

## ТАРИРОВКА ПРИБОРА ДЛЯ ИНТРОСКОПИИ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

*Г.В. Бабиюк, В.Ф. Пунтус, Донбасский государственный технический университет,  
Украина*

Приведены результаты работ по исследованию значимости влияющих факторов и установлению зависимостей показаний интроскопа от раскрытия трещины и диаметра шпура.

**Постановка проблемы.** Для изучения процесса разрушения пород вокруг выработок, в том числе закрепленных анкерной крепью, применяются различные скважинные методы [1]. Среди них хорошо зарекомендовал себя метод электроемкостного каротажа шпуров, разработанный в ДонГТУ [2]. В основе его лежит зависимость частоты тока, вырабатываемой измерительным автогенератором, от величины емкости конденсаторного датчика, которая, в свою очередь, определяется диэлектрической проницаемостью и пустотностью пород, слагающих массив. При этом максимальное или минимальное значение показания прибора в зависимости от типа заполнителя трещины соответствует ее положению посередине датчика, а величина пика характеризует ее раскрытие.

Для обработки натуральных измерений авторами метода предложена зависимость относительного раскрытия трещины от показаний интроскопа [2]:

$$P_n = \sum \delta / l_3 = (A_m - A_t) / (A_m - A_3), \quad (1)$$

где  $P_n$  – относительный показатель нарушенности породного массива;

$\sum \delta$  – суммарное раскрытие трещин в интервале измерения, мм;

$l_3$  – эффективная длина датчика, мм;

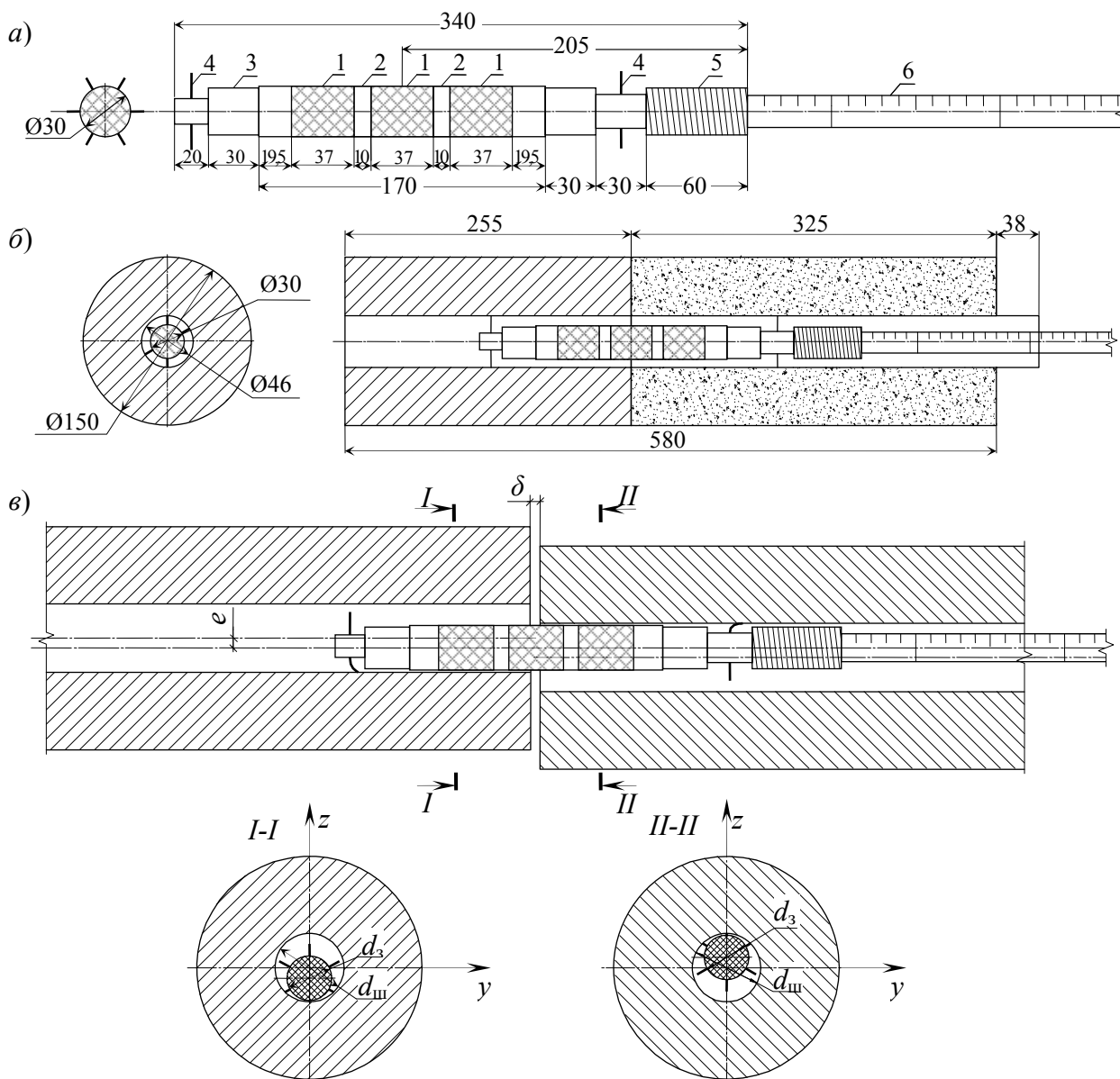
$A_m, A_t, A_3$  – показания прибора соответственно на ненарушенных участках массива, в шпуре и в заполнителе трещины, кГц.

Однако величины, входящие в выражение (1), зачастую не являются постоянными. Более того, на показания прибора, как показали шахтные измерения, существенное влияние оказывают диаметр шпура или величина кольцевого зазора между зондом и породной поверхностью шпура, смещение оси зонда по отношению к оси шпура, происходящее в результате поперечных подвижек слоистых пород, неровностей породной поверхности шпура или деформации стабилизаторов положения шпура, и другие факторы. Поэтому реальные показания интроскопа имеют явно выраженный случайный характер, а показатель неоднородности  $P_n$  является косвенной характеристикой, которую можно использовать только для качественной оценки нарушенности в месте опробования. Для повышения достоверности измерений электроемкостным методом следует провести тарировку интроскопа в лабораторных условиях и установить зависимость показаний прибора от основных влияющих факторов, позволяющих получить необходимую информацию с минимальными затратами.

