

Д.: Національний гірничий університет, 2015. – Т. 3. – С. 221–232.

Chetverik, M. S., Mishina, O. V. and Chetverik, T. M. (2015), "Structural changes in the economy and unemployment", *Materialy Mizhnarodnoi konferenzii* [Materials international Konferenz], *Forum girnykiv – 2015* [Forum of mining engineers – 2015], Dnepropetrovsk, Ukraine, 30 September – 3 October 2015, pp. 221-232.

Purpose. The aim of this work is the definition of perspective directions of development of the mining industry of Ukraine on the basis of the established link between provision of food, fresh water, electricity and mining.

Findings. Based on the theory of change of the energy systems of the world in time set of the wave the economy and determined the periods of boom and bust that has allowed to establish the regularities of reduction of time for their effective use. This has allowed to substantiate the promising directions of development

of the mining industry of Ukraine. It is established that the necessary reorientation of the economic structure of the Krivbass and mining enterprises. The proposed options diversified mining companies, which will improve their economic efficiency for a long period and to improve ecological situation in the region.

Originality. Studied the complex relationship between the provision of the world's population with food, fresh water, electricity and mining. It is shown that a change in the energy systems of the world will lead to new directions in the field of mining.

Practical value. It is shown that the increase of economic efficiency of mining enterprises of Ukraine and improvement of the environment by expanding their activities in directions that are problematic for Ukraine.

Key words: mining, world population, food, mine and quarry mineralized water, energy, mines, quarries, waste dumps, tailings.

Поступила 29.11.2016



УДК 622.283.74

Наука

С. И. Скипочка /д. т. н./,
В. Н. Сергиенко /к. т. н./, И. С. Красовский

Институт геотехнической механики
им. Н. С. Полякова НАН Украины,
г. Днепро, Украина

Обоснование параметров контроля качества закрепления анкеров в породном массиве вибраакустическим методом

S. I. Skipochka /Dr. Sci. (Tech.)/,
V. N. Sergienko /Cand. Sci. (Tech.)/,
I. S. Krasovskiy

N. S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics
of the NAS of Ukraine
Dnipro, Ukraine
e-mail: skipochka@ukr.net

Rationale of mounting quality control parameters for anchors in rocks by vibroacoustic method

Цель. Обоснование выбора информативного параметра для виброакустического контроля качества закрепления железобетонного анкера в массиве.

Методика. Теоретический анализ колебательных процессов в системе «анкер – закрепляющий слой – массив». Определение параметров затухания колебаний при различной степени защемления анкера. Выбор времени релаксации колебаний в качестве информативного параметра.

Результаты. Теоретически показано существование двух форм продольных колебаний анкера в упруго-вязком закрепляющем слое. Установлено, что информативной является низкочастотная часть спектра. Получено аналитическое выражение связи времени релаксации низшей частоты колебаний со степенью защемления анкера. Даны сведения об устройстве для виброакустического контроля, позволяющего определять время релаксации в натуральных условиях. Приведен пример практического использования разработки в шахте по добыче железной руды.

Научная новизна. Впервые получены аналитические зависимости для описания затухающих колебаний анкера в упруго-вязкой среде.

Практическая значимость. Теоретически и экспериментально доказана возможность оперативной оценки качества установки железобетонных анкеров с использованием неразрушающего виброакустического контроля. (Ил. 3. Табл. 1. Библиогр.: 3 назв.)

Ключевые слова: железобетонный анкер, виброакустический метод, информативный параметр, затухание свободных колебаний.

На украинских железорудных, урановых и нерудных шахтах доминирующей остается технология крепления выработок железобетонной анкерной крепью. Качество установки такой крепи определяется, как правило, субъективной оценкой, а изменения ее характеристик в процессе эксплуатации не контролируются вообще по причине отсутствия соответствующих аппаратуры и нормативно-технической базы. Поэтому обоснование, последующие разработка и внедрение приборно-методического обеспечения контроля качества установки анкеров – важная и актуальная для обеспечения безопасности горных работ научно-техническая задача.

