

УДК 622. 83:622.3.016

ИНТРОСКОПИЯ СТРУКТУРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ МАССИВА

Литвинский Г. Г., Касьянов В. А.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)

Розглянуто задачу визначення міри неоднорідності гірського масиву методом свердловинної інтроскопії. Отримано основне рівняння залежності показників інтроскопа від відстані до контакту різних середовищ або тріщини. Дана оцінка нормованого показника неоднорідності масиву за даними свердловинної інтроскопії.

We consider the problem of determining the degree of rock massif heterogeneity by borehole introscope. The basic equations of depending the data introscope is got from distance to the various media contact or cracks. The estimation of the normalized index of heterogeneity is given from the data of the borehole introscope.

Как правило, строение горного массива, которое формировалось длительный исторический период под переменным воздействием высокого давления, температуры и других факторов орогенезиса, отличается большой сложностью ввиду наличия в нём неоднородностей различного происхождения, формы и свойств. Это чрезвычайно затрудняет оперативное и достоверное решение сложных задач информационного обеспечения эффективного и безопасного ведения горных работ, строительства и эксплуатации подземных сооружений. Поэтому так важно для горной науки и практики изучение природы, строения и пространственно-временной изменчивости структурных неоднородностей в массиве пород при ведении горных работ.

К числу перспективных методов изучения неоднородностей массива следует отнести быстро развивающийся метод интроскопии (лат. intro – внутри, др.-греч. σκοπέω – смотрю; дословно «внутри-видение») – неразрушающее исследование внутренней структуры, как правило, оптически непрозрачных сред и протекающих в них процессов с помощью различных физических полей (ультразвуковых и сейсмических волн, электромагнитного излучения, постоянного и переменного электромагнитного поля и потоков элементарных частиц и др.). Объектом исследования интроскопии являются горный массив, слагающие его горные породы и находящиеся в них неоднородности искусственного и естественного происхождения.

Интроскопия горных массивов в отечественной науке развивалась с середины XX века в ряде исследовательских и учебных институтов (МГИ, ВНИМИ, КузПИ, ИГТМ, КазПИ, ДПИ, КГМИ и др.), особенно большой вклад в её развитие был сделан в МГИ [1-3 и др.]. Однако, несмотря на достигнутые успехи в становлении скважинной интроскопии горных пород, до настоящего времени не получили должное теоретическое обоснование методы изучения неоднородностей массива, обусловленные трещинами, слоевыми контактами и местными разрушениями массива вокруг выработок при использовании пассивных способов фиксации изменения пространственных полей в массиве [4 и др.].

Цель настоящего исследования – разработка теоретического обоснования скважинной интроскопии массива горных пород и реализация предлагаемого метода на практике.

Основная идея исследования состоит в том, чтобы построить математическую модель изменения показаний датчика интроскопа при его перемещении вдоль скважины в присутствии элементарной неоднородности типа контакта разнородных сред и распространить её на более сложные случаи неоднородностей (трещиноватость, слоистость, наличие включений, пустот и пр.).

Задача данной работы – установить основные теоретические положения обнаружения неоднородностей типа трещин скважинным интроскопом, измеряющего вдоль скважины физические поля в горной породе (диэлектрическую или магнитную проницаемость, электросопротивление, теплоёмкость, скорость распро-

странения различных волн, коэффициенты отражения пород и т.д.).

Интроскоп (рис. 1) состоит из зонда 1, который перемещают в массиве по скважине (шпуру) 2, и регистрирующего прибора 3, связанного с датчиком кабелем 4 с помощью штанги 5. По мере перемещения по шпуру 2 датчик пересекает неоднородности 6. Необходимо построить функцию «отклика» датчика по мере его перемещения в зоне влияния неоднородности 6, т.е. как будут изменяться показания датчика при изменении расстояния до неоднородности.