**Формулирование цели.** Цель лабораторных исследований заключалась в нахождении экспериментальных зависимостей, связывающих показания измерительного прибора (частоты сигнала) с тем или иным влияющим фактором, установлении значимости влияющих факторов и получении зависимости частоты сигнала от совокупного действия значимых факторов с использованием планирования эксперимента.

**Обоснование методики исследования.** Лабораторные исследования проводились на стенде, представляющем собой бумажную трубу (диаметром 150 мм и длиной не менее 650 мм), заполненную модельным материалом, имитирующим породный массив. По оси трубы размещался шпур (диаметром 36 мм; 41 мм и 46 мм), в который помещался зонд прибора (рис. 1,а), а по ее середине располагалась неоднородность в виде контакта двух сред или трещины. В качестве сред выбраны: воздух, для которого диэлектрическая проницаемость известна и равна  $\epsilon_r = 1$ ; сухой кварцевый песок ( $\epsilon_r = 4,69 - 5,06$ ); щебень, имитирующий сильно нарушенный массив с коэффициентом разрыхления  $k_p = 1,65$  и изготовленный из

дробленого аргиллита, отобранного в выработках ш/у «Луганское», пройденных по пласту  $l_6^H$ ; модельный материал с процентным соотношением компонентов Г:Ц:ГП:П:В = 25,3%:11,56%:36,94%:14,64%:11,56% (по весу), воспроизводящий однородный ненарушенный массив и изготовленный из дробленой горелой породы (ГП), скрепленной комбинированным водным (В) вяжущим на основе гипса (Г) и цемента (Ц), с добавлением кварцевого песка (П). Выбор в качестве модельного материала такого сложного состава обусловлен стремлением увеличить значение диэлектрической проницаемости среды до значения  $\epsilon_r = 8-12$ , характерного для однородной поликристаллической горной породы. Измерения частоты сигнала  $A$  в моделях производились после полного высыхания материала, процесс которого контролировался путем взвешивания образцов.



- 1 – электроды преобразователя; 2 – диэлектрик; 3 – корпус датчика;  
4 – центрирующие элементы; 5 – резьбовое соединение; 6 – досылочное устройство

Рис. 1. Конструкция зонда (а) и схемы стендов для исследования показаний интроскопа на контакте двух сред (б) и при смещении оси зонда относительно оси шпура (в)

Перед началом измерений прибор для его температурной стабилизации выдерживался 60 минут во включенном состоянии. После снятия начального отсчета на воздухе, датчик вводили в шпур с одной стороны модели таким образом, чтобы электромагнитное поле электро-

емкостного преобразователя не выходило за пределы модели. Далее зонд перемещали с интервалом 1 см в направлении другого края модели и фиксировали отчеты до тех пор, пока он не выходил за пределы модели с другой стороны. При этом измерения повторяли 2 раза, а отчеты снимали при движении зонда в прямом и обратном направлениях, что позволило получить в каждой точке модели по четыре показания. В конце каждой серии замеров снимали заключительный отчет на воздухе. Интервал перемещения датчика принят одинаковым при измерениях во всех средах, в том числе при наличии трещин. Выбор такого шага измерения обусловлен тем, что дискретные сигналы датчика для того, чтобы не потерять информацию о неоднородности (трещине) среды, должны поступать с шагом перемещения зонда не более половины эффективной длины датчика.

**Измерение показаний интроскопа на границе контакта двух сред.** Наиболее характерным типом неоднородности в породном массиве является плоскость контакта двух сред с различными физическими свойствами. Такая неоднородность соответствует напластованию в слоистом породном массиве, границе раздела разрушенных и монолитных пород, контакту породы с воздухом в трещине.

Измерения проведены на стенде (рис.1, б), одна половина которого была заполнена модельным материалом, а другая – воздухом, сухим песком или дробленой породой. В этом случае шпур имитировался тонкой бумажной трубкой.

Результаты измерений представлены на рис. 2. Анализ зависимостей позволяет отметить, что, несмотря на существенное отличие диэлектрических свойств контактируемых сред, графики имеют одинаковый вид и представлены двумя горизонтальными прямыми, плавно сопрягающимися кривой, вогнутость которой переходит в выпуклость в месте пересечения плоскости контакта, где она имеет максимальный угол наклона к горизонтали. Авторы метода для аппроксимации такого графика, полученного для контактов «воздух-вода» и «воздух - песок», предложили использовать выражение гиперболического тангенса [2], расстояние между асимптотами которого равно разности показаний прибора в контактируемых средах. Необходимо заметить, что это выражение справедливо, если показания интроскопа линейно зависят от физических свойств среды (диэлектрической проницаемости). Из этого графика авторы метода [2] обосновали геометрический смысл эффективной полудлины датчика  $l_3$ , которая является проекцией на горизонтальную ось касательной, проведенной в точке перегиба кривой, т.е. является протяженностью