Анализ показал, что среди известных методов горной геофизики, используемых для контроля анкерной крепи [1–3], наиболее перспективен метод ударно-волнового контроля, получивший название «виброакустический». Метод базируется на анализе свободных колебаний анкера после нанесения по нему удара.

Рассмотрим теоретические аспекты виброакустического метода контроля крепи. Простейшая иллюстрация взаимодействия анкера с массивом через закрепляющий слой в процессе виброакустического контроля представлена на рис. 1. На рисунке стальной анкер длиной L и массой m расположен в закрепляющем слое, например, бетоне. Свойства материала анкера характеризуются плотностью ρ_a и скоростью продольной волны (в стержне) V_a , а закрепляющего слоя – плотностью ρ_c , скоростью продольной волны V_c и коэффициентом вязкости η_c . Упругое сопротивление движению анкера в закрепляющем слое описывается показателем жесткости k .

При возбуждении ударником открытой торцевой части анкера возникают два основных вида продольных колебаний: упругая волна в анкере и колебания самого анкера в закрепляющем слое. В забое шпура, на границе анкера с материалом закрепляющего слоя происходит разделение энергии на прошедшую во вторую среду и отраженную. С учетом того, что акустический импеданс стали намного выше импеданса бетона, потери энергии на границе будут небольшими. Аналогичный процесс произойдет и при повторном отражении волны от свободного конца анкера, но уже практически без потерь энергии. Периодическое повторение процесса со все уменьшающейся амплитудой определяет спектральный состав затухающих колебаний в стержне.

Поскольку жесткость стержня намного выше жесткости закрепляющего слоя, возникает и второй вид колебаний. Его можно представить как продольные колебания абсолютно жесткого стержня в упруго-вязкой среде. Для упрощения предположим, что анкер при установке не получил предварительного натяжения, что характерно для технологии, применяемой на украинских железорудных шахтах.

При нанесении удара с усилием F_u , анкер приобретает начальную скорость, вектор которой направлен вдоль оси X . В противоположном направлении будут действовать две силы сопротивления: вязкая F_v , величина которой пропорциональна текущей скорости движущейся массы и длине стержня L , и упругая F_y , величина которой пропорциональна текущему смещению « x ».

Баланс сил, приложенных к анкеру, после завершения действия внешней силы в виде удара, можно записать в виде следующего уравнения:

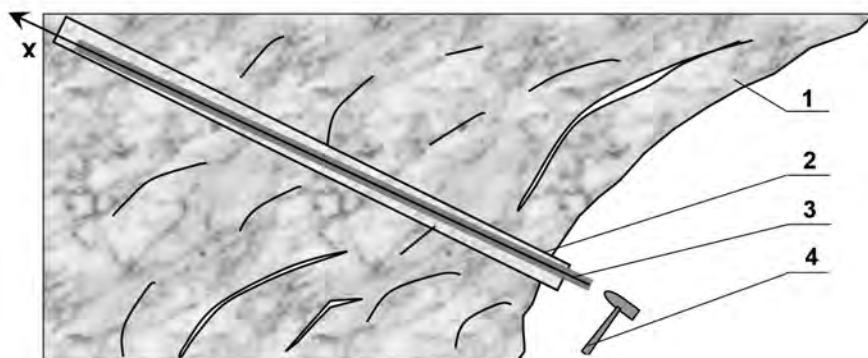


Рис. 1. Иллюстрация к модели динамического взаимодействия анкера с массивом:

1 – породный массив, 2 – шпур с закрепляющим слоем, 3 – анкер, 4 – ударник

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \eta L \frac{dx}{dt} + kx = 0.$$

Решение этого уравнения (после подстановки и некоторых упрощений) имеет вид:

$$x = c_1 e^{-\frac{\eta L}{2m} t} e^{-\frac{\sqrt{\eta^2 L^2 - 4mk}}{2m} t} + c_2 e^{-\frac{\eta L}{2m} t} e^{\frac{\sqrt{\eta^2 L^2 - 4mk}}{2m} t}.$$

После удара динамический колебательный процесс может развиваться в двух направлениях.