Для этого рассмотрим простую модель взаимодействия датчика с трещиной, которую расположим перпендикулярно скважине. Задача заключается в нахождении аналитических зависи-

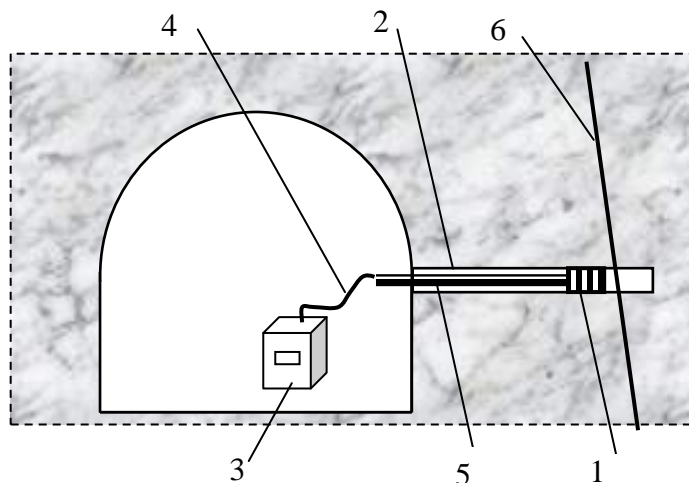


Рис. 1. Скважинный интроскоп горных пород [4]

мостей, связывающих показания прибора с параметрами измеряемой неоднородности.

Пусть датчик 1 интроскопа расположен в среде S_1 на расстоянии по нормали x_{12} от контакта 2 со средой S_2 (рис. 2). Начало координат разместим в центре датчика интроскопа, а длину электроёмкостного преобразователя обозначим $2L$. Если датчик

окажется в среде S_1 , его показания будут равны A_1 и, соответственно, в среде S_2 показания изменятся до уровня A_2 . Если постепенно передвигать датчик вдоль скважины из первой среды в другую, то его показания должны изменяться по плавной кривой, причём при размещении на контакте 2 показания датчика будут равны полусумме его показаний в этих средах, т.е. $(A_1 + A_2)/2$.

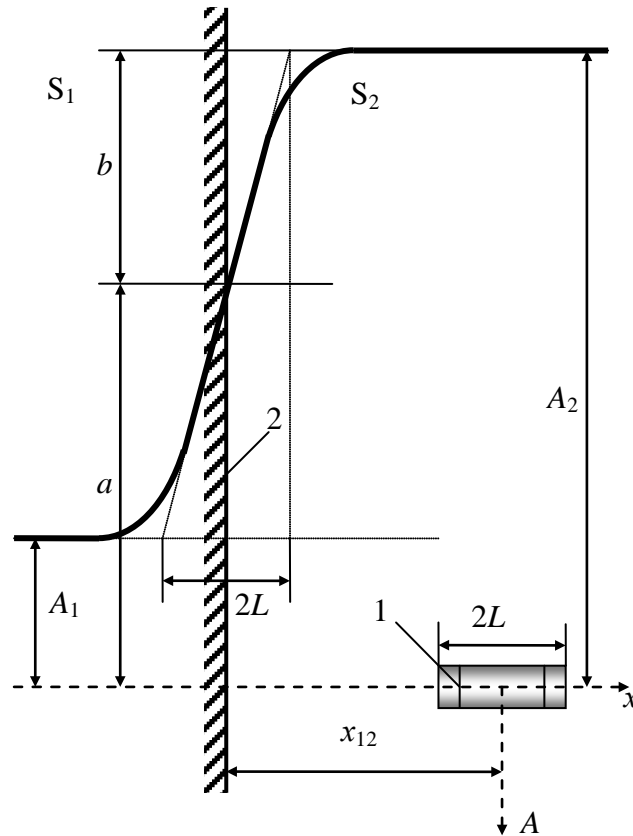


Рис. 2. Расчетная схема для определения показаний интроскопа на контакте двух сред

Введём координаты $x - A$ для построения графика зависимости показаний интроскопа A от расстояния x между центром датчика и плоскостью контакта сред. Исходя из физических соображений о виде и основных свойствах такого графика, можно априори судить об изменении показаний датчика в скважине.

