

ИНТРОСКОПИЯ СТРУКТУРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ МАССИВА – ТЕОРИЯ, МЕТОДИКА И ПРИБОРЫ

*Г.Г. Литвинский, В.А Касьянов, Донбасский государственный технический университет,
Украина*

Разработана математическая модель интроскопии структурной нарушенности массива, которая оценивается нормированным показателем неоднородности. Показана возможность использования принципа суперпозиции при оценке трещиноватости. Предложена конструкция интроскопа и методика ускоренного проведения замеров вдоль скважины методом парных датчиков.

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, 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 учеными 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 распространения различных волн, коэффициенты отражения пород и т.д.). Интроскоп (рис. 1) состоит из зонда 1, который перемещают в массиве по скважине (шпuru) 2, и регистрирующего прибора 3, связанного с датчиком кабелем 4 с помощью штанги 5. По мере перемещения по шпuru 2 датчик пересекает неоднородности 6. Необходимо построить функцию «отклика» датчика по мере его перемещения в зоне влия-

ния неоднородности ϵ , т.е. выявить, как будут изменяться показания датчика при изменении расстояния до неоднородности.

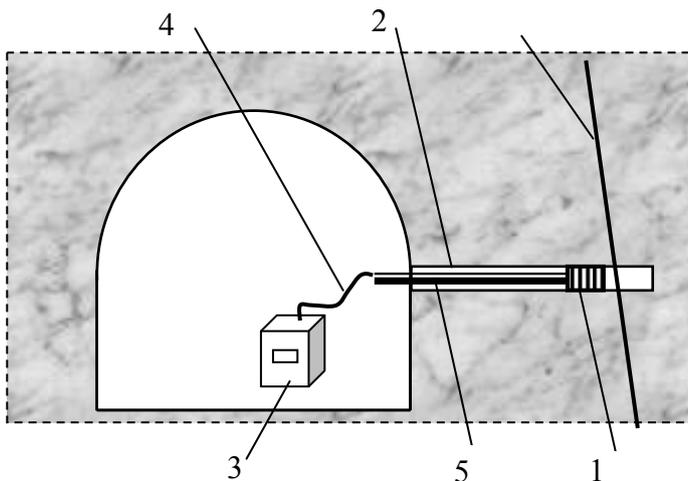


Рис. 1. Измерение трещиноватости скважинным интроскопом [4]

во вторую, 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. $(A_1 + A_2) / 2$.

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 обоснованным теоретически аналитическим выражением для такой кривой является гиперболический тангенс. Показания интроскопа A_{12} , когда его датчик размещён в среде S_1 вблизи контакта со средой S_2 можно представить зависимостью:

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

где a_{12} – размерная постоянная, 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;

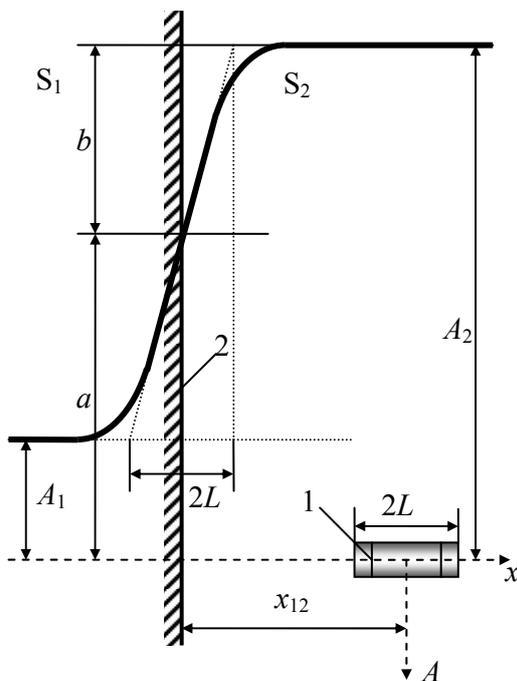


Рис. 2. Расчетная схема для определения показаний интроскопа на контакте двух сред

Постоянную α_{12} с размерностью 1 / м назовём модулем пространственной чувствительности интроскопа и её можно определить по формуле:

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

Чем меньше этот модуль, тем круче кривая показаний интроскопа, тем его отклик по форме ближе к единичной функции Дирака, тем точнее можно определить единичную структурную неоднородность, тем меньше помех вносят соседние неоднородности.