При высокой вязкости закрепляющего состава, когда $\eta^2 L^2 - 4mk > 0$, имеет место линейное затухающее перемещение анкера в вязкой среде.

При $\eta^2 L^2 - 4mk < 0$ корень в показателе степени примет вид:

$$i\sqrt{4mk - \eta^2 L^2}.$$

Тогда решение уравнения можно записать как:

$$x = \frac{P_0}{k} + c_1 e^{-\frac{\eta L}{2m} t} e^{-i\frac{\sqrt{4mk - \eta^2 L^2}}{2m} t} + c_2 e^{-\frac{\eta L}{2m} t} e^{i\frac{\sqrt{4mk - \eta^2 L^2}}{2m} t}.$$

Оба слагаемых представляют собой комплексную форму записи затухающего колебательного процесса. Постоянные c_1 и c_2 характеризуют начальную амплитуду продольных колебаний анкера, а степень затухания определяется величиной отношения $\eta L / 2m$.

Физический смысл выражений следующий: чем выше вязкость закрепляющего материала или суммарная длина вязких участков, контактирующих с анкером, тем быстрее затухнет колебательный процесс. Определяющий затухание колебаний множитель свидетельствует также, что чем больше масса анкера, которая уже пришла в движение, тем более инерционным будет колебательный процесс.

Таким образом, критерием качества закрепления анкера в массиве с использованием закрепляющего слоя может быть степень затухания собственных колебаний второго вида, регистрируемая в анкере после его ударного возбуждения.

Практически измерить коэффициент затухания колебаний можно путем сопоставления амплитуд одной из форм колебаний для двух последовательных интервалов времени t_1 и t_2 . Интервал времени Δt , в течение которого амплитуда свободных колебаний уменьшается в заданное число раз, определяется выражением:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2m \ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)}{\eta L}.$$

Входящий в данное выражение коэффициент вязкости является характеристикой, ус-

редненной по длине анкера. Уменьшение суммарной длины участков закрепляющего слоя и уменьшение вязкости в его пределах означает ухудшение условий закрепления анкера, что приводит к увеличению Δt .

Для формулирования требований к аппаратуре контроля оценим величину Δt . Отношение A_1/A_2 примем равным числу e , максимальную длину анкера – 3 м, а его массу 18 кг (для диаметра 24 мм). Для обеспечения подачи по трубопроводу динамическая вязкость η раствора должна составлять от 2 до 4 Па·с, а через 6 часов после нагнетания достигнуть значения около 40 Па·с. Для многих видов тампонажного раствора именно через такой интервал времени понятие прочности твердеющей смеси становится корректным. Вычисленное для данного момента значение $\Delta t = 0,3$ с, а верхний предел значения информативного параметра Δt , соответствующий очень слабому закреплению самого длинного анкера, с запасом можно принять равным 0,5 с.

При длине $L = 3$ м и скорости звука в стали $V_a = 5500$ м/с основная частота колебаний первого вида составит около 1,8 кГц. Колебания второго вида, вызванные продольным движением стержня в заполнителе шпура, ввиду меньшей жесткости колебательной системы, характеризуются более низкочастотным составом спектра.

Таким образом, при создании средств контроля, принцип которых базируется на оценке степени затухания колебаний в анкере, следует учитывать наличие в суммарном сигнале двух совокупностей продольных колебаний. Информативной является преимущественно вторая составляющая, вызванная колебаниями анкера в закрепляющем слое. Для ее выделения используется частотная и временная селекция сигнала. Верхняя граница полосы пропускания должна быть существенно ниже основной частоты колебаний первого вида для наиболее длинных анкеров, а нижняя – обеспечить подавление первой гармоники промышленной частоты 50 Гц. Т. е. рекомендуемая полоса пропускания составляет от 100 до 1200 Гц.