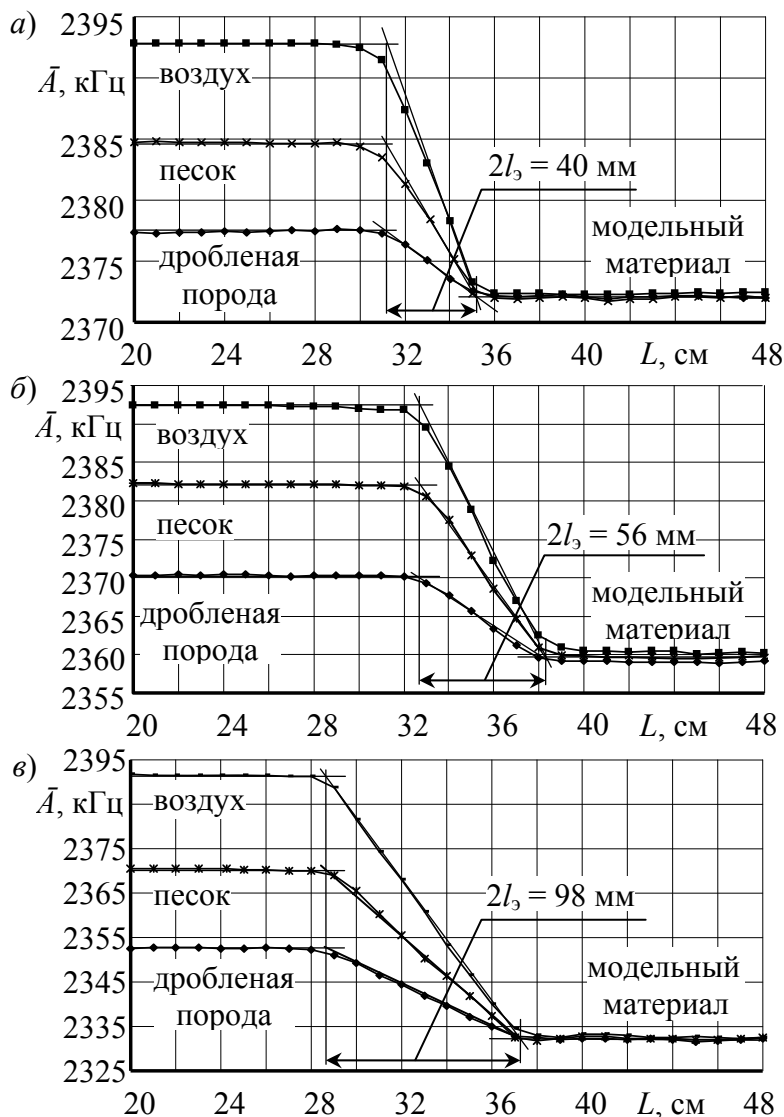


Рис. 2. Определение эффективной длины датчика по результатам тарировки интроскопа в различных средах и при различных диаметрах шпура:

а) –  $d_{ш} = 46$  мм; б) –  $d_{ш} = 41$  мм; в) –  $d_{ш} = 36$  мм

зоны чувствительности емкостного преобразователя. При этом длина датчика  $2l$  не обязательно совпадает с эффективной длиной  $2l_3$ . По их мнению, параметр  $l_3$  полностью определяется конструктивными размерами датчика и является константой для данного прибора, подлежащей определению в ходе его тарировки.

Однако такая схема не учитывает, что зонд интроскопа в породном массиве может быть размещен только в шпуре, размеры которого, как показали шахтные исследования, существенно влияют на показания прибора при диаметре зонда  $d_3 = const$ , а электрическое поле датчика распространяется в ограниченном пространстве, представленном, в первую очередь, полостью шпура, а затем уже контактирующими средами. Поэтому протяженность зоны чувствительности емкостного преобразователя определяется пересечением поля датчика с поверхностью шпура. Если кольцевой зазор между зондом и стенками шпура остается постоянным, т.е.  $d_{ш}/d_3 = const$ , то, независимо от диэлектрической проницаемости сред, величина эффективной длины  $2l_3$  датчика остается постоянной. При этом угол наклона кривой к поверхности раздела изменяется. Чем больше разница показаний интроскопа в контактируемых средах, тем больше угол наклона касательной к горизонтали.

При переменном диаметре шпура показания интроскопа зависят не только от диэлектрических свойств контактируемых сред, но и от размеров шпура. Если диаметр шпура увеличивается, то с ростом кольцевого воздушного зазора между зондом и поверхностью шпура абсолютная частота сигнала  $A$  при постоянстве диэлектрических свойств контактируемых сред возрастает, при этом эффективная длина датчика и разность показаний интроскопа в двух средах уменьшаются.

Данные теоретические положения подтверждаются экспериментальными зависимостями, представленными на рис. 2, где демонстрируется практическое постоянство эффективной длины датчика в различных средах при  $d_{ш}/d_3 = const$ , и приведены ее значения для различных диаметров шпуров. Нелинейная зависимость половины эффективной длины от относительных размеров шпура аппроксимируется экспонентой с теоретическим корреляционным отношением  $corr = 0,994$ :

$$l_3 = 1377,4 \cdot \exp(-2,807 \cdot [d_{ш} / d_3]). \quad (2)$$

**Влияние диаметра шпура на показания интроскопа.** Влияние диаметра шпура на показания интроскопа исследовалось на моделях однородного породного массива без трещин. Данные измерений для различных диаметров шпуров представлены на рис.3 в форме эмпирической зависимости частоты сигнала от диаметра шпура. Анализ результатов позволяет отметить, что даже в однородной среде показания прибора представляют собой статистическую совокупность, обусловленную не столько вариацией диэлектрической проницаемости окружающей датчик среды, сколько изменением положения зонда в шпуре.

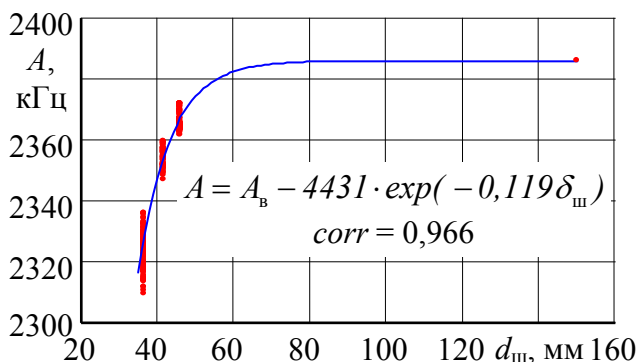


Рис. 3. Зависимости частоты сигнала  $A$  от диаметра шпура  $d_{ш}$

В первую очередь разброс показаний прибора объясняется смещением оси зонда относительно оси шпура из-за неконтролируемого изгиба проволок, предназначенных для фиксации положения датчика. При этом вариация показаний возрастает с уменьшением диаметра шпура  $d_{ш}$ , так как в этом случае прогибы проволок достигают максимальной величины. Математическое ожидание частоты сигнала с ростом диаметра шпура увеличивается в связи с ростом кольцевого воздушного зазора между поверхностями шпура и зонда. Проверка выборок с помощью тестов Пирсона и

Колмогорова показала, что случайная величина частоты сигнала при уровне значимости  $\alpha=0,05$  хорошо описывается нормальным законом распределения.