Кривая показаний должна иметь две горизонтальные асимптоты, расстояние между которыми по нормали равно разности показаний прибора в каждой из сред ($A_1 - A_2$), а её угол наклона к оси x должен быть максимальным на плоскости контакта.

Наиболее простым аналитическим выражением для такой кривой является гиперболический тангенс. Таким образом, показания интроскопа A_{12} , когда его датчик размещён в среде S_1 вблизи контакта со средой S_2 , можно представить зависимостью:

$$A_{12} = a_{12} + b_{12} \cdot th(\alpha_{12} \cdot x_{12}); \quad (1)$$

где a_{12} – размерная постоянная (1/м), численно равная показанию интроскопа, когда центр его датчика совмещён с контактом сред A_1 и A_2 :

$$a_{12} = (A_1 + A_2) / 2; \quad (2)$$

b_{12} – максимальная полуразность показаний интроскопа в двух средах:

$$b_{12} = (A_1 - A_2) / 2; \quad (3)$$

A_1, A_2 – показания интроскопа соответственно в средах S_1 и S_2 , на бесконечном удалении от их контакта;

Постоянную α_{12} назовём модулем чувствительности интроскопа и её можно определить по формуле:

$$\alpha_{12} = \frac{1}{b_{12}} \cdot \left. \frac{\partial A_{12}}{\partial x_{12}} \right|_{x_{12}=0}. \quad (4)$$

В правомерности предложенных зависимостей можно убедиться, проверив выполнение граничных условий, вытекающих из физической сути задачи

$$A_{12} = \begin{cases} A_1; & x_{12} \rightarrow -\infty; \\ \frac{A_1 + A_2}{2}; & x_{12} \rightarrow 0; \\ A_2; & x_{12} \rightarrow +\infty. \end{cases} \quad (5)$$

Правильность закономерности (1) подтверждается сопоставлением теоретической кривой, рассчитанной по формуле $A(x) = 2447 + 4,5 \cdot th(60 \cdot x)$, и экспериментальных показаний интроскопа в кварцевом песке (рис. 3).

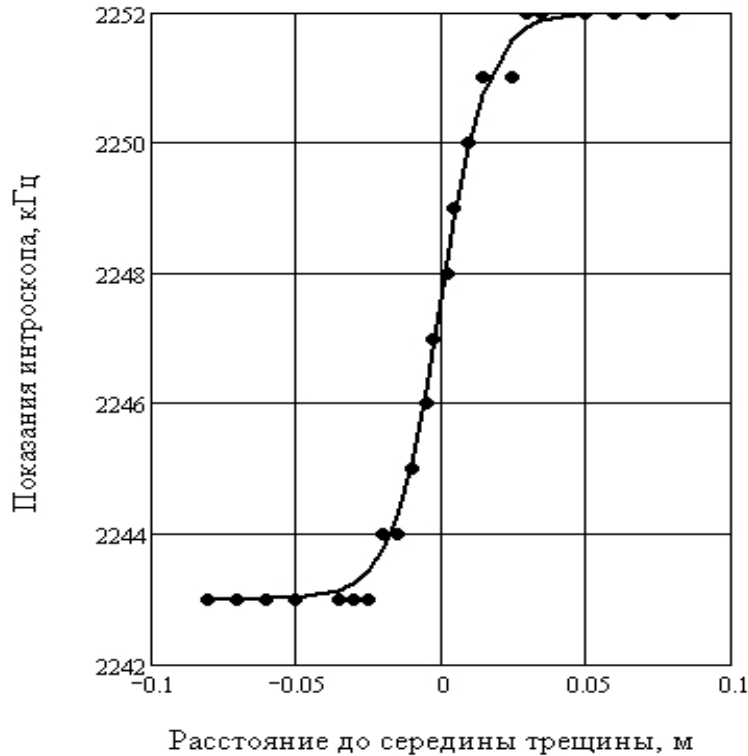


Рис. 3. Изменение показаний при переходе датчика из сухого песка в воздух

Рассмотрим подробнее смысл показателя α_{12} , который существенным образом влияет на результаты измерений. Согласно (4), после подстановки значения производной, получим:

$$\alpha_{12} = \frac{1}{b_{12}} \cdot \frac{\partial A_{12}}{\partial X_{12}} = \frac{1}{b_{12}} \cdot \frac{\Delta A}{\Delta X} = \frac{2}{A_2 - A_1} \cdot \frac{A_2 - A_1}{2 \cdot L_9} = \frac{1}{L_9}, \quad (6)$$

где L_9 – половина длины эффективной зоны чувствительности датчика интроскопа, м.

Из рис. 1 и 3 следует геометрический смысл эффективной полудлины L_9 – это горизонтальная проекция касательной, проведённой к кривой показаний интроскопа в точке перегиба. Следует заметить, что длина датчика интроскопа $2L_{и}$ в общем случае не обязательно совпадает с его эффективной длиной $2L_9$. Физический смысл этого параметра в том, что он характеризует протяжённость зоны чувствительности датчика по его длине. Следовательно, параметр L_9 полностью предопределяется конструктив-

ными размерами датчика интроскопа и является постоянной величиной для данного прибора. Это даёт возможность определять величину модуля ещё на стадии проектирования прибора. Данное теоретическое положение подтверждается прямыми экспериментальными замерах (рис. 3).

Из предложенных зависимостей (1-3) следуют очевидные, но, тем не менее, важные соотношения симметрии и антисимметрии введённых параметров:

$$a_{12} = a_{21}, \quad b_{12} = -b_{21}, \quad \alpha_{12} = -\alpha_{21}.$$

Отсюда непосредственно вытекает формула для вычисления показаний интроскопа A_{21} , когда его датчик размещён в среде S_2 вблизи контакта со средой S_1 :

$$A_{21} = a_{12} - b_{12} \cdot th(\alpha_{12} \cdot x_{12}). \quad (7)$$

При выводе формул (1-3) принято, что показания интроскопа линейно зависят от физических свойств среды (диэлектрической проницаемости, магнитной восприимчивости и др.), т.е. постулируется принцип суперпозиции. Поэтому при разработке конструкции ЭП и датчика интроскопа необходимо стремиться к выполнению этого условия. Если же конструкция прибора не даёт такой линейной связи, то следует перейти (путём пересчёта или соответствующей тарировки) от относительных показаний регистрирующего прибора к реальным физическим параметрам среды.

Рассмотрим общий случай, когда датчик расположен вблизи двух параллельных контактов трёх различных сред (рис. 4). Для определённости, на рис. 4 показаны электроёмкостный преобразователь 1 и трещина, расположенная между двумя контактами: 2 – контакт сред S_1 и S_2 ; и 3 – контакт сред S_2 и S_3 .

Исходя из принципа суперпозиции, показания прибора будут определяться формулой:

$$A_{12(3)} = A_{12}(x_{12}) + A_{23}(x_{23}) - A_2 \quad (8)$$

где $A_{12(3)}$ - показания прибора при размещении датчика в одной из трёх сред S_i (в скобки взят индекс $i=1,2,3$ той среды, в которой находится датчик). Подставляя (1) в (8), получим

$$A_{12(3)} = a_{13} + b_{12} \cdot th(\alpha_{12} \cdot x_{12}) + b_{23} \cdot th(\alpha_{23} \cdot x_{23}). \quad (9)$$