Временная селекция сигнала базируется на том, что высокочастотная часть сигнала затухает быстрее. Действительно, принимая вариант изначально ослабленного закрепляющего слоя в виде бетона с плотностью $\rho_c = 2,2 \cdot 10^3$ кг/м³ и минимально наблюдаемой скоростью продольной волны $V_c = 1,5 \cdot 10^3$ м/с, при известных параметрах стали анкера ($\rho_a = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³ и $V_a = 5,5 \cdot 10^3$ м/с) уменьшение амплитуды виброускорения после одного периода составит 0,86. Дальнейший расчет показывает, что уменьшение начальной амплитуды в e раз наступит уже после 6 периодов, т. е. примерно через 3,3 мс после начала колеба-

тельного процесса. Указанная величина на два порядка меньше ожидаемого значения информативного параметра Δt . Если процесс анализа сигнала начать с некоторой задержкой, порядка 10–20 мс относительно момента возбуждения колебаний, то в его спектре будут преобладать низкочастотные составляющие.

Совместное действие частотной и временной селекции позволяет выделить компоненту сигнала, в которой уже просматривается основная гармоника низкочастотной составляющей. С использованием цифровых методов обработки сигнала в средстве контроля можно будет определить величину Δt .

Используя описанный выше принцип, был разработан и опробован в условиях шахты «Новая» ООО «Восток-Руда» экспериментальный образец виброакустического индикатора (рабочее название КВАК-1), в комплект которого входят: электронный блок, два датчика вибрации и чехол (рис. 2).

Активные датчики осуществляют преобразование виброускорения в электрический сигнал, его усиление и частотную фильтрацию. Отличия датчиков состоит в их конструктивных особенностях. Первый выполнен на базе зажима типа «крокодил» и предназначен для установки на хвостовик анкера. Второй, с коническим концентратором, имеет более широкие возможности для регистрации вибрации металлокрепки произвольной конструкции.

В электронном блоке осуществляется цифровая обработка сигнала, полученного с выхода датчика. Диапазон определения длительности временного интервала, в течение которого амплитуда колебаний падает в e раз (время релаксации), составляет от 0 до 999 мс. Информация выводится на четырехразрядный жидкокристаллический индикатор, причем сегменты последнего разряда предназначены также для индикации состояния встроенной аккумуляторной батареи номинальным напряжением 3,7 В.

Обновление информации происходит каждый раз после прихода нового сигнала с датчи-



Рис. 2. Комплект экспериментального образца виброакустического индикатора КВАК-1

ка. Достоверность информации обеспечивается серией измерений в каждой точке. Количество определений в точке определяется экспериментально, но, как правило, должно быть не менее 6.

Один из примеров практического использования разработки – обследование откаточных выработок горизонта 535 м шахты «Новая» ООО «Восток-Руда», состояние анкерного крепления которых, по данным визуальных наблюдений, оценивалось как удовлетворительное. Однако виброакустический контроль показал, что после 10 лет эксплуатации сформировались участки массива с повышенной трещиноватостью пород, где произошло постепенное разрушение массива в приконтурной зоне с частичным обнажением анкеров и существенным ухудшением показателей заземления, а значит, и несущей способности анкеров. На рис. 3 проиллюстрированы участки анкерного крепления слаботрещиноватых пород (рис. 3а) и нарушенных сильнотрещиноватых пород (рис. 3б).

По результатам аппаратного контроля анкерного крепления были определены критерияльные значения информативного параметра оценки состояния системы «анкер – массив» виброакустическим методом для условий шахты «Новая». Значения параметров приведены в табл. 1.



а)



б)

Рис. 3. Состояние анкерного крепления на участках кровли, сложенной слаботрещиноватыми (а) и сильнотрещиноватыми (б) породами

**Критериальные значения информативного параметра
виброакустического метода контроля состояния анкерного крепления**

Значение информативного параметра Δt , мс	Оценка качества закрепления анкера	Описание состояния системы «анкер – массив»
Менее 40	Хорошее	Крупноблочная структура массива, анкер не поддается смещению после серии ударов молотком
От 40 до 50	Удовлетворительное	Массив вокруг анкера разрушен, но не обрушился, после ударов молотком возможно выкрашивание бетона со шпура
Более 50	Неудовлетворительное	Мелкоблочная структура массива с частичным обрушением вокруг анкера вместе с бетоном, перемещение анкера в шпуре под действием ударов

Выводы

1. Разработана математическая модель динамического взаимодействия металлического элемента железобетонного анкера с закрепляющим слоем.