С ростом диаметра шпура частота сигнала  $A$  увеличивается по нелинейной зависимости, которая описывается экспоненциальной функцией. Зависимость асимптотически стремится к

показанию прибора на воздухе  $A_B$ , так как с ростом диаметра шпура увеличивается кольцевой воздушный зазор между зондом и его поверхностью. Чем меньше диаметр шпура, тем ближе датчик с электроемкостным преобразователем расположен к породе, которая имеет в несколько раз большее значение диэлектрической проницаемости, чем воздух, поэтому показания интроскопа с уменьшением диаметра шпура снижаются. Аналогичным образом зависят показания интроскопа от диаметра шпура в песке и дробленой породе, причем с ростом пустотности среды нелинейность становится менее выраженной.

Влияние зазора между датчиком и стенкам шпура на показания интроскопа наглядно демонстрируется с помощью зависимости прироста показаний интроскопа  $\Delta A$  от относительного диаметра шпура  $d_{ш}/d_3$  ( $corr = 0,999$ ):

$$\Delta A = 3273,9 \cdot \exp(-2.807 \cdot [d_{ш} / d_3]). \quad (3)$$

С увеличением зазора чувствительность интроскопа снижается, так как при этом разность показаний прибора в массиве  $A_M$  и на воздухе  $A_B$  уменьшается. Истинное показание прибора в массиве  $A_M$  соответствует случаю, когда зазор между зондом и стенкой шпура будет равен нулю, т.е. при  $d_{ш}=d_3$ , а предельное показание прибора на воздухе достигается, если диаметр шпура многократно превышает размер электрического поля вокруг датчика.

В этой связи следует отметить, что устранить существующую неопределенность в получении показания прибора на ненарушенных участках массива  $A_M$  можно за счет определения показания прибора с использованием зависимости (3) при  $d_{ш}=d_3$ . Кроме того, увеличить чувствительность датчика  $\Delta A$  и снизить разброс показаний можно путем измерения прижатым к среде зондом, т.е. при минимальной величине зазора, хотя бы с одной стороны зонда.

**Влияние трещин на показания интроскопа.** Влияние трещинной пустотности на показания интроскопа изучалось на моделях, изготовленных из материала на основе горелой породы. Трещины выполняли путем разрезания модели перпендикулярно к оси шпура на отдельные части различного размера. Трещиноватый породный массив собирался на стенде, число трещин и расстояние между ними задавалось при сборке, а изменение раскрытия трещин осуществлялось за счет раздвижки отдельных частей модели.

Вначале исследовались показания интроскопа в зоне действия одиночной трещины, раскрытие которой в ходе эксперимента изменялось от нуля до 10 мм через 1 мм, от 10 мм до 60 мм через 5 мм, а далее через 10 мм.

В качестве примера на рис. 4 приведены зависимости изменения показания интроскопа по длине шпура для одного и того же раскрытия трещины ( $\delta=20$  мм и  $\delta=60$  мм) при различных диаметрах шпура ( $d_{ш}=36$  мм и  $d_{ш}=46$  мм). Графики построены в координатах  $\Delta A$  и  $x$ , где  $\Delta A$  – приращение показаний интроскопа в зоне влияния трещины, а  $x$  – расстояние от середины трещины до места ее измерения.

На основании анализа полученных результатов можно отметить, что графики изменения показаний интроскопа вблизи одиночной трещины представляют собой куполообразные кривые, являющиеся результатом наложения зависимостей для двух смежных поверхностей раздела одной и той же трещины. Максимальная частота сигнала прибора приурочена к середине трещины, причем по мере роста ее раскрытия увеличиваются как ширина

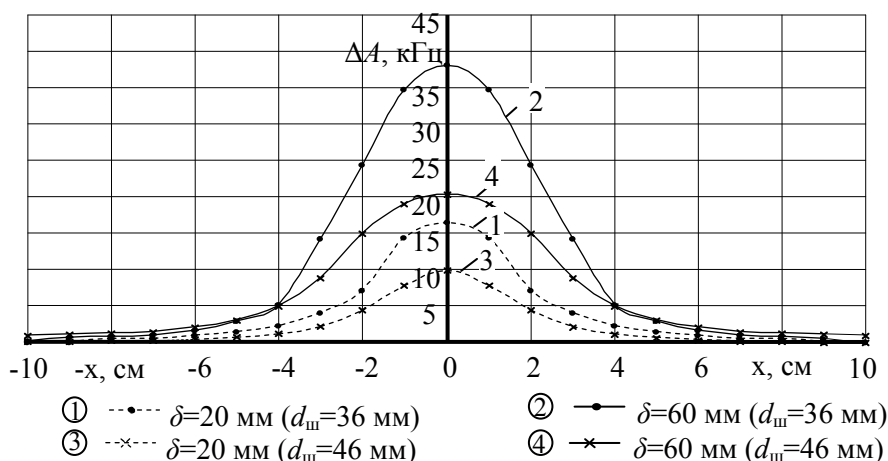


Рис. 4. Зависимость прироста показаний интроскопа по длине шпура для одного и того же раскрытия трещины ( $\delta = 20$  мм и  $\delta = 60$  мм) при различных диаметрах шпура ( $d_{ш} = 36$  мм и  $d_{ш} = 46$  мм)

поверхностей раздела одной и той же трещины. Максимальная частота сигнала прибора приурочена к середине трещины, причем по мере роста ее раскрытия увеличиваются как ширина

зоны влияния трещины, так и амплитуда возмущения. С ростом диаметра шпура величина показаний интроскопа вне зоны влияния трещины несколько увеличивается, а амплитуда возмущения за счет влияния трещины уменьшается. Чем больше раскрытие трещины, тем ближе показания прибора приближаются к частоте сигнала на воздухе.

