

*д.т.н. Литвинский Г.Г.,
к.т.н. Касьянов В.А.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

СКВАЖИННАЯ ИНТРОСКОПИЯ ГОРНОГО МАССИВА – ТЕОРИЯ И МОДЕЛИ

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.

Ключові слова: *гірський масив, інтроскопія, неоднорідність, тріщина, теорія інтроскопії, моделювання масиву, показник неоднорідності порід.*

Рассмотрена задача определения степени неоднородности горного массива методом скважинной интроскопии. Получено основное уравнение зависимости показаний интроскопа от расстояния до контакта различных сред или трещины. Дана оценка нормированного показателя неоднородности массива по данным скважинной интроскопии.

Ключевые слова: *горный массив, интроскопия, неоднородность, трещина, теория интроскопии, моделирование массива, показатель неоднородности пород.*

Современный уровень развития науки о механических процессах в горном массиве требует достоверных и представительных данных о его свойствах и структурных особенностях. Как правило, строение горного массива, которое формировалось длительный исторический период под переменным воздействием внешнего 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 и разной природы физических полей в массиве 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, основанной на фиксации «отклика» неоднородностей массива при распространении физических полей разной природы. 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 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 распространения различных волн, коэффициенты отражения пород и т.д.). Интроскоп состоит из датчика 1, который перемещают в массиве по скважине (шпуру) 2, и регистрирующего прибора 3, связанного с датчиком кабелем 4 с помощью штанги 5 (рисунок 1). По мере перемещения по шпуру 2 датчик пересекает неоднородности 6. Необходимо построить функцию «отклика» датчика в зоне влияния неоднородности 6, т.е. как будут изменяться показания датчика при изменении расстояния до трещины.

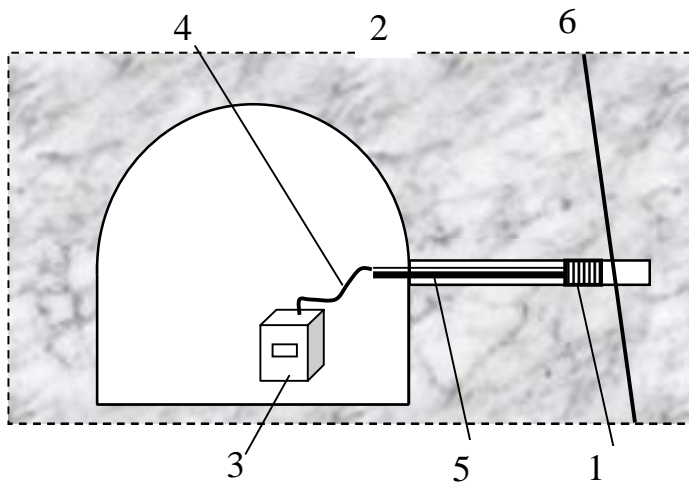


Рисунок 1 – Скважинный интроскоп горных пород [4]

