

К ОБОСНОВАНИЮ УДАРНО-ВОЛНОВОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ АНКЕРНОЙ КРЕПИ

С. И. Скипочка, В. Н. Сергиенко, И. С. Красовский

Институт геотехнической механики им. Н. С. Полякова НАН Украины

ул. Симферопольская, 2-А, г. Днепр, 49005, Украина.

E-mail: skipochka@ukr.net.

Обоснована необходимость использования методов неразрушающего контроля для оперативной оценки качества установки анкерной крепи. Показаны преимущества ударно-волнового метода. Рассмотрена модель системы «анкер – вязкий закрепляющий слой – массив». Определен информативный параметр контроля – время релаксации свободных колебаний анкера. Даны краткие сведения об аппаратуре КВАК, которая в автоматическом режиме осуществляет первичную статистическую обработку данных. Рассмотрен алгоритм получения тарировочных зависимостей, связывающих значение информативного параметра с качеством закрепления анкера. При разработке алгоритма использован метод максимального правдоподобия.

Ключевые слова: массив, анкер, закрепление, качество, контроль, аппаратура, алгоритм.

ДО ОБГРУНТУВАННЯ УДАРНО-ХВИЛЬОВОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ АНКЕРНОГО КРІПЛЕННЯ

С. І. Скіпочка, В. М. Сергієнко, І. С. Красовський

Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України

вул. Сімферопольська, 2-А, м. Дніпро, 49005, Україна.

E-mail: skipochka@ukr.net.

Обґрунтовано необхідність використання методів неруйнівного контролю для оперативної оцінки якості встановлення анкерного кріплення, а саме варіант ударно-хвильового методу контролю якості кріплення анкера в масиві гірських порід, інформативний параметр якого не залежить від сили удару та має високу достовірність результатів вимірювань. Показано перевагу ударно-хвильового методу у порівнянні з існуючими методами руйнівного і неруйнівного контролю. Метод досліджень, що використано в роботі – математичне моделювання. Виконано теоретичний аналіз процесів згасання вільних коливань анкера, що кріплений в породному масиві по всій довжині. Розглянуто математичну модель системи «анкер – в'язкий кріплюючий шар – породний масив». Експериментальним шляхом визначено інформативний параметр контролю – час релаксації вільних коливань анкера. Запатентовано методику ударно-хвильового контролю якості кріплення та несучої здатності анкерів різного типу: металополімерних, з механічним замком, кріплених розчином на основі цементного в'язучого тощо. Розроблено макетний зразок і надано короткі відомості про апаратуру з робочою назвою КВАК, яка в автоматичному режимі здійснює первинну статистичну обробку даних. Методом максимальної правдоподібності розроблено алгоритм отримання тарувальних залежностей, що пов'язують значен-

ня інформативного параметра з якістю закріплення анкера. Розробка відрізняється від існуючих високою оперативністю контролю, слабкою залежністю інформативного параметра від сили удару, наявністю програмно реалізованого алгоритму статистичної обробки даних для підвищення достовірності результатів контролю.

Ключові слова: масив, анкер, закріплення, якість, контроль, апаратура, алгоритм.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Широкомасштабное внедрение анкерного крепления на украинских угольных шахтах за последние 10-15 лет коренным образом улучшило ситуацию с поддержанием участковых горных выработок и при приемлемых экономических затратах существенно повысило технологичность сооружения выработок и безопасность их эксплуатации [1]. Эмпирический выбор параметров, характерный для первоначального этапа внедрения анкерной крепи, сменился разработкой обоснованных методик расчетов паспортов крепления горных выработок [2]. Однако массовое использование анкерной крепи создало и новые проблемы, одна из которых – невозможность визуальной оценки качества закрепления анкера в массиве. Как вариант решения проблемы в практике горного дела используется выборочная проверка усилия закрепления анкеров путем их выдергивания. Такой подход связан с дополнительными затратами на повторную установку анкеров и отличается невысокой статистической достоверностью. Еще реже применяется установка на участках анкерования глубинных наблюдательных станций для контроля динамики расслоения массива [3]. Оба метода достаточно трудоемкие и экономически затратные, поэтому используются, как правило, только в исследовательских целях.