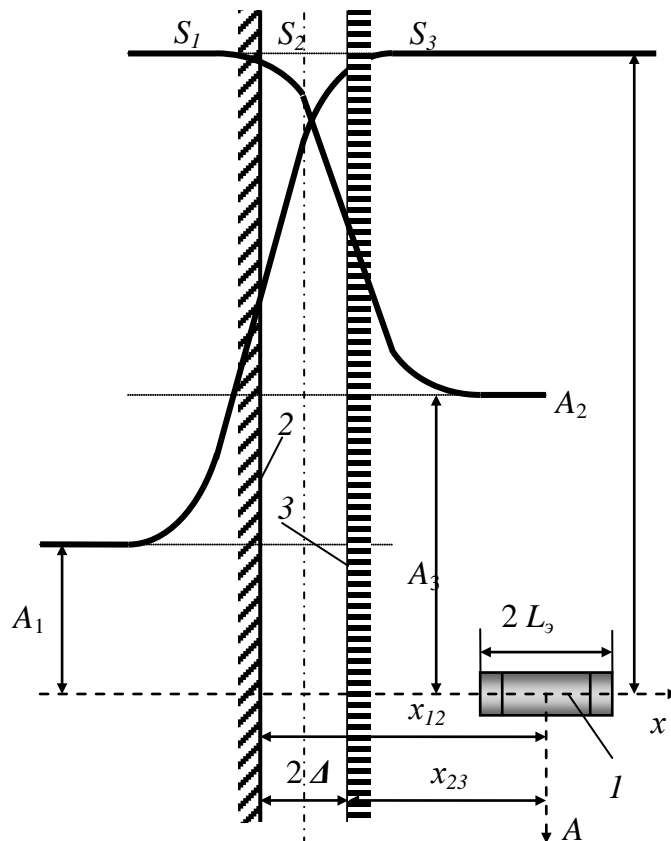


Рис. 4. Расчётная схема для определения показаний интроскопа в трещиноватом массиве

Проверка выполнения граничных условий подтверждает правильность полученных соотношений:

$$\begin{aligned} A_{(1)23} &= A_1 & \text{при } x_{12} \rightarrow -\infty; x_{23} \rightarrow -\infty; \\ A_{1(2)3} &= A_2 & \text{при } x_{12} \rightarrow +\infty; x_{23} \rightarrow -\infty; \\ A_{12(3)} &= A_3 & \text{при } x_{12} \rightarrow +\infty; x_{23} \rightarrow +\infty. \end{aligned}$$

Наибольший интерес, с практической точки зрения, представляет расположение трещины заданной ширины 2Δ в однородной среде, что сводится к подстановке в (9) равенства $A_3 = A_1$.

$$A_{123} = A_1 + b_{12} \cdot [th(\alpha_{12} \cdot X_{12}) - th(\alpha_{12} \cdot X_{23})]. \quad (10)$$

Если датчик интроскопа установить по центру трещины шириной 2Δ , получим формулу

$$A_m = A_1 + (A_2 - A_1) \cdot th(\alpha_{12} \cdot \Delta). \quad (11)$$

Для трещины разной ширины граничные условия будут

$$A_m = \begin{cases} A_1 & \Delta = 0 \\ A_2 & \text{при } \Delta = \infty \end{cases},$$

где A_m – показания прибора в центре трещины.

Из формулы (11) можно получить зависимость для определения полуширины раскрытия трещины при прямых замерах в шпурах:

$$\Delta = L_9 \cdot Arth\left(\frac{\Delta A_m}{\Delta A_2}\right),$$

или, используя формулу

$$Arth(x) = \frac{1}{2} \cdot \ln\left(\frac{1+x}{1-x}\right),$$

получим после несложных преобразований

$$\Delta = L_9 \cdot \ln \sqrt{\frac{\Delta A_2 + \Delta A_m}{\Delta A_2 - \Delta A_m}}, \quad (12)$$

где $\Delta A_2 = A_2 - A_1$; $\Delta A_m = A_m - A_1$, а A_1, A_2 – показания прибора в массиве горных пород S_1 и в заполнителе трещины S_2 соответственно.

Таким образом, получили зависимость показаний интроскопа с эффективной полушириной L_9 датчика, помещённого в центре трещины, при изменении её раскрытия Δ , когда предельные

показания интроскопа равны $A_m = 1$ (трещина $\Delta \gg L_3$) и $A_m = 0$ (массив горных пород, $\Delta = 0$).