Анализ рис. 4 позволяет отметить, что раскрытие трещины и диаметр шпура являются взаимовлияющими факторами, причем больший прирост частоты сигнала в трещине с одним и тем же раскрытием имеет место при меньшем диаметре шпура. С ростом величины раскрытия трещины максимальное показание прибора посередине трещины и ширина зоны ее влияния увеличиваются, что предполагает рост частоты сигнала в заполнителе трещины  $A_3$ , тогда как в выражении (1) значение частоты  $A_3$  принимается авторами метода постоянным и равным показанию прибора либо на воздухе, либо в воде.

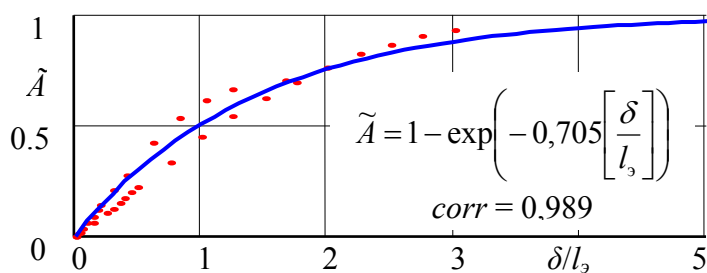


Рис. 5. Зависимость относительных показаний интроскопа  $\tilde{A}$  от относительной ширины трещины  $\delta/l_3$  при установке датчика по ее середине

Сказанное иллюстрируется на графике (рис. 5), построенном в безразмерных координатах  $\tilde{A} = (A_T - A_1) / (A_B - A_1)$  и  $\delta/l_3$ , где  $A_T$  – показания прибора, когда датчик установлен по центру трещины;  $A_1$  – показание прибора, когда датчик находится в массиве вне зоны влияния трещины. Из рис. 5 следует, что относительные показания интроскопа, независимо от диаметра шпура, не-

линейно зависят от раскрытия трещины и могут быть представлены экспонентой.

Для случаях двух параллельных трещин, разделенных целиком постоянной толщиной  $S=1$  см и имеющих одинаковое раскрытие  $\delta$ , которое в ходе опыта изменялось от 0,25 мм до 80 мм, графики изменения средних приращений показаний интроскопа в шпуре диаметром 46 мм приведены на рис. 6, а.

Вначале, пока трещины имеют небольшое раскрытие, датчик реагирует на них как на одну трещину. При дальнейшем увеличении суммарного раскрытия трещин наблюдается изменение формы зависимости. Вершина становится более плоской ( $\Sigma\delta=30$  мм), а затем возникает седловина и появляются два пика, т.е. датчик начинает отличать одну трещину от другой. Следовательно, при толщине целика  $S=1$  см интроскоп обладает избирательной способностью различать трещины, когда их суммарное раскрытие превышает 30 мм.

Теперь рассмотрим другой случай, когда между двумя трещинами с суммарным раскрытием  $\Sigma\delta=10+10=20$  мм имеется целиком переменной толщины  $S$ , которая принимала значения 0, 10, 20, 30 и 50 мм (рис. 6, б). График для

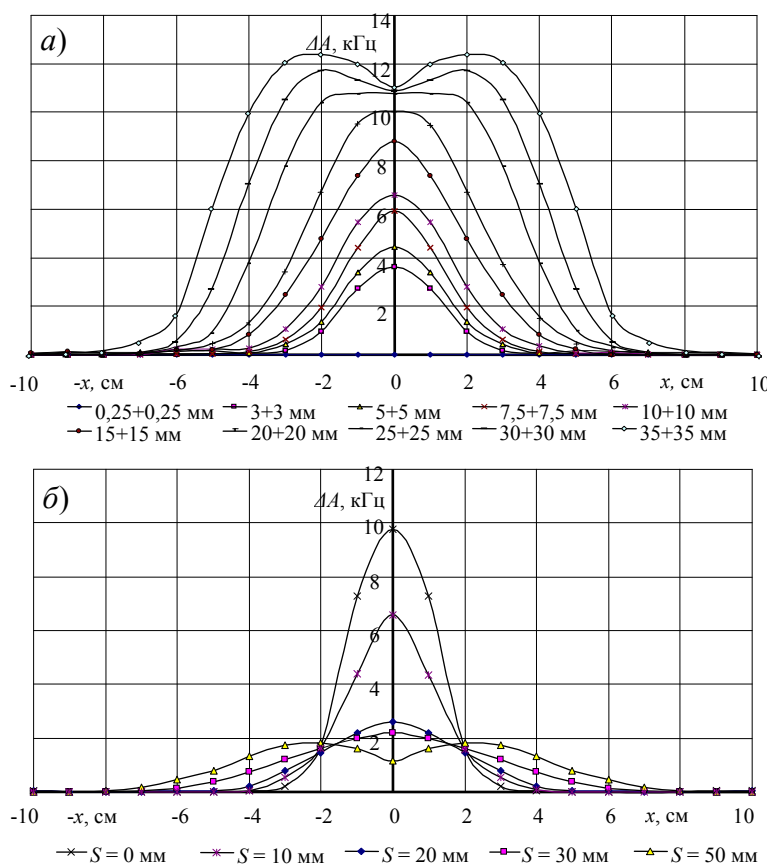


Рис. 6. Приращения показаний интроскопа в зоне влияния двух трещин различного раскрытия при величине целика 1 см (а) и одинакового раскрытия (10 мм) с целиком переменной толщины (б)

$S=0$  мм соответствует случаю одиночной трещины с раскрытием  $\delta=20$  мм. Если трещины находятся достаточно близко друг к другу, то интроскоп реагирует на них как на одну трещину, однако прирост показаний интроскопа в середине целика уменьшается по сравнению с одиночной трещиной. Следовательно, постулируемый в работе [2] принцип аддитивности показаний интроскопа при расположении любого числа трещин произвольного раскрытия в пределах  $\Sigma\delta < l_3$  при измерениях датчиком данного типа не подтверждается экспериментально.