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).

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

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

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

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

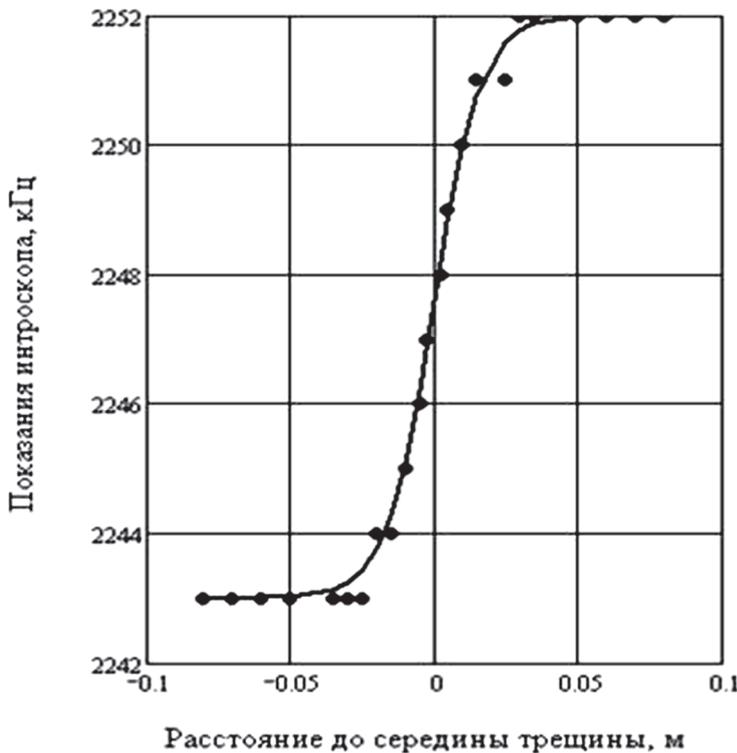


Рис. 3. Изменение показаний интроскопа при переходе датчика из сухого песка в воздух

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 проверять выполнение 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, т.е. случай трещины (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 .

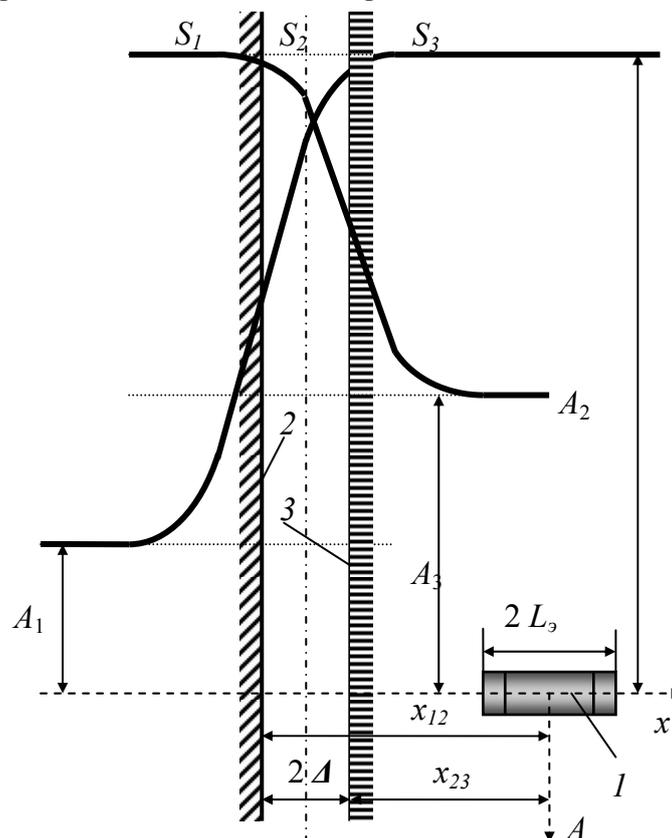


Рис. 4. Расчётная схема для определения показаний интроскопа в окрестности трещины шириной $2A$