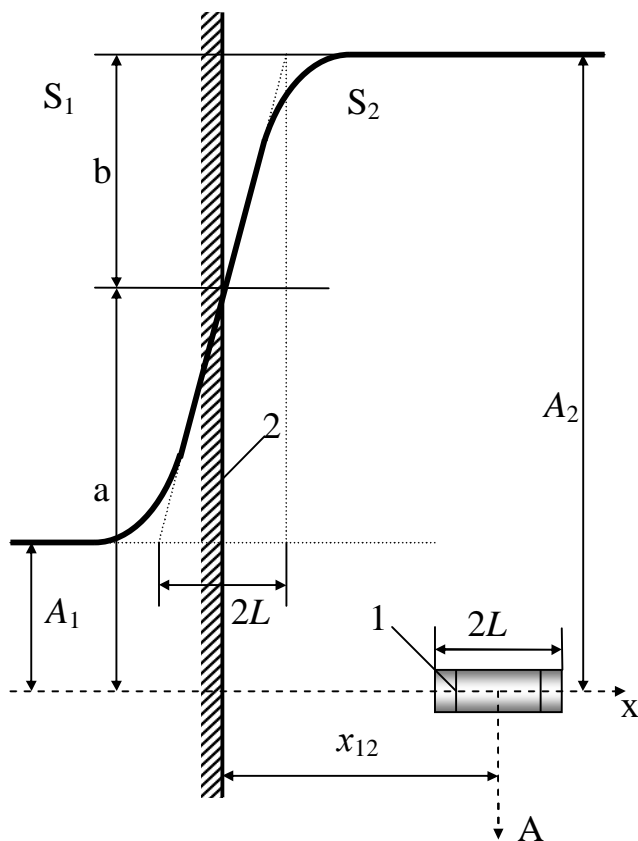


Рисунок 2 – Расчетная схема для определения показаний интроскопа на контакте двух сред

Для этого рассмотрим простую модель взаимодействия датчика с трещиной, которую расположим перпендикулярно скважине. Задача заключается в нахождении аналитических зависимостей, 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 (рисунок 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 полу-сумме показаний $(A_1 + A_2)/2$.

Введём координаты $x - A$ для построения графика зависимости показаний интроскопа A от рас-

стояния 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;

α_{12} – модуль чувствительности интроскопа:

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

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 (рисунок 3).

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

$$\alpha_{12} = \frac{1}{b_{12}} \cdot \frac{\partial A_{12}}{\partial X_{12}} = \frac{1}{b_{12}} \cdot \frac{\Delta A}{\Delta X} = \frac{2}{A_2 - A_1} \cdot \frac{A_2 - A_1}{2 \cdot L_3} = \frac{1}{L_3}, \quad (6)$$

где L_3 - половина длины эффективной зоны чувствительности датчика интроскопа, м.

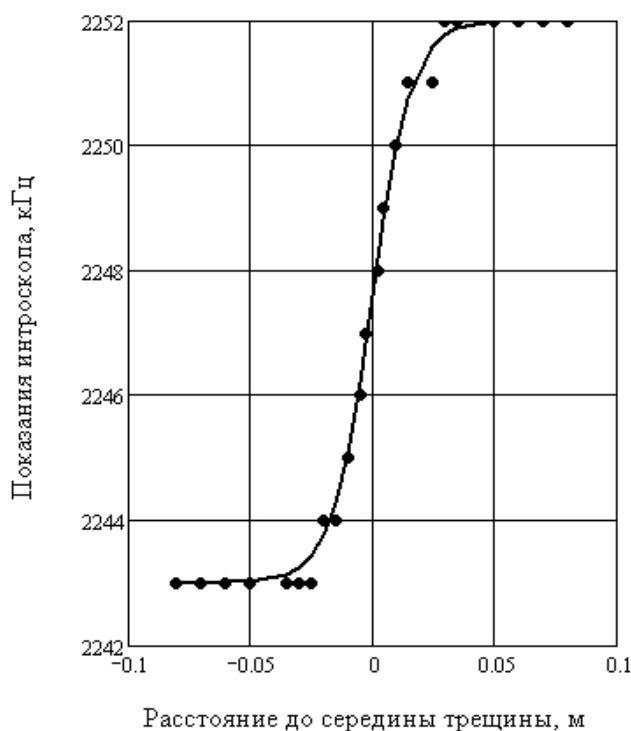


Рисунок 3 – Зависимость изменения показаний интроскопа при переходе датчика из сухого песка в

Из рисунков 1 и 3 следует геометрический смысл эффективной полудлины L_3 - 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 $2L_3$. Физический смысл этого параметра в том, что он характеризует протяжённость зоны чувствительности датчика по его длине. Следовательно, параметр L_3 полностью определяется конструктивными 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 замерами (рисунок 3).