Для массового контроля качества установки анкерной крепи более приемлемы методы неразрушающего контроля [4, 5], среди которых самым перспективным является метод, относящийся к группе ударно-волновых. Идея метода заключается в принудительном возбуждении колебаний в анкере путем нанесения удара, регистрации и определении параметров колебания анкера, обработке и анализе полученной информации. Например, изменение степени заземления анкера в массиве приводит к соответствующему изменению амплитуды и длительности колебаний анкера, а также их спектрального состава. Одна из существенных проблем ударно-волнового метода контроля – зависимость характеристик от силы удара. Есть два пути решения этой проблемы: использование устройств с нормированной силой удара либо информативного параметра, который не зависит от силы удара. Известно, что в широких пределах наименее зависит от силы удара спектральный состав колебаний. Однако спектроанализаторы – это сложные и дорогостоящие устройства, работа с которыми, включая интерпретацию спектрограмм, требует высокой квалификации персонала.

Цель работы состоит в обосновании более совершенного варианта метода контроля, относящегося к группе ударно-волновых, отличающегося высокой оперативностью, слабой зависимостью информативного параметра от силы удара, наличием программно-реализуемого алгоритма статистической обработки данных для повышения достоверности результатов контроля.

МАТЕРИАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ІССЛЕДОВАНИЙ. Для амплитуды спектра затухающего колебательного процесса в анкере, контактирующего по всей длине с вязко-упругой средой, нами [6] получено выражение:

$$x_n = A_n e^{-\frac{\eta l}{2m}t} e^{-i\frac{\sqrt{4mk-\eta^2 l^2}}{2m}t}, \quad (1)$$

где A_n – начальная амплитуда для n -ой спектральной составляющей; η – коэффициент вязкости среды на контакте с анкером; l – длина анкера; m – масса анкера; k – коэффициент упругости среды; t – время от момента возбуждения.

Также был обоснован выбор в качестве информативного параметра времени релаксации, которое не зависит от силы удара и определяется выражением:

$$\tau = \frac{1}{\beta} = \frac{2m}{\eta l} = \frac{C}{\eta^*}, \quad (2)$$

где $\beta = \eta l / 2m$ – коэффициент затухания; C – постоянная, определяемая конструкцией анкера; η^* – эффективная вязкость среды.

Введенный параметр – эффективная вязкость среды η^* является физическим эквивалентом случая неполного защемления анкера по длине. Будем считать, что колебательный процесс для этого случая аналогичен процессу при контакте со сплошной, но менее вязкой средой. Схема замены действительной системы на эквивалентную модель приведена на рис. 1.

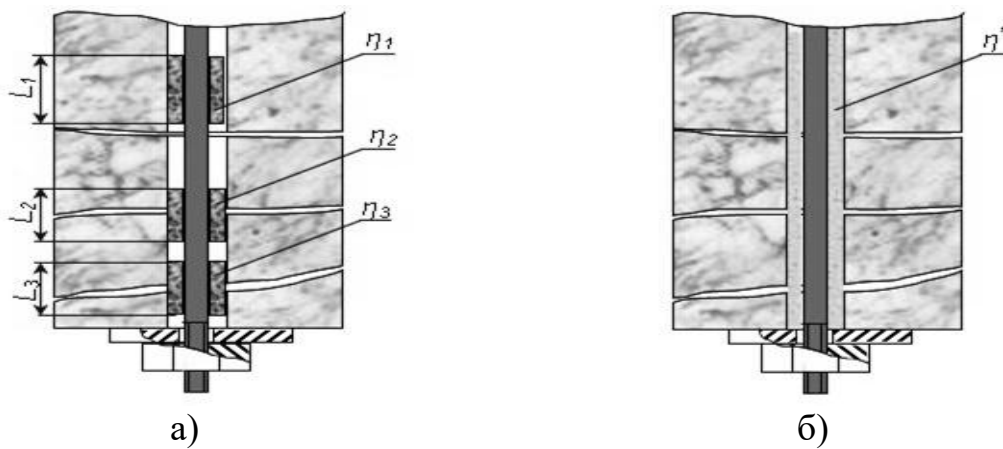


Рисунок 1 – Замена действительной системы (а) «анкер-массив» на эквивалентную модель (б)

Известно, что вязкость среды (как действительную, так и эффективную) определить сложно, поэтому введем некий параметр p , определяющий качество закрепления анкера. В качестве первоначального приближения принимаем зависимость между p и эффективной вязкостью η^* линейной, тогда:

$$p = a\eta^* + b = \frac{aC}{\tau} + b = \frac{B}{\tau} + b, \quad (3)$$

где B и b – некоторые постоянные для анкера, определяемые его геометрией.