При дальнейшем росте ширины целика  $S$  между трещинами размер зоны изменения показаний интроскопа вдоль шпура увеличивается, вершина пика становится более плоской, а с момента  $S \geq 30$  мм появляются два пика. Следовательно, датчик способен избирательно отличать одну трещину от другой, когда относительное расстояние между трещинами превышает  $(S+\delta)/l_3 > 2$ .

**Влияние эксцентриситета положения датчика на результаты измерений.** В реальных условиях одним из основных факторов, влияющих на показания интроскопа, является уступ на поверхности шпура, образующийся в результате перемещения разрушенных пород перпендикулярно к его оси, что приводит к изменению положения зонда относительно оси шпура и появлению эксцентриситета  $e$  между осями шпура и зонда.

Для изучения влияния этого фактора (рис. 1, в) вначале измерения проводили по длине шпура без эксцентриситета ( $e = 0$ ) при различном раскрытии трещины  $\delta$  (рис. 7, а). Затем создавали уступ между двумя частями модели на величину эксцентриситета. Ввиду гибкости центрирующих элементов зонда в общем случае возможно неравенство эксцентриситетов в левой и правой части модели, т.е. при переходе уступа зонд может поворачиваться на некоторый угол и не быть параллельным оси шпура. В шпуре диаметром  $d_{ш}=46$  мм эксцентриситету задавали значения  $e = 8$  мм и  $e = 4$  мм, в шпуре диаметром  $d_{ш}=36$  мм – соответственно  $e=3$  мм и  $e = 1,5$  мм. При этом вдоль оси  $z$  с одной стороны зонда кольцевой зазор  $(d_{ш}-d_3)/2$  увеличивался до максимума, а с другой – уменьшался до нуля.

Совокупность зависимостей для среднего прироста показаний интроскопа вдоль модели шпура диаметром 46 мм представлена на рис. 7. Анализ полученных зависимостей позволяет отметить, что взаимовлияние двух факторов существенно изменяет картину распределения показаний интроскопа по длине шпура и усложняет ее расшифровку. Это связано, прежде всего, с разнонаправленностью влияния факторов. С одной стороны рост раскрытия трещины ведет к увеличению доли воздуха в зоне действия электромагнитного поля датчика и, как следствие, к увеличению прироста показаний интроскопа, макси-

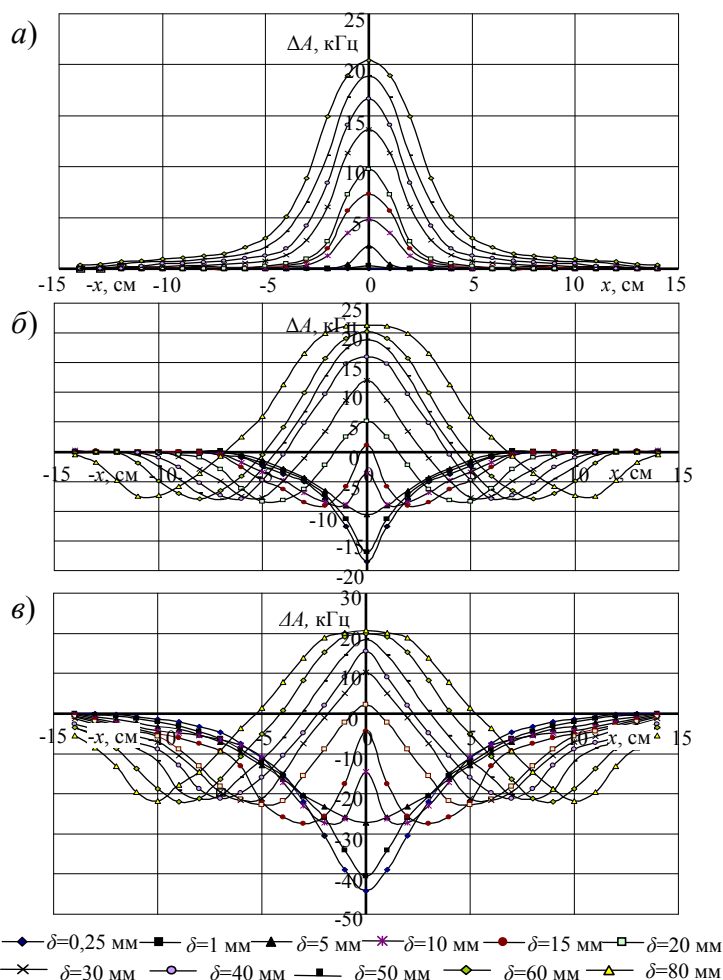


Рис. 7. Прирост показаний интроскопа  $\Delta A$  вдоль модели шпура диаметром  $d_{ш} = 46$  мм при величине эксцентриситета  $e = 0$  мм (а),  $e = 8$  мм (б) и  $e = 16$  мм (в) и различных значениях раскрытия трещины  $\delta$

мум которого соответствует случаю, когда середина датчика совпадает с серединой раскрытия трещины. С другой стороны, увеличение эксцентриситета ведет к уменьшению зазора между поверхностью шпура и зондом, а, следовательно, к росту объема породы в зоне действия датчика. Поэтому в области влияния эксцентриситета показания прибора уменьшаются и образуются купола, которые направлены вниз, причем их максимум соответствует случаю, когда силовые линии поля датчика в большей степени пересекают породу, а в меньшей – воздух.

Отмеченные закономерности наглядно демонстрируются на рис. 8. С ростом раскрытия трещины показания интроскопа увеличиваются по нелинейной зависимости. Наличие эксцентриситета в шпуре приводит даже к появлению отрицательной области, что очень затрудняет расшифровку показаний интроскопа с целью установления трещинной пустотности массива.