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

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

Проверка выполнения граничных условий подтверждает правильность полученных соотношений:

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

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

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

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:

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

или, используя формулу

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

получим после несложных преобразований окончательную формулу для определения ширины раскрытия трещины

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

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_s датчика, помещённого в центре трещины, при изменении её раскрытия Δ , когда предельные показания интроскопа равны $A_m = 1$ (трещина $\Delta \gg L_s$) и $A_m = 0$ (массив горных пород, $\Delta = 0$).

Анализ показывает, что вплоть до значений $\Delta/L_s < 0,5$ 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, что дает нормированный показатель неоднородности массива

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

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

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

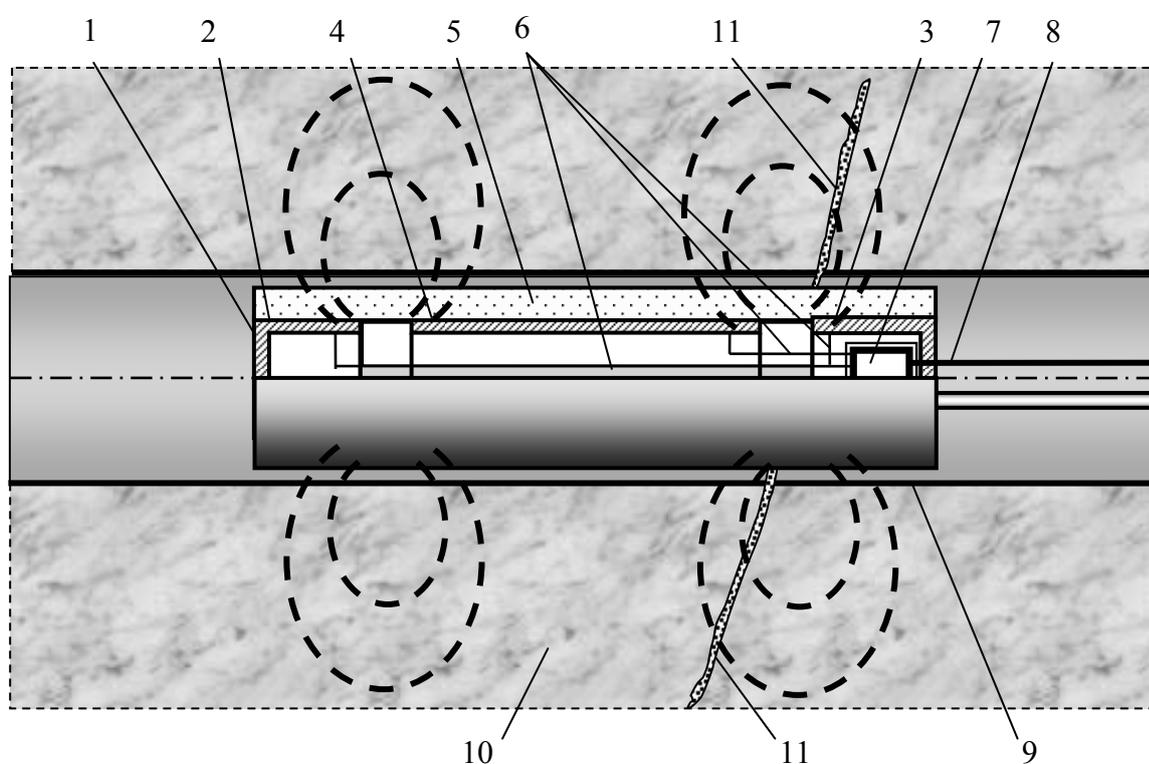
$$\tilde{x} = x / L_э \quad (14)$$

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

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

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

Для реализации предложенной идеи была разработана конструкция интроскопа, изображенная на рис. 5.