Из предложенных зависимостей (1-3) следуют очевидные 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 более общий случай, когда датчик расположен вблизи двух параллельных контактов трёх различных сред (рисунок 4). Для определённости, на рисунок 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:

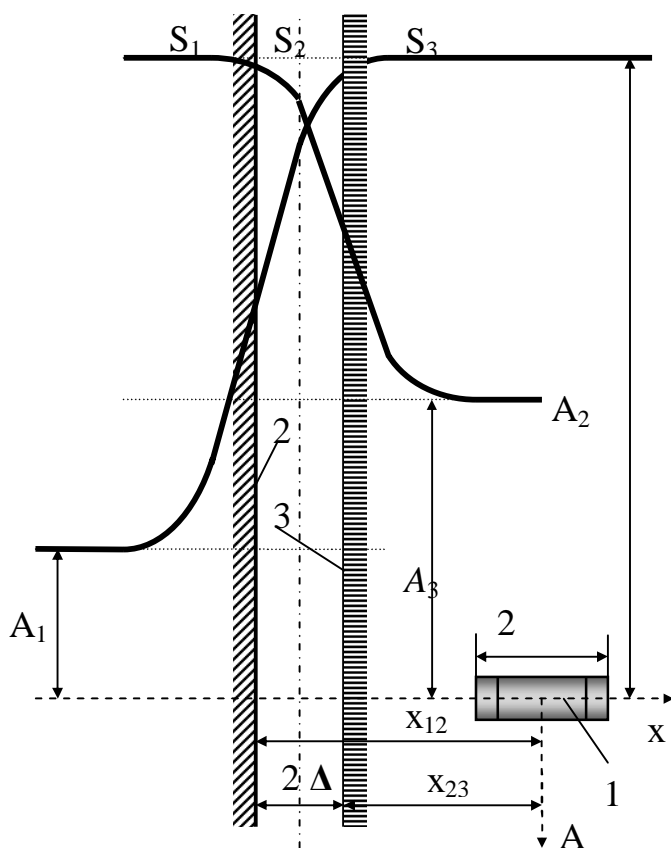


Рисунок 4 – Расчётная схема для определения показаний интроскопа в трещиноватом массиве

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

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

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

Проверка выполнения граничных условий подтверждает правильность полученных соотношений:

$$A_{(1)23} = A_1 \quad \text{при} \quad x_{12} \rightarrow -\infty; x_{23} \rightarrow -\infty;$$

$$A_{1(2)3} = A_2 \quad \text{при} \quad x_{12} \rightarrow +\infty; x_{23} \rightarrow -\infty;$$

$$A_{12(3)} = A_3 \quad \text{при} \quad x_{12} \rightarrow +\infty; x_{23} \rightarrow +\infty.$$

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

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

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

$$\Delta = L_3 \cdot \ln \sqrt{\frac{\Delta A_2 + \Delta A_m}{\Delta A_2 - \Delta A_m}}, \quad (12)$$

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_3 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 :

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

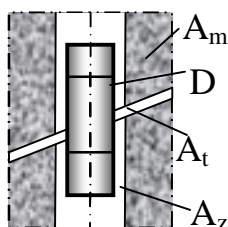
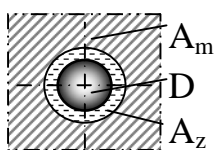


Рисунок 5 – Параметры измерений «датчик-массив»

Производя разложение зависимости (12) по малому параметру и оставив 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.

При вычислении (15) следует знать показания интроскопа для ненарушенного массива A_m , для материала, заполняющего трещины (вода A_{tw} , воздух A_{ta} , заполнитель A_{tz}) и материала в зазоре между датчиком и массивом (вода A_{zw} , воздух

A_{z_a}). При измерении датчик D интроскопа может оказаться в различных сочетаниях сред (рисунок 5):

1. «датчик - воздух» A_a ;
2. «датчик - порода» A_m ;
3. «датчик - вода» A_w ;
4. «датчик -воздушный зазор – массив» A_{am} ;
5. «датчик - воздушный зазор – вода» A_{aw} ;
6. «датчик - водяной зазор – порода» A_{wm} .

При этом накладываются условия заполнения трещин различным материалом (воздух, вода, заполнитель).

