

УДК 622.831.3

Г.В. Бабиюк (д-р техн. наук, проф.), **В.Ф. Пунтус** (ассист.),
М.А. Диденко (канд. техн. наук, ассист.)
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск

ИССЛЕДОВАНИЕ, СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЕМКОСТНОГО МЕТОДА ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ПРОЯВЛЕНИЙ ГОРНОГО ДАВЛЕ- НИЯ ВОКРУГ ВЫРАБОТОК

С помощью лабораторных исследований электроемкостного метода оценивания неоднородностей в породном массиве установлено, что основными факторами, влияющими на показания интроскопа, являются раскрытие трещин и диаметр шпура. Предложена с использованием методики планирования эксперимента регрессионная зависимость показаний интроскопа от влияющих факторов. На основе установленных закономерностей усовершенствованы конструкция интроскопа и методика шахтных исследований трещинной пустотности пород, с использованием которых оценены проявления горного давления в выработке.

Ключевые слова: электроемкостной метод, интроскоп, горные породы, трещины, лабораторные исследования, шпур, выработка.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Исследование внутренней структуры массива горных пород и протекающих вокруг выработок геомеханических процессов с помощью геофизических методов играет огромную роль в вопросе устранения неопределенности при принятии решений по обеспечению надежности выработок [1, 2]. Подобные функции в различных отраслях реализуются с помощью систем контроля, разработка которых применительно к геомеханическим процессам не завершена. В связи с этим задача обоснования наиболее рационального метода контроля, исследования зависимости показаний интроскопа от влияющих факторов и усовершенствования приборно-методического обеспечения для оценки состояния массива горных пород до сих пор является актуальной для подземного строительства.

Анализ исследований и публикаций. Среди геофизических методов хорошо зарекомендовал себя метод электроемкостного каротажа шпуров, разработанный в ДонГТУ [3]. В основе

его лежит зависимость частоты тока, вырабатываемой измерительным автогенератором, от величины емкости конденсаторного датчика, которая, в свою очередь, определяется диэлектрической проницаемостью пород. При этом максимальное или минимальное значения показаний прибора в зависимости от типа заполнителя трещины соответствуют ее положению посередине датчика, а величина пика характеризует ее раскрытие. С помощью такого метода оценивается нарушенность пород вокруг выработки и устанавливаются проявления горного давления при текущем геомеханическом контроле [4].

Для обработки натурных измерений авторами метода предложена зависимость относительного раскрытия трещины от показаний интроскопа [5]:

$$P_n = \sum \delta / 2l_3 = (A_m - A_T) / (A_m - A_3), \quad (1)$$

где P_n – относительный показатель нарушенности породного массива;

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

$2l_3$ – эффективная длина датчика, мм;