Анализ показывает, что вплоть до значений $\Delta/L_3 < 0,5$ наблюдается почти линейная зависимость показаний прибора A от ширины раскрытия трещины. Это существенно упрощает расшифровку показаний прибора, особенно когда при вычислениях использовать относительные (нормированные) значения показаний прибора

$$P(x) = \frac{A(x) - A_1}{A_2 - A_1}; \quad 0 \leq P(x) \leq 1, \quad (13)$$

где $A(x)$ – текущее показание прибора.

Для линейных величин (координаты, размеры) целесообразно ввести нормированные их значения в единицах эффективной полуширины L_3 :

$$\tilde{x} = x / L_3 \quad (14)$$

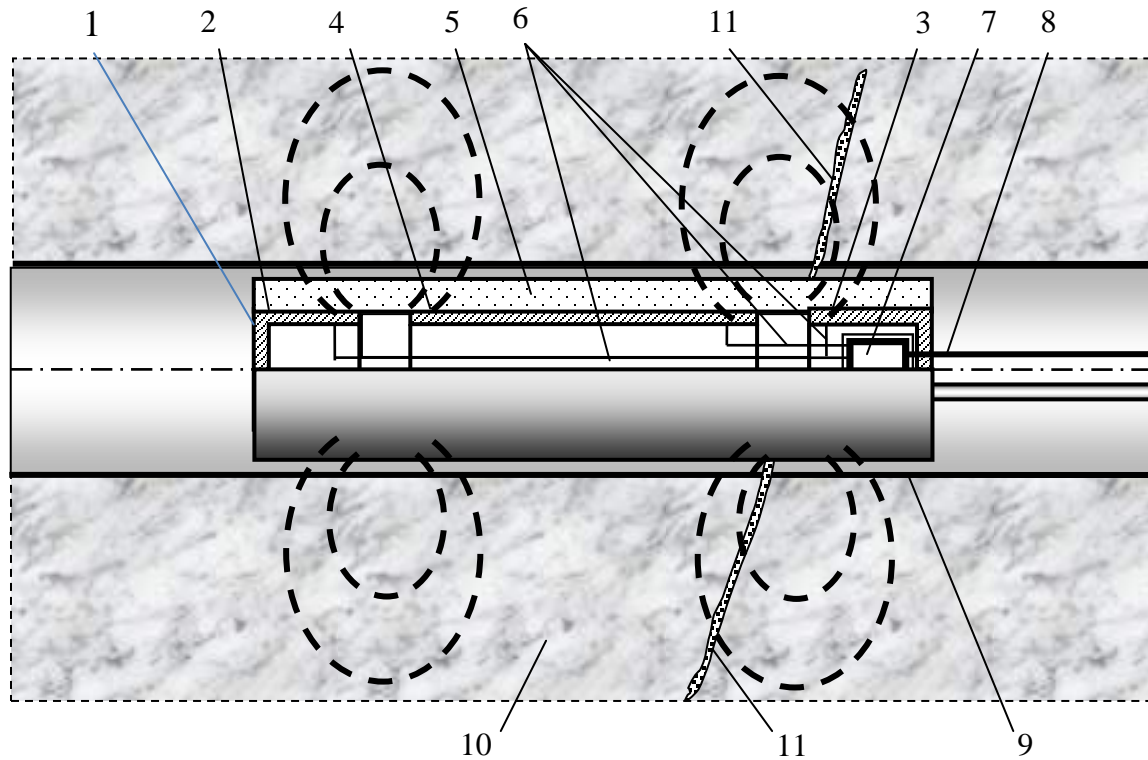
Производя разложение зависимости (12) по малому параметру и сохранив линейные члены, получим линейную зависимость между искомыми величинами и формулу для определения ширины Δ трещины

$$\Delta = L_3 \frac{A_m - A_1}{A_2 - A_1} = L_3 P_m, \quad (15)$$

где P_m – относительное показание прибора при установке датчика в центре трещины.