- 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 электроемкостного интроскопа

Электроемкостный 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, окруженного породами. А так как эта ёмкость меняется в зависимости от величины диэлектрической

проницаемости окружающих пород 10, то удастся выявить неоднородности породного массива в виде трещин 11 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 также определить, чем заполнена трещина – воздухом или водой (раствором), а по амплитуде изменения показаний можно рассчитать ширину раскрытия трещины. Это повышает информативность и достоверность измерений.

Однако все скважинные интроскопы, как и все сканирующие приборы, имеют существенный недостаток, а именно: они не позволяют в автоматическом режиме проводить измерение информационных показателей массива. При их использовании значительные затраты времени уходят на перемещение, остановку зонда и проведение манипуляций по фиксации показаний датчика. Определение пространственных координат датчика 1 выполняется ручными измерениями по шкале на досылочном приспособлении 5 и поэтому имеет небольшую точность. Например, в интроскопе ЕИ-3 только для проведения измерений в одной скважине на 20 точках замеров требуется от 0,5 до 1 часа работы двух операторов в подземных условиях. Кроме того, следует учесть ещё около 1-2 часов времени на камеральную обработку результатов замеров. Это становится недопустимым особенно с точки зрения оперативности принятия инженерных решений.

Поэтому появилась следующая важная задача: разработать основные теоретические положения, методику и прибор, позволяющие оперативно исследовать и оценивать неоднородности в виде одиночных трещин или их систем в окрестности измерительной скважины.

Возможны два крайних случая измерения информативных показателей интроскопом такого типа:

а. установить последовательно серию датчиков на зонде и снять все показания сразу по всей длине скважины, однако это существенно усложняет зонд и аппаратуру по записи показаний (надо последовательно переключать датчики);

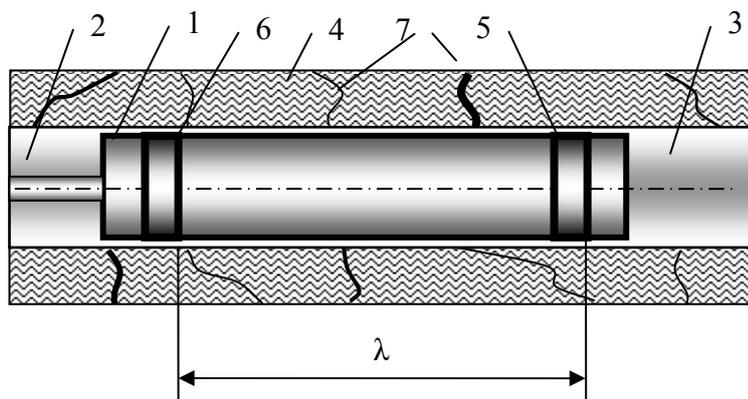
б. перемещать один датчик на заданное расстояние (например, 10 см) вдоль скважины, фиксируя показания и определяя соответствующую координату нахождения датчика в скважине. Этот способ применяют сейчас повсеместно. Однако это длительный и трудоемкий способ измерения.

Есть промежуточные варианты по способам ведения измерений. Простейший из них: по мере перемещения зонда по скважине одновременно с записью показаний датчика записывать и его положение в шпуре (глубину досылки в шпур). Это можно обеспечить, например, механически за счет вращения колесика, которое дает электрические показатели длины параллельно с информативным показателем. Наиболее простой способ измерений – это замерить координаты, по длине скважины, первого и последнего отсчета по одному датчику и равномерно (по возможности) двигать датчик по шпuru с автоматической записью замеров. Зная расстояние между первым и последним замером (а это длина досылочной штанги минус расстояние от датчика до конца штанги), равномерно распределить все замеры по данному расстоянию. Однако точность таких измерений будет невысока.

Эти недостатки устраняет новая конструкция интроскопа, и методика выполнения измерений неоднородностей с удобной автоматической записью всех необходимых показателей (интенсивность сигнала и его координаты в скважине).