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

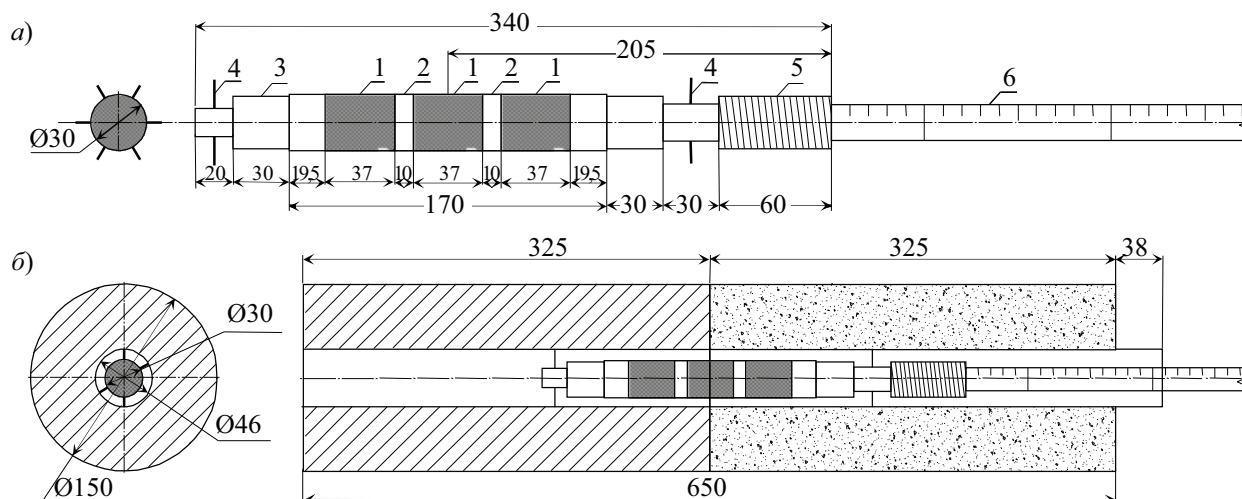
Как показали шахтные измерения [4], входящие в выражение (1) величины, зачастую, не являются постоянными. Более того, на показания прибора существенное влияние оказывают диаметр шпура, смещение оси зонда по отношению к оси шпура, образующееся в результате поперечных подвижек слоистых пород или деформации стабилизаторов положения зонда в шпуре, 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 и получения необходимой информации с минимальными затратами следует установить зависимость показаний прибора от основных влияющих факторов и на этой

основе усовершенствовать приборно-методическое обеспечение геомеханического контроля состояния породного массива вокруг горных выработок.

Постановка задач исследований. Задачами данной работы являются установление экспериментальных зависимостей, связывающих показания измерительного прибора (частоты сигнала) с тем или иным влияющим фактором, оценивание значимости влияющих факторов, получение зависимости частоты сигнала от совокупного действия значимых факторов с использованием планирования эксперимента, разработка новой конструкции интроскопа и методики измерений трещинной пустотности горных пород, а также ее реализация в шахтных условиях для оценивания устойчивости выработки, корректирования прогнозных математических моделей, адаптации параметров крепи и режимов ее работы к внешним условиям.

Методика исследований. Лабораторные измерения проводились для изучения влияния различных факторов, характерных для шпуровых элетромагнитных методов каротажа, а именно: оценивания статистической изменчивости показаний интроскопа в различных средах; регистрации показаний прибора вдоль шпура на границе контакта двух сред; изучения влияния диаметра шпура на показания интроскопа; исследования влияния параметров трещиноватости (раскрытия трещин, их числа, размеров межтрещинных целиков, ориентации трещин относительно оси шпура) на показания прибора; оценивания влияния на результаты измерений эксцентриситета положения датчика.

Исследования проводились с помощью электроемкостного преобразователя конструкция зонда которого изображена на рис. 1,а, с использованием лабораторного стенда, приведенного на рис. 1,б представляющего собой цилиндрический фрагмент массива, с размещенным по его оси шпуром (диаметром 36 мм; 41 мм и 46 мм), в который помещался зонд. Диаметр и длина моделей принималась такими, чтобы исключались граничные эффекты, а её размеры превышали две эффективные длины электроемкостного преобразователя. По середине шпура располагалась изучаемая неоднородность в виде контакта двух сред или



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

Рис. 1. Конструкция зонда (а) и схема станда (б) для исследования показаний интроскопа на контакте двух сред

одиной трещины (либо их системы). В качестве среды выбран 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 $\varepsilon_r = 8-12$, характерного для однородной поликристаллической горной породы. Измерения частоты сигнала A в моделях производились после полного высыхания материала, процесс которого контролировался путем взвешивания образцов.

Емкостный преобразователь, с помощью которого реализуется указанный способ, состоит из перемещаемого по оси шпура зонда и измерительного блока в виде цифрового частотомера с диапазоном измерения частоты от 1 до 9999 кГц. Зонд состоит из датчика, представляющего собой накладной электрический конденсатор, и измерительного автогенератора гармониче-

ских (синусоидальных) колебаний. Электроемкостной датчик в авторском варианте [3] изготовлен из трех металлических колец, расположенных соосно и включенных в колебательный контур автогенератора. Сигнал от зонда по кабелю поступает на частотомер, который показывает изменение частоты измерительного автогенератора в зависимости от изменения электрической емкости датчика прибора, которая, в свою очередь, зависит от диэлектрической проницаемости окружающей датчик среды.