Согласно выражению (3), величина параметра, характеризующего качество закрепления металлополимерного или железобетонного анкера в массиве, нелинейно уменьшается при возрастании времени релаксации свободных колебаний.

Основываясь на данных положениях, авторами данной статьи разработан способ контроля качества закрепления анкера в скважине, защищенный патентом Украины на полезную модель [7]. Способ реализуется следующей последовательностью операций: нанесением удара по торцу анкера, возбуждающем в нем свободные колебания; предварительным анализом их спектрального состава; выделением полосы с максимальной плотностью спектра; выполнением амплитудной селекции сигнала; определением информативного параметра по окончанию переходного процесса, вызванного ударом, в качестве которого принимают время релаксации колебательного процесса.

Для реализации указанного способа разработан макетный образец аппаратуры с рабочим названием «КВАК» [6]. В нем предусмотрена автоматическая первичная статистическая обработка серии определений времени релаксации на конкретном анкере в соответствии с алгоритмом, описанным в [8]. При этом в каждом из элементарных циклов получают несколько значений информативного параметра τ и среднего стандартного отклонения σ : $\tau_1 \pm \sigma_1$; $\tau_2 \pm \sigma_2 \dots \tau_n \pm \sigma_n$.

При допущении, что распределение значений информативного параметра τ в выборке, подвергающейся программной статистической обработке, подчиняется нормальному распределению, получим выражение для плотности вероятности того, что параметр τ последовательно примет значения $\tau_1, \tau_2, \dots \tau_n$:

$$W(\tau) = \prod_{i=1}^n \frac{0,4}{\sigma_i} e^{-\frac{0,5(\tau_i - \tau)^2}{\sigma_i^2}}. \quad (4)$$

Выражение (4) – функция правдоподобия [9]. Ее максимальное значение соответствует наибольшей вероятности того, что в выборке реализованы конкретные значения параметра $\tau_1, \tau_2 \dots \tau_n$, по которым определяется наиболее правдоподобная величина $\tau_{пр}$. Максимум определяется из условия $\frac{\partial W}{\partial \tau} = 0$.

Для практического применения более приемлема логарифмическая функция правдоподобия:

$$L(\tau) = \ln W(\tau) = \sum_{i=1}^n \ln \frac{0,4}{\sigma_i} - \sum_{i=1}^n \frac{0,5(\tau_i - \tau)^2}{\sigma_i^2}. \quad (5)$$

Поскольку логарифмическая зависимость монотонна, ее максимум будет в той же точке, что и исходной функции правдоподобия $W(\tau)$. Из (5) вытекает еще одно условие определения максимально правдоподобного значения τ : $\frac{\partial L}{\partial \tau} = 0$, из которого, с учетом (5), следует:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\tau_i - \tau}{\sigma_i^2} = 0. \quad (6)$$

После преобразований получим выражение для определения максимально правдоподобного значения $\tau_{пр}$:

$$\tau_{np.} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\tau_i}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2}}. \quad (7)$$

На практиці в тарифовочному експерименті передвартельно задають или определяют путем измерения конечный массив значений p^* . Для каждого i -го элемента массива определяют также соответствующее значение параметра $\tau_{np.}$, обозначаемое в дальнейшем просто τ_i . Помимо этого, предполагается существование массива данных значений параметра p , полученного расчетным путем с использованием выражения (3). Дальнейшая задача состоит в аналитическом определении параметров B и b , чтобы выражение (3) было наилучшим приближением к экспериментально полученной зависимости $p^* = f(\tau)$. Для нахождения оптимальной аппроксимирующей зависимости заранее заданного вида используется метод наименьших квадратов [10]. Метод заключается в минимизации следующей функции:

$$F(B, b) = \sum_{i=1}^n (p_i^* - p(\tau_i))^2. \quad (8)$$

С учетом (3) выражение (8) можно переписать в виде:

$$F(B, b) = \sum_{i=1}^n \left(p_i^* - \frac{B}{\tau_i} - b \right)^2. \quad (9)$$

Необходимым условием минимума последнего выражения является:

$$\begin{cases} \frac{\partial F(B, b)}{\partial B} = 0 \\ \frac{\partial F(B, b)}{\partial b} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