Анализируя все случаи измерения трещин, например, электроёмкостным интроскопом в массиве с учётом показаний датчика в зависимости от диэлектрической проницаемости различных сред, можно записать следующие неравенства:

$$A_a > A_{am} > A_{aw} > A_{wm} > A_w. \quad (16)$$

Следовательно, сравнивая значение текущего показания интроскопа с неравенствами (16), можно судить о наличии в шпуре воды, о характере заполнителя трещины (воздух или вода), а по формулам (12, 13) рассчитать относительную неоднородность (трещиноватость) массива горных пород. При этом следует учитывать и возможные отклонения показаний за счёт различных помех (частично заполненная водой скважина, наличие в скважине породной мелочи, неровные её стенки и переменный диаметр, эксцентрично установленный датчик в шпуре и др.).

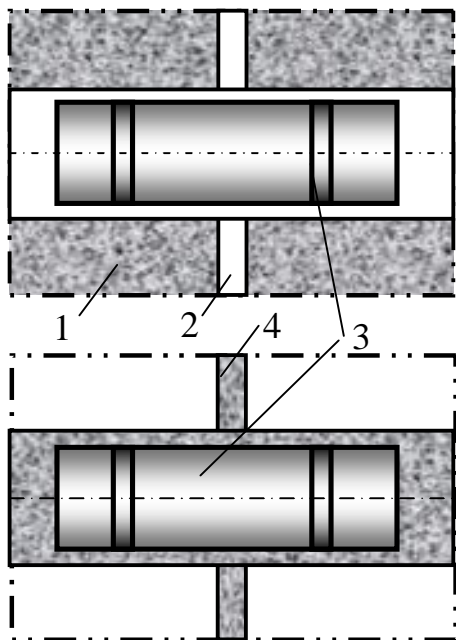


Рисунок 6 – Предлагаемая методика моделирования трещины в лабораторных исследованиях

Для учёта влияния таких факторов были проведены испытания интроскопа [4] на лабораторные стенде, который представлял собой модель массива в виде двух породных блоков 1 с высверленным отверстием, моделирующим шпур (рисунок 6).

При моделировании можно, двигая блоки 1, изменять раскрытие трещины 2. Однако такая конструкция стенда весьма громоздка и неудобна, т.к. для исключения краевых погрешностей размер блоков 2 должен превышать

эффективную длину датчика 3 не менее чем в $2,5...3,0$ раза. С целью упрощения лабораторных исследований, снижения трудоёмкости и повышения точности была предложена новая конструкция лабораторного стенда, основанная на использовании принципа антисимметричности замеров, следующего из основного уравнения (13). Нетрудно видеть, что при взаимозамене материалов среды A_1 и трещины A_2 результат замеров не изменится.

Конструкция нового стенда представлена на рисунок 6, внизу. Датчик 3 помещался в цилиндр с материалом, моделирующим породу, а трещиной 4 служила пластина из материала с таким же коэффициентом диэлектрической проницаемости. Новая методика измерений на лабораторном стенде позволила подтвердить предложенные формулы и оценить влияние всех факторов на точность 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 (ширина трещины) и свойства материала заполнителя согласно уравнению (13);

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

Библиографический список

1. Глушко В.Т. *Геофизический контроль в шахтах и тоннелях* / В.Т. Глушко, В.С. Ямщиков, А.А. Яланский. - М.: Недра, 1987. - 287 с.

2. Ямщиков В. С. *Контроль процессов горного производства* / В. С. Ямщиков. - М.: Недра, 1989. - 446 с.

3. Турчанинов И.А. *Руководство по определению нарушенности пород вокруг выработок реометрическим методом* / И.А Турчанинов, А. А. Козырев, Э. В. Каспарян. - Апатиты: К.Ф. АН СССР, 1971. - 43 с.

4. А.с. 1376754 СССР, МКЕ⁴ 21 С 39/00. *Скважинный интроскоп горных пород* / В.А. Касьянов, Г.Г. Литвинский (СССР). - № 4024977; заявлено 11.02.86, опубл. 22.10.1987, Бюл. №10 – 3 с.: ил.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Бабиюком Г.В.