В общем случае методика изучаемого метода включают в себя следующие действия:

а) выбор (воспроизведение) среды с определенной величиной диэлектрической проницаемости и влияющим фактором;

б) установление значения диэлектрической проницаемости среды с учетом ее неоднородности (пористости, трещиноватости, распределения влаги и прочих факторов);

в) установление величины емкости первичного преобразователя датчика с учетом влияния поверхности шпура, структуры и свойств породного массива в конкретном месте измерения;

г) установление емкости колебательного контура измерительного генератора датчика;

д) измерение частоты колебаний напряжения, вырабатываемой измерительным генератором;

е) передачу сигнала по каналу связи;

ж) измерение частоты сигнала;

з) фиксацию результатов измерения (на бумаге, магнитных или иных средствах хранения информации);

и) перемещение датчика по длине шпура в новую точку замера, фиксация положения датчика и повторение предыдущих пунктов (в – з);

к) статистическую обработку данных по длине шпура или в месте расположения неоднородности;

л) расчет показателей, характеризующих ту или иную неоднородность, и получение необходимых результатов.

Анализ перечисленных измерительных этапов позволяет отметить, что пункты от в до з представляют собой получение первичной информации о емкости конденсатора и перевод ее в

частоту сигнала измерительного прибора. Зависимость изменения частоты напряжения измерительного генератора от диэлектрической проницаемости породного массива или модельной среды можно получить путем тарировки интроскопа в среде с известными свойствами. При этом для характеристики неоднородности (трещиноватости) пород следует использовать относительные показатели (аналоги коэффициента трещинной пустотности пород), что позволит ограничиться при расчете информационного показателя показаниями измерительного прибора и даст возможность не переходить к абсолютным значениям физического параметра (диэлектрической проницаемости). Поэтому цель лабораторных исследований заключается в нахождении экспериментальных зависимостей, связывающих показания измерительного прибора интроскопа (частоты сигнала) с тем или иным влияющим фактором, установлении значимости влияющих факторов и получении с использованием планирования эксперимента зависимости частоты сигнала от совокупного действия значимых факторов.

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 электроемкостного 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 два раза, а отчеты снимали при движении зонда в прямом и обратном направлениях, что позволило получить в каждой точке модели по четыре показания. В каждой серии замеров снимали заключительный отсчет 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.

Показания интроскопа в различных средах. На первом этапе исследования состояли в изучении величины показаний прибора, размещенном в различных средах. В качестве сред при тарировке интроскопа выбраны: воздух, для которого диэлектрическая проницаемость известна и равна $\epsilon_r=1$; сухой кварцевый песок ($\epsilon_r = 4,69 - 5,06$); щебень из дробленой породы; модельный материал выбранного состава.

На воздухе и в сыпучей среде шпур имитировался бумажным цилиндром различного диаметра, который располагался по оси цилиндрической модели, заполненной материалом исследуемой среды.

Сопоставление показаний прибора в различных средах представлено на рис. 2.