2. В качестве критерия качества закрепления анкера в массиве определено время релаксации его затухающих колебаний в закрепляющем слое.

3. Разработан и апробирован в условиях железорудной шахты экспериментальный образец виброакустического индикатора КВАК-1 для оценки качества закрепления железобетонных анкеров.

4. При обеспечении финансирования заинтересованными организациями данная разработка может быть реализована в промышленном масштабе, передана и внедрена на горнодобывающих предприятиях, что существенно повысит как эффективность анкерного крепления, так и безопасность труда горнорабочих.

Библиографический список / References

1. Buys B. J. Rock bolt condition monitoring using ultrasonic guided waves / B. J. Buys, P. S. Heyns, P. W. Loveday // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2009. – Vol. 108. – P. 95–105.

Buys B. J., Heyns P. S., Loveday P. W. (2009) Rock bolt condition monitoring using ultrasonic guided waves. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 108, pp. 95-105.

2. Контроль качества установки железобетонных анкеров электрометрическим способом / М. В. Корнилков, В. Е. Петряев, В. Е. Боликов, Д. Ю. Рябухин, Е. В. Канков // Изв. вузов. Горный журнал. – 2014. – № 3. – С. 18–21.

Kornilkov M. V., Petryaev V. E., Bolikov V. E., Rjabuhin D. Ju., Kankov E. V. (2014) *Kontrol kachestva ustanovki zhelezobetonnyh ankerov elektrometricheskim sposobom* [Reinforced concrete anchors installation quality control by electrometric method]. *Proceedings of the universities. Mining journal*, no. 3, pp. 18-21.

3. Діагностика стану систем «кріплення – масив» та «підйомна посудина – жорстке армування» шахтних стовбурів. Порядок та методика виконання: ГР-032-2004 / під ред. А. Булата. – Дніпропетровськ: Економіка, 2004. – 40 с.

Bulat A. (ed.) (2004) *Diagnostyka stanu system «kriplennya - masyv» ta «pidjomna posudyna - zhorstke armuvannya» shaxtnykh stovburiv. Poryadok ta metodyka vykonannya: GR-032-2004* [Diagnosis of the systems «mounting – array» and «lifting vessel – rigid reinforcement» of mine shafts. Procedure and method of implementation: SR-032-2004]. Dnipropetrovsk, Economy, 40 p. (in Ukrainian).

Purpose. Rationale of informative parameter selection for vibroacoustic quality control of reinforced concrete anchor mounting in the array.

Methodology. Theoretical analysis of oscillating processes in the «anchor – holding layer – array» system. Oscillation damping parameters determination at different stages of anchor mounting. Informative parameter – relaxation time of the oscillations.

Findings. The existence of two forms of the longitudinal oscillations of the anchor in the visco-elastic holding layer was theoretically demonstrated. Established, that the informative part of the spectrum is low-frequency one. An analytical expression for the dependency of low-frequency relaxation time and different stages of anchor mounting was found. Device information for vibroacoustic monitoring, that allows determining the relaxation time in situ, is given. An example of practical use in the iron ore mine is presented.

Originality. For the first time, analytical dependences for description of the damping oscillation of the anchor in the visco-elastic medium were established.

Practical value. The possibility of the rapid assessment of reinforced concrete anchors mounting quality using nondestructive vibro-acoustic control was theoretically and experimentally proved.

Key words: reinforced concrete anchor, vibroacoustic method, informative parameter, damping of free oscillations.

**Рекомендована к публикации
д. т. н. М. С. Четвериком**

Поступила 10.01.2017