Таким образом, наличие трех взаимовлияющих факторов (диаметра шпура, раскрытия трещины и эксцентриситета) существенно усложняет картину распределения показаний интроскопа вдоль шпура, расшифровка которой с помощью методики [2], полученной на основании исследования влияния лишь одного фактора (раскрытия трещины), становится невозможной.

**Регрессионная модель зависимости показаний интроскопа от влияющих факторов.** Исследования на моделях шпуров позволили установить, что на показания интроскопа, кроме диэлектрической проницаемости среды, влияют также иные факторы: диаметр шпура  $d_{ш}$ ; эффективная длина датчика  $l_3$ ; раскрытие трещины  $\delta$ ; число трещин в пределах эффективной длины и их суммарное раскрытие; зазор между поверхностью зонда и стенкой шпура  $(d_{ш}/d_3)/2$ ; эксцентриситет положения зонда  $e$ ; ширина целиков между трещинами  $S$ . С помощью проведенных исследований получены графики изменения показаний интроскопа в зоне действия фактора и некоторые эмпирические зависимости. Однако множество влияющих факторов, случайный характер их влияния, взаимодействие факторов между собой, широкий диапазон варьирования их численных значений вызывают необходимость в постановке большого числа опытов, чтобы обеспечить необходимую представительность. В такой ситуации целесообразно для минимизации числа опытов при одновременном гарантировании заданной точности исследований использование математических методов планирования эксперимента [3]. Их применение исключает произвол в задании условий эксперимента и позволяет получить математическую зависимость показаний интроскопа от совокупного действия случайных факторов.

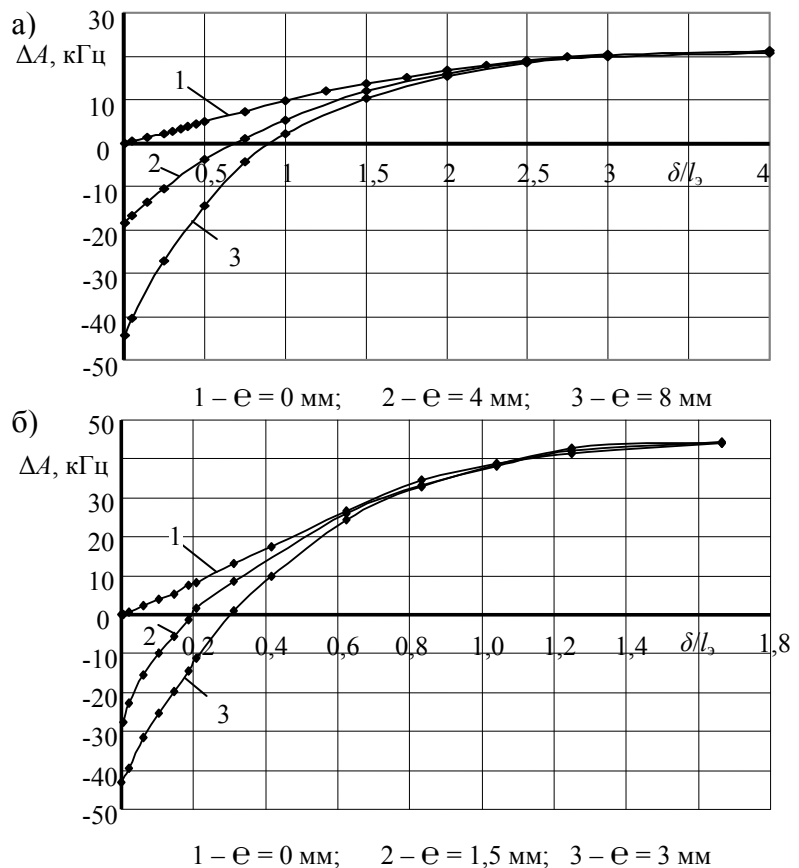


Рис. 8. Прирост показаний интроскопа по середине трещины в зависимости от её раскрытия при минимальном, среднем и максимальном значениях эксцентриситета  $e$  в шпурах диаметром 46 мм (а) и 36 мм (б)



В этом случае система «зонд-шпур-породный массив» имеет ряд характеризующих ее случайных входов, управлять которыми исследователь не может, поэтому модель выхода представляется уравнением регрессии в виде полинома:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + a_{12}x_1x_2 + \dots + a_{(n-1)n} \cdot x_{n-1} \cdot x_n + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + \dots + a_{nn}x_n^2, \quad (4)$$

где  $y$  – изменение показаний интроскопа  $\Delta A$  (кГц) в зоне влияния трещины;

$a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii}$  – коэффициенты регрессии, вычисляемые методами математической статистики [3].

В связи с трудоемкостью эксперимента основная задача его планирования состоит в выборе такого плана, при котором для оценки функции отклика  $y$  потребовалось бы провести минимальное число опытов  $n$ . Наиболее часто в подобных случаях используют планы экстремального эксперимента [3]. Эти планы представляют собой систему опытов, содержащую возможные неповторяющиеся комбинации выбранных факторов при экстремальных уровнях их варьирования. Среди планов экстремального эксперимента наиболее простыми являются планы полного факторного эксперимента (ПФЭ). Если мы имеем дело с  $n$  – факторами, каждый из которых устанавливается на  $q$  – уровнях, то для того, чтобы осуществить ПФЭ, необходимо поставить  $m=q^n$  опытов.

Рассмотрены уравнения регрессии первого и второго порядка, учитывающие взаимодействия двух факторов: диаметра шпура –  $x_1$  и раскрытия трещины –  $x_2$ . Входные факторы представлены в виде кодированных переменных [3], уровни и интервалы варьирования которых, приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Уровни и интервалы варьирования факторов

Наименование фактора и единицы измерения	Обозначение фактора	Уровни факторов			Интервал варьирования
		нижний -1	основ- ной 0	верх- ний +1	
Диаметр шпура $d_{ш}$ , мм	$x_1$	36	41	46	5
Раскрытие трещины $\delta$ , мм	$x_2$	0	20	40	20

Для определения коэффициентов в уравнениях регрессии проведено шесть опытов и один дополнительный в центре плана, который служил для проверки модели на адекватность.