Перспективной можно считать идею использования парных координатных датчиков с независимым присоединением к измерительному блоку и синхронной непрерывной записью их показателей во времени. Такой скважинный интроскоп ИАИН (интроскоп автоматического измерения неоднородностей) (рис. 6) [5] включает зонд 1, который вводится с помощью досылочного устройства 2 через буровую скважину 3 в массив горных пород 4. На зонде 1 размещены парные датчики 5 и 6 для измерения продольной пространственной координаты по краям зонда, каждый из них присоединён к отдельному измерительному блоку. Тем самым обеспечена непрерывная и синхронная запись во времени сигналов, вырабатываемыми датчиками, при их продольном перемещении по скважине и возможность автоматического режима измерения, повышение надежности и скорости проведения замеров, что позволяет уменьшить затраты времени и повысить их информативность. Предложенная методика заме-

ров соответствует требованиям оперативности принятия решений путем вывода результирующего графика на экран портативного компьютера (ноутбука).



1 – зонд; 2 – досылочное устройство; 3 – буровая скважина; 4 – массив горных пород; 5, 6 – парные датчики; 7 – трещины в массиве

Рис. 6. – Скважинный интроскоп с парными датчиками ИАИН

относительно массива горных пород 4 по вышеприведенным формулам.

Измерение в массиве производим одновременно обоими датчиками при перемещении зонда в массиве и индивидуальной записью показаний $\Pi_1(t)$ и $\Pi_2(t)$ как функции времени, эти показания будут со сдвигом соответствующих показаний на Δt_i . Результаты измерений будут представлены в виде двух графиков, которые почти дублируют друг друга (см. графики на рис. 7). Каждое i -тое показание на сопоставляемых точках графиков сдвинуто на Δt_i . Чтобы определить интервал времени Δt_i , необходимо взять разность $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$. Следовательно, тогда можно определить скорость, с которой передвигались оба датчика в момент времени между показаниями $\Pi_1(t)$ и $\Pi_2(t)$:

$$V_i = \lambda / \Delta t_i = \lambda / [t_1(\Pi_i) - t_2(\Pi_i)]$$

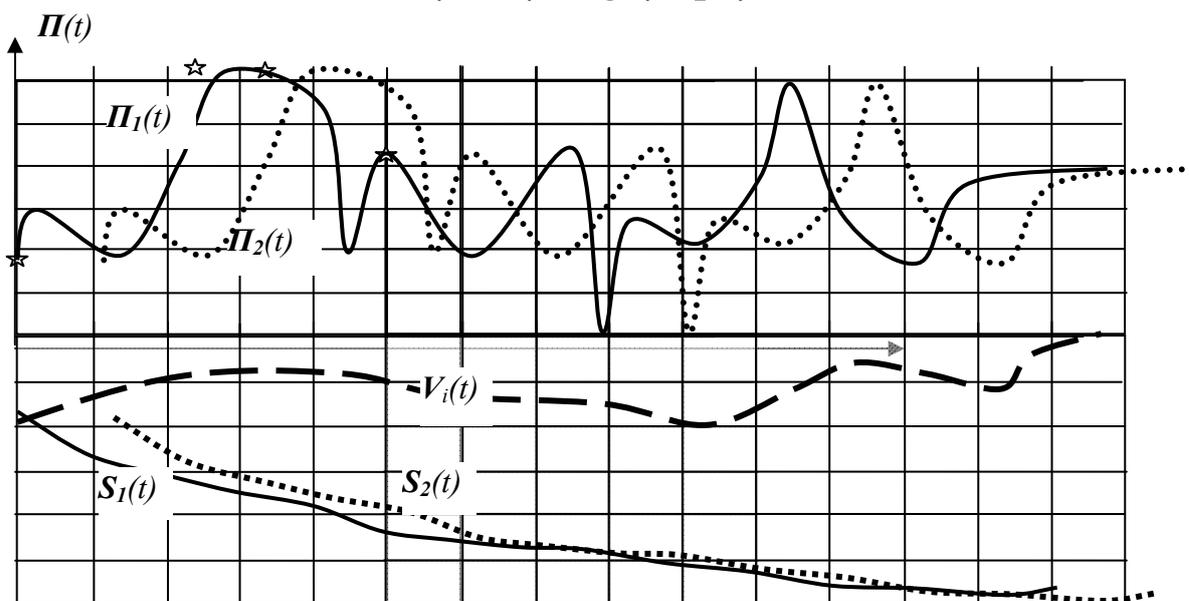


Рис. 7. График изменения показаний интроскопа при перемещении двух датчиков зонда