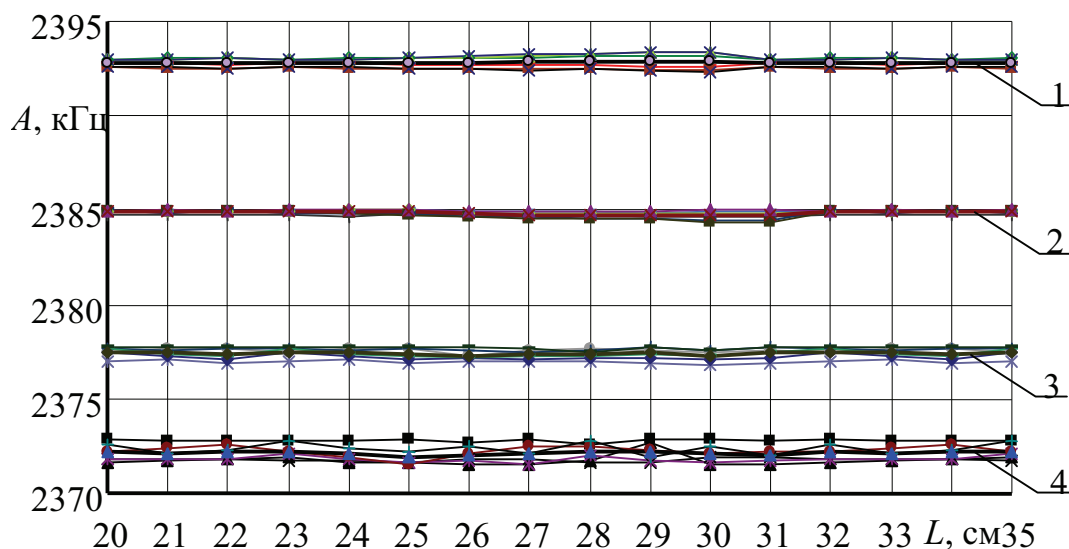


Рис 2. Показания прибора на воздухе (1), в песке (2), в дробленой породе (3) и в модельном материале (4)

Наибольшие показания прибора соответствуют воздуху, имеющему минимальную диэлектрическую проницаемость, а наименьшие – модельному материалу, у которого диэлектрическая проницаемость максимальна и соответствует ненарушенному однородному породному массиву.

Влияние диаметра шпура на показания интроскопа. Влияние диаметра шпура на показания интроскопа исследовалось на моделях однородного породного массива. Шпуры в моделях

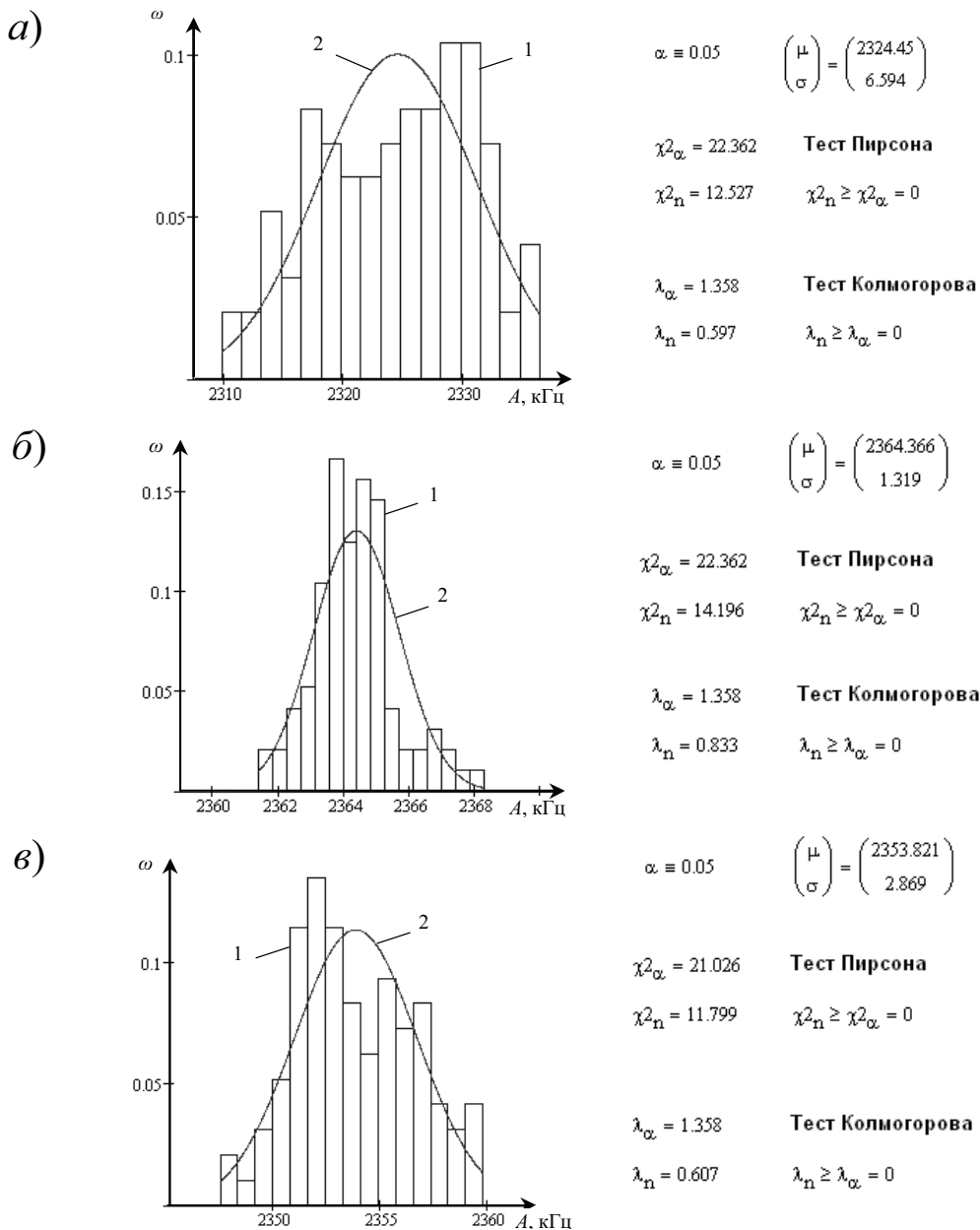
выбуривали с помощью специальных коронок диаметром 36 мм, 41 мм и 46 мм, что позволило охватить весь диапазон изменения диаметра шпура в шахтных условиях.

