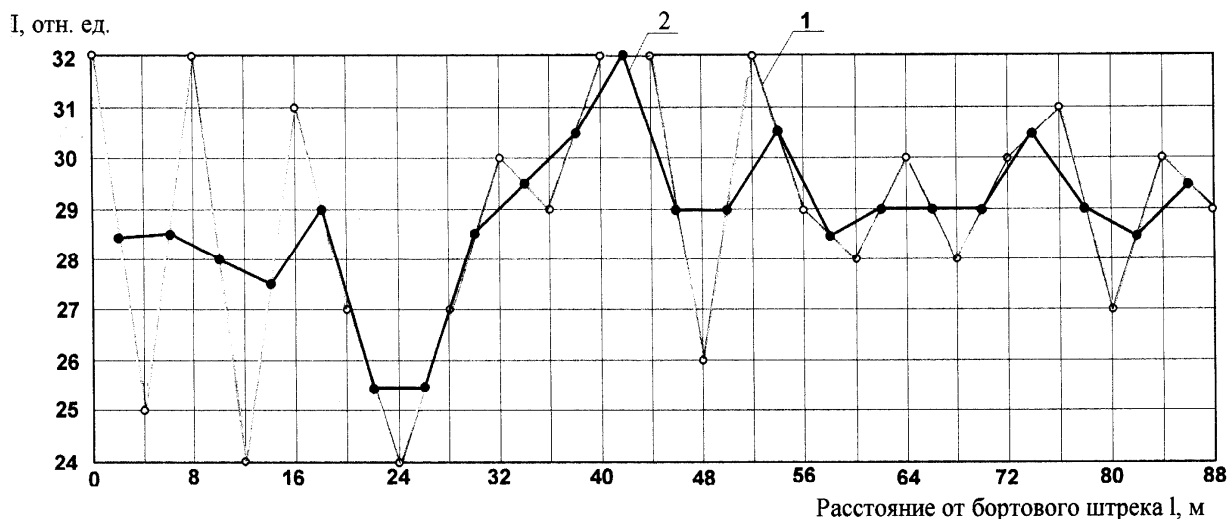


Рис. 4. Изменение интенсивности ЭМИ приконтурной зоны угольного массива вдоль лавы: 1 — первичные показания; 2 — сглаженная зависимость

Основным вариантом, который в наиболее полной мере характеризует состояние междуканнерных целиков и пород всячего бока, является профилирование по штрекам, пройденным в всячем боку на промежуточных горизонтах. Согласно результатам аналитических исследований и проведенного авторами физического моделирования, именно в промежутке между штреками промежуточных горизонтов всячего бока и рудного пласта возникают максимальные деформации, в процессе которых некоторая часть энергии выделяется в виде электромагнитного излучения. При стабильных размерах по длине пласта камер и целиков целесообразно делать один замер в центре целика, следующий — в центре камеры и т.д. Для более точного определения точки измерения необходима ее привязка к пикетам или маркшейдерским точкам. С этой целью рекомендуется использование мерной ленты типа РИО. При измерениях используют внутреннюю горизонтальную антенну, расположившую прибор по оси выработки. Рекомендуемый режим измерений, который обеспечивает высокую оперативность контроля и позволяет выделить аномальные значения: время измерений — 0,1 с; степень усиления — 3. В каждой точке необходимо производить 6 измерений. Как правило, это обеспечивает с достоверной вероятностью не менее 0,95 отклонение среднеарифметического значения, от такого же при больших выборках (100 измерений) в пределах 2%.

Дополнительные варианты используют при обследовании нетипичных объектов: блоков с нестандартными геометрическими параметрами или с явными проявлениями начала разрушения, участков со сложным геологическим строением, апробацией экспериментальной технологии ведения очистных работ и т.п. Как правило, исследуемые объекты локализованы в границах нескольких блоков и могут быть источником ценной информации для уточнения критериев устойчивости подземных выработок. При изучении состояния подобных объектов с помощью регистрации природного электромагнитного излучения уместно воспользоваться следующими рекомендациями:

1) шаг измерений должен быть равен 5 м с обязательной привязкой к маркшейдерским точкам;

2) измерения следует проводить на основных горизонтах, которые ограничивают исследуемый объект по вертикали, а также на всех доступных промежуточных горизонтах, расположенных между вышеуказанными основными;

3) измерения целесообразно проводить как в штреках, пройденных висячем боку, так и в лежачем, а также в камерах, используя выносную антенну;

4) при существовании ортов в целиках следует провести измерения в них (допускается шаг до 10 м) с желательной привязкой точек измерений к геологическим строениям массива, пересеченных ортом.

Совокупность технических и методических разработок для контроля и диагностики породных массивов и системы «крепь-породный массив» включает экспериментальные, опытные образцы, разовые партии и серийные приборы.

Экономическая эффективность от внедрения указанных технических средств включает снижение стоимости ремонтных работ за счет возможности селективного предупреждающего ремонта, увеличение срока эксплуатации объекта и предупреждения возможных убытков от аварий.

Библиографический список

1. Паламарчук Т.А., Хохолев В.К., Приходченко В.Л. Теоретические обоснования исследования процесса деформирования твердых тел методами АЭ и ЭМИ; Институт геотехнической механики НАНУ. — Днепропетровск, 1989. — 12 с. — Рус. — Деп. в ВИНТИ 24.05.89, № 3415-Д89.

2. Глушко В.Т., Ямщиков В.С., Яланский А.А. Геофизический контроль в шахтах и тоннелях. — М.: Недра, 1987. — 278 с.

3. **Временные** методические указания по экспресс-определению упругих свойств горных пород ультразвуковым методом на необработанных образцах керна геологоразведочных скважин (РД) / А.А. Яланский, Т.А. Паламарчук, С.И. Скипочка и др. — Л.: ВНИМИ, 1987. — 40 с.

4. **Яланский А.А., Усаченко Б.М., Паламарчук Т.А.** Экспресс-контроль импульсных процессов в углепородном массиве // Матер. II научной школы «Импульсные процессы в механике сплошных сред». — Николаев: НАН Украины, 1996. — С. 142.

5. **Руководство** по геофизической диагностике состояния системы «крепь-породный массив» вертикальных стволов / А.Ф. Булат, Б.М. Усаченко, А.А. Яланский, В.Н. Сергиенко, Т.А. Паламарчук и др. — Донецк: АГН Украины, 1999. — 42 с.

6. **Паламарчук Т.А.** Теоретические основы геофизической диагностики геомеханического состояния породного массива с учетом синергетических процессов: Дис... докт. техн. наук: 05.15.11; 05.15.09. — Днепропетровск, 2002. — 385 с.

© Усаченко Б.М., Яланский А.А., Паламарчук Т.А., Сергиенко В.Н., 2005

УДК 622.831.3

Инж. РЯЗАНЦЕВ А.П. (ОАО «Шахта «Комсомолец Донбасса»)

ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РАЗРЫХЛЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ СПОСОБА БОРЬБЫ С ПУЧЕНИЕМ ПОРОД ПОЧВЫ

Введение. Поддержанию выработок в устойчивом состоянии в условиях сильнопучающих пород посвящено значительное количество работ. Однако, вопрос обеспечения длительной устойчивости технологических артерий шахты является по-прежнему актуальным. А с разработкой глубоких горизонтов все более остро встает