План-матрица и результаты полного двухфакторного эксперимента приведены в табл. 2.

Таблица 2 – План-матрица, среднее значение выходной величины и дисперсия воспроизводимости опытов  $S^2\{y_j\}$

№	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1x_2$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$\bar{y}_i$	$S^2\{y_j\}$
1	+1	+1	+1	+1	136,74	137,53	136,86	137,66	137,20	0,22
2	+1	-1	+1	-1	135,32	135,66	135,54	135,31	135,46	0,03
3	+1	-1	-1	+1	79,91	81,10	80,72	81,28	80,75	0,41
4	+1	+1	-1	-1	121,35	121,45	121,75	121,74	121,58	0,05
5	+1	0	-1	0	127,86	127,01	127,95	127,05	127,47	0,30
6	+1	+1	0	0	115,96	115,76	114,32	116,12	115,54	0,85

После вычисления коэффициентов, уравнения регрессии первого и второго порядка имеют вид:

$$y = 118,75 + 10,64x_1 + 17,58x_2 - 9,77x_1x_2, \quad (5)$$

$$y = 125,88 + 10,64x_1 + 17,58x_2 - 9,77x_1x_2 - 9,05(x_1)^2 - 1,92(x_2)^2. \quad (6)$$

Проверка адекватности полученных моделей экспериментальным данным производилась статистически по методике, изложенной в работе [3]. При этом производилась оценка одно-

родности дисперсий выходной величины через коэффициент Кохрэна, значимости коэффициентов уравнения регрессии по критерию Стьюдента и проверка модели на адекватность по критерию Фишера. Проверка показала, что все значения коэффициентов в уравнениях регрессии (5 и 6) – значимы, а модели – адекватны. Сравнение значения выходной величины в центре плана со свободным членом уравнения регрессии позволило определить ошибку сходимости  $\delta$ , которая для уравнения (5) составила 4,1%, а для уравнения (6) – 1,66%, т.е. математическое уравнение второго порядка лучше описывает исследуемую область.

Найденное уравнение позволяет оценить степень влияния факторов на показания интроскопа при их взаимодействии. Если перед коэффициентом стоит знак плюс, то с увеличением данного фактора выходная величина увеличивается, а если стоит минус, то наоборот. Из уравнения (6) следует, что раскрытие трещины является более значимым фактором, чем диаметр шпура, а взаимовлияние факторов имеет противоположный знак, т.е. чем больше диаметр шпура, тем меньше влияние оказывает трещиноватость пород на показания интроскопа.

Криволинейная поверхность на рис. 9 дает наглядное представление о поведении уравнения регрессии второго порядка в факторном пространстве. Полученное уравнение (6) может использоваться для определения раскрытия трещин в массиве, т.е. по показанию интроскопа, замерив диаметр шпура  $d_{ш}$ , можно определить величину раскрытия трещин  $\delta$ .

**Выводы.** В шахтных условиях число действующих факторов еще более увеличивается (наличие неровностей поверхности шпура, наличие неоднородности в строении монолитного массива, наличие влаги в шпуре, наличие кусочков породы в шпуре, изменение угла наклона трещины и слоев по отношению к оси шпура и т.д.). Для решения отмеченной проблемы необходимо либо изменить методику оценки неоднородности породного массива по показаниям интроскопа с целью учета влияния всех значимых факторов, либо изменить конструкцию зонда и разработать новую методику замеров с целью стабилизации положения зонда в шпуре и усиления значимости трещинной пустотности в показаниях интроскопа. Для устранения отмеченных недостатков разработана новая конструкция прибора для интроскопии массива [4] и предложена оригинальная методика измерений, позволяющая оценивать не только относительный показатель нарушенности пород, но и величину раскрытия отдельных трещин и расстояние между ними.

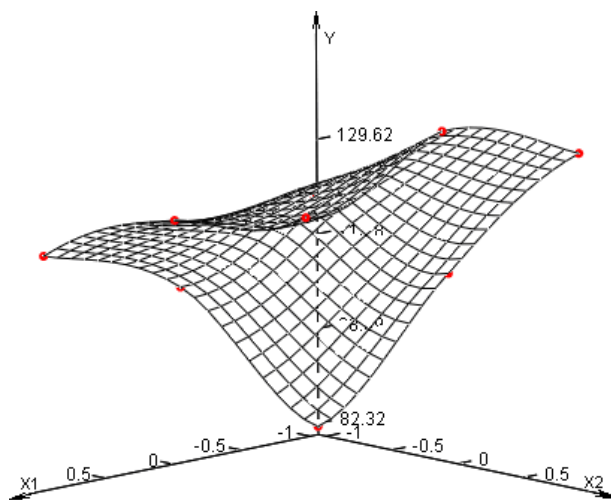


Рис. 9. Факторное пространство математической модели уравнения регрессии второго порядка

#### Список литературы

1. Ямщиков В.С. Контроль процессов горного производства / В.С. Ямщиков. – М.: Недра, 1989. – 446с.
2. Литвинский Г.Г. Измерение структурных неоднородностей массива при сооружении выработок / Г.Г. Литвинский, В.А. Касьянов // Технология, механизация и организация строительства горных выработок. – Кемерово: КПИ, 1988. – С.100-107.
3. Володарский Е.Т. Планирование и организация измерительного эксперимента / Е.Т. Володарский, Б.Н. Малиновский, Ю.М. Туз. – К.: Вища шк., 1987. – 280с.
4. Пат. №57376 Україна, МПК (2011.01) G01V 3/18. Електроємнісний інтроскоп для масиву гірських порід / М.О. Діденко, Г.В. Бабіюк, В.Ф. Пунтус. – №U2010 09387; заявл. 26.07.10; опубл. 25.02.11. Бюл. №4.