Работает скважинный интроскоп с парными датчиками следующим образом.

Зонд 1 передвигают по буровой скважине 3 с помощью досылочного устройства 2 с любой скоростью, в том числе и неравномерной. Парные датчики 5 и 6 на зонде 1 реагируют на структурные неоднородности 7 массива горных пород 4 и посылают соответствующие сигналы на блок измерения (не показано), где они записываются как функция времени. Поскольку расстояние между парными датчиками фиксировано, то можно с помощью компьютерной программы в реальном времени определить продольную скорость передвижения зонда 1

После этого можно вычислить расстояние, которое проходили датчики в любой момент времени в непрерывной и дискретной трактовке:

$$S(t) = \int_0^t V(\tau) d\tau \quad \text{или} \quad S(t) = \sum_{i=0}^t V_i(\tau) \Delta\tau_i$$

где V_i - скорость зонда с парными датчиками в i -той точке трассы измерений;

u – номер измерения в i -той точке трассы измерений, $u = 1 \dots n$; n -количество измерений;

λ - продольное расстояния между соответствующими парными датчиками;

Δt_i - отрезок времени между одинаковыми откликами Π_i у парных датчиков;

$t_1(\Pi_i)$; $t_2(\Pi_i)$ - отсчеты времени для одинаковых показателей парных датчиков;

$L(t)$ - продольная координата измерений в зависимости от времени;

Целесообразно в скважинном интроскопе расстояние между парными датчиками 5 и 6 выполнить минимальным для уменьшения ошибки измерения координат неоднородностей.

Таким образом определяют пространственную координату зонда скважинного интроскопа при любом законе его перемещения, что дает возможность проводить ускоренные измерения без многочисленных остановок зонда в скважине, а по дисплею блока измерения следить в реальном времени за изменениями структуры массива вдоль трассы буровой скважины. Это значительно упрощает процедуру испытаний, дает существенное уменьшение времени и труда по измерению и обработке показаний структурного строения массива.

Электроемкостный интроскоп может стать надёжным средством для измерения структурной нарушенности массива горных пород и войти в перечень необходимых приборов для каждого горного предприятия при ведении горных работ

Выводы:

- разработана математическая модель изменения показаний датчика интроскопа при его перемещении вдоль скважины в присутствии элементарной неоднородности типа контакта разнородных сред, показано, что показания интроскопа зависят от расстояния между датчиком и границей контакта сред и описываются гиперболическим тангенсом в виде уравнения (1), а для оценки структурной 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 экспериментальным путём при тарировке датчика интроскопа; доказана линейная зависимость (15) раскрытия трещины от эффективной полудлины датчика и показателя неоднородности;

- создана и успешно испытана конструкция интроскопа, позволяющая реализовать предлагаемую идею измерения структурных неоднородностей, в частности, трещин с учетом их заполнения, предложена новая методика ускоренного проведения измерений при перемещении зонда интроскопа по скважине с использованием парных датчиков, что открывает возможность широкого использования электроемкостных интроскопов предложенной конструкции при ведении изыскательных и строительных работ в разных отраслях промышленности и в первую очередь – в горном деле.

Список литературы

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. - 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, 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. Електроемнісний інтроскоп для масиву гірських порід ЕІ-3 / Касьянов В.О., Литвинський Г.Г.; заявник і патентовласник Донбаський державний техн. ун-т. – № U200800168, заявл. 03.01.08; опубл. 25.04.2008, Бюл. №8.