Для реализации предложенной идеи была разработана конструкция интроскопа, изображенная на рис. 5. Электроёмкостный интроскоп [5] включает зонд 1, который является электрическим конденсатором и состоит из двух крайних металлических электродов в виде передней заглушки 2 и задней заглушки 3 и активного центрального электрода 4, изготовленного из электропроводящего материала, размещенных в диэлектрическом корпусе 5. Электроды датчика подсоединены проводами 6 к генератору 7, выход которого соединен кабелем 8 с блоком измерения. Сигнал

от генератора по кабелю, проходящему по шпuru 9, подается на блок измерения, расположенный в горной выработке. Частота сигнала генератора зависит от электрической ёмкости зонда,



1 – зонд; 2 – передняя заглушка; 3 – задняя заглушка; 4 – активный электрод; 5 – диэлектрический корпус; 6 – соединительные провода; 7 – генератор; 8 – кабель; 9 – шпур; 10 – массив горных пород; 11 – трещины.

Рис. 5. Конструкция зонда электроёмкостного интроскопа

окруженного породами. А так как эта ёмкость меняется в зависимости от величины диэлектрической проницаемости окружающих пород 10, то удастся неоднородности породного массива в виде трещин 11 выявить по изменению показаний блока измерения интроскопа.

Показания интроскопа изменяются по-разному в воде или воздухе (уменьшаются или увеличиваются относительно ненарушенного массива), поэтому предлагаемым методом и прибором можно так же определить, чем заполнена трещина – воздухом или водой (раствором), а по амплитуде изменения показаний

можно рассчитать ширину раскрытия трещины. Это повышает информативность и достоверность измерений.

Выполненные исследования позволяют заключить:

– показания интроскопа зависят от расстояния между датчиком и границей контакта сред и описываются гиперболическим тангенсом в виде уравнения (1);

– эффективная полудлина датчика интроскопа является пространственной характеристикой его чувствительности и избирательности, которую следует определять экспериментальным путём при тарировке датчика интроскопа;

– для оценки неоднородности массива следует использовать нормированный показатель неоднородности, который учитывает её геометрический размер (ширину трещины) и свойства материала заполнителя согласно уравнению (13);

– эффективная полудлина датчика интроскопа является пространственной характеристикой его чувствительности и избирательности, которую следует определять экспериментально путём тарировки датчика интроскопа;

– доказана линейная зависимость (15) раскрытия трещины от эффективной полудлины датчика и показателя неоднородности, вычисленного при датчике, установленном в центре трещины;

– разработана и успешно испытана конструкция прибора, позволяющая реализовать предлагаемую идею. Электроёмкостный интроскоп может стать надёжным средством для измерения нарушенности массива горных пород и войти в перечень необходимых приборов для каждого горного предприятия при ведении горных работ.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Глушко В.Т., Ямщиков В.С., Яланский А.А. Геофизический контроль в шахтах и тоннелях. – М.: Недра, 1987. – 287 с.
2. Ямщиков В. С. Контроль процессов горного производства. М.: Недра, 1989, 446 с.
3. Турчанинов И.А., Козырев А.А., Каспарян Э.В. Руководство по определению нарушенности пород вокруг выработок рео-

- метрическим методом: – Апатиты: К.Ф. АН СССР, 1971. – 43 с.
4. А.с. № 1376754 СССР, М.кл.⁴ Е 21 С 39/00. Скважинный интроскоп горных пород / Касьянов В.А., Литвинский Г.Г. (СССР). – № 4024977; заявлено 11.02.86, опубл. 22.10.1987, Бюл. № 10.
 5. Пат. 31998 Україна, МПК (2006) G01V 3/02. Електроємнісний інтроскоп для масиву гірських порід ЕІ-3 / Касьянов В.О., Литвинський Г.Г.; заявник і патентовласник Донбас. держ. техн. ун-т. – № U200800168, заявл. 03.01.08; опубл. 25.04.2008, Бюл. № 8.