Данные измерений для различных диаметров шпуров представлены на рис. 3 в виде гистограмм распределения частоты сигнала A , а результаты статистической обработки данных замеров – на рис. 3 в виде теоретического закона распределения случайной величины сигнала и на рис. 4 в форме эмпирической зависимости частоты сигнала от диаметра шпура $d_{ш}$.

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. Такой вывод обусловлен тем, что разброс показаний интроскопа в различных средах, размещенных вокруг бумажного цилиндра постоянного диаметра, имеет приблизительно одно и то же значение.

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 интроскопа (среднее квадратичное отклонение σ) возрастает с уменьшением диаметра шпура $d_{ш}$, так как в этом случае прогибы проволок достигают максимальной величины. Математическое ожидание μ частоты сигнала с ростом диаметра шпура увеличивается в связи с ростом кольцевого воздушного зазора между поверхностями шпура и зонда. Проверка выборок (рис. 3) с помощью тестов Пирсона и Колмогорова показала, что случайная величина частоты сигнала A при уровне значимости $\alpha = 0,05$ хорошо описывается нормальным законом распределения.

С ростом диаметра шпура частота сигнала A увеличивается по нелинейной зависимости (рис. 4). Обработка данных замеров методом наименьших квадратов показала, что практически с одинаковой теснотой связи частота сигнала A от диаметра шпура описывается квадратичной ($corr = 0,969$) и экспоненциальной ($corr = 0,966$) функциями:



1 – экспериментальная гистограмма;
 2 – теоретический закон распределения

Рис. 3. Распределение показаний интроскопа при различных диаметрах шпура: а) $d_{ш} = 36$ мм; б) $d_{ш} = 41$ мм; в) $d_{ш} = 46$ мм

$$A = 2385 - \frac{24520}{d_{ш}^2 - 891}, \tag{2}$$

$$A = 2385 - 4431 \cdot \exp(-0,119d_{ш}), \tag{3}$$

где $d_{ш}$ – диаметр шпура.