С учетом конкретного вида функции $F(B, b)$ условие (10) будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} -2 \sum_{i=1}^n \left(p_i^* - \frac{B}{\tau_i} - b \right) \cdot \frac{1}{\tau_i} = 0 \\ 2 \sum_{i=1}^n \left(p_i^* - \frac{B}{\tau_i} - b \right) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

Удалив в обоих выражениях вынесенные за знак суммы множители, раскрыв скобки, после преобразований получим систему уравнений относительно B и b :

$$\begin{cases} B \sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau_i^2} + b \sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau_i} = \sum_{i=1}^n \frac{p_i^*}{\tau_i} \\ B \sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau_i} + bn = \sum_{i=1}^n p_i^* \end{cases} \quad (12)$$

Для ее решения воспользуемся правилом Крамера:

$$B = \frac{\Delta_B}{\Delta}; \quad b = \frac{\Delta_b}{\Delta}. \quad (13)$$

После того, как определим необходимые детерминанты, значения B и b , оптимизирующие функцию аппроксимации экспериментальной зависимости в ожидаемой форме, могут быть найдены следующим образом:

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n p_i^* \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau_i} - n \sum_{i=1}^n \frac{p_i^*}{\tau_i}}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau_i}\right)^2 - n \sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau_i^2}}; \quad b = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau_i^2} \cdot \sum_{i=1}^n p_i^* - \sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau_i} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{p_i^*}{\tau_i}}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau_i}\right)^2 - n \sum_{i=1}^n \frac{1}{\tau_i^2}}. \quad (14)$$

В качестве параметра p^* может служить, например, усилие выдергивания анкера. Для корректной статистической обработки объема выборок должны составлять не менее 30 однотипных элементов. При этом явно аномальные результаты должны быть отброшены.

ВЫВОДЫ. Установлено, что для оперативной массовой оценки качества закрепления анкеров в массиве необходимо использование неразрушающих методов контроля. Теоретически обоснован и запатентован вариант метода ударно-волнового контроля, при котором в качестве информативного параметра используется время релаксации свободных колебаний анкера, возбужденных одиночным ударом. Его преимущество в независимости значений информативного параметра от силы удара. Для обработки первичных данных разработан алгоритм, использующий метод максимального правдоподобия. Теоретически установлено, что параметр, характеризующий качество закрепления анкера в шпуре, нелинейно уменьшается с возрастанием времени релаксации колебаний. Описана процедура получения тарировочной функции, связывающей указанные выше параметры и предполагающая повышение ее достоверности. Результатом выполненных исследований стала разработка макетного образца ударно-волновой аппаратуры (рабочее название – КВАК) для оперативного неразрушающего контроля качества закрепления анкеров в массиве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Круковский А.П., Хворостян В.А., Круковская В.В. Технология опорно-анкерного крепления горных выработок. *Уголь Украины*. 2013. № 2. С. 13–16.
2. Терещук Р.М. Кріплення похилих виробок анкерними системами. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва: наук.-виробн. ж-л*. 2017. Вип. 2(20). С. 50–60.
3. Халимендик Ю.М., Бруй А.В., Чемакина М.В. Мониторинг состояния выработок с анкерным креплением. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. Москва, 2013. № 11. С. 19–23.
4. Вознесенский Е.А. Неразрушающий контроль анкерного крепления кровли горных выработок и объектов подземного городского строительства. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. Москва, 2010. № 12. С. 135–137.

5. Бурау Н.И., Клефа Ю.В., Куклин Э.В. Разработка метода диагностики технического состояния противооползневых анкерных сооружений. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2011. № 2. С. 40–45.

6. Скипочка С.И., Сергиенко В.Н., Красовский И.С. Обоснование параметров контроля качества закрепления анкеров в породном массиве виброакустическим методом. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2017. № 1. С. 106–110.

7. Спосіб контролю якості закріплення анкерного стрижня в свердловині: пат. № 122418 Україна: МПК E21D 20/00. № u201706326; заявл. 21.06.2017; опубл. 10.01.2018, Бюл. № 1. 4 с.

8. Сергиенко В.Н., Красовский И.С. Об автоматизированной адаптивной статистической обработке результатов измерений. *Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. пр.* Дніпро, 2015. Вип. 124. С. 148–157.

9. Батраков П.А., Черепанов О.С. Исследование оценок параметра масштаба взвешенного метода максимального правдоподобия. *Омский научный вестник*. 2014. № 2 (130). С.18–22.

10. Канишев М.Н. Математическая статистика. М.: Высшая школа. 2014. 336 с.

TO THE SUBSTANTIATION OF THE IMPACT-WAVE METHOD FOR ROOF BOLTING CONTROL

S. Skipochka, V. Sergienko, I. Krasovskiy

M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine

vul. Simferopolska, 2-A, Dnipro, 49005, Ukraine. E-mail: skipochka@ukr.net.

Purpose. To develop a version of operational impact-wave monitoring method for anchor bolts, which informative parameter does not depend on force of impact and has high reliability of measurement results. **Methodology.** Mathematical modeling. Theoretical analysis of fully fixed in rock mass anchor free oscillations damping was performed. **Results.** Analysis of current state of anchors fastening control showed the need for nondestructive testing. The most promising is impact-wave method. Known disadvantages of this method: measurement results depend on force of impact, equipment and methodology complexity, which in turn prevents real-time evaluation. Mathematical model of the «anchor – medium – rock mass» was built. Analysis of anchor free oscillations in said system was performed. Feasibility of choosing the free oscillations relaxation time as informative parameter was shown. Advantages of this parameter: does not depend on force of impact, simpler to determine, results can be presented in digital form. An algorithm for primary data numerical array processing using maximum likelihood estimation method was described. An issue with calibration reliability was noted. To solve this, method of ordinary least squares was used. **Originality.** A new method of estimating anchor fastening quality in rock mass was proposed. This method is based on: anchor oscillation registration after impact, preliminary frequency, amplitude and temporal selection of oscillations. **Practical value.** Research results made possible to develop equipment for operational nondestructive metal-polymer anchor fastening quality control. **Conclusions.** Variation of impact-wave control method for anchors in mines, tunnels and other underground objects was substantiated and pa-

tented. Relaxation time of anchor free oscillations, induced by a single hit, is used as informative parameter. As a result of performed research the prototype equipment of impact-wave operational nondestructive control method for anchors in rock mass (working title – KVAK [CVAC]) was developed.

Key words: rock mass, anchor, anchorage, quality, control, equipment, algorithm.

REFERENCES

1. Krukovskiy, O.P., Hovorostyan, V.A., Krukovskaya, V.V. (2013), «Technology of support-anchor fastening of mine workings», *Ugol Ukrainy*, no. 2, pp. 13–16.
2. Tereschuk, R.M. (2017), «The fastening of inclined workings using anchoring systems», *Modern resource-saving technologies of mining production: Research and production journal*, vol. 2, no. 20, pp. 50–60.
3. Halimendik, Y.M., Bruy, A.V., Chemakina, M.V. (2013), «Status monitoring of mines with roof bolting», *HIAB*, no. 11, pp. 19–23.
4. Voznesenskiy, E.A. (2010), «Non-destructive control of mines roof bolting and objects of underground urban construction», *HIAB*, no. 12, pp. 135–137.
5. Burau, N.I., Klefa, Yu.V., Kuklin, E.V. (2011), «Development of method of diagnostics of functional technical condition of structural elements of antislid anchoring constructions», *Tekhnicheskaya Diagnostika i Nerazrushayushchiy Kontrol*, no. 2, pp. 40–45.
6. Skipochka, S.I., Sergienko, V.N., Krasovskiy, I.S. (2017), «Rationale of mounting quality control parameters for anchors in rocks by vibroacoustic method», *Metalurgical and Mining Industry*, no. 1, pp. 106–110.
7. Skipochka, S.I., Sergienko, V.N., Krasovskiy, I.S., M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (2018), *Sposib kontrolyu yakosti zakriplennya ankernogo stryzhnia v sverdlovyni* [Anchor fastening quality control method], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat. № 122418.
8. Sergienko, V.N., Krasovskiy, I.S. (2015), «About the automated adaptive statistical processing of the measuring results», *Geo-Technical Mechanics*, no. 124, pp. 148–157.
9. Batrakov, P.A., Cherepanov, O.S. (2014) «Investigation of estimates of scale parameter of weighed maximum likelihood method», *Omskiy nauchnyy vestnik*, no. 2(130), pp. 18–22.
10. Kanishev, M.N. (2014), *Matematicheskaya statistika* [mathematical statistics], Vysshaya shkola, Moscow, RF.

Стаття надійшла 21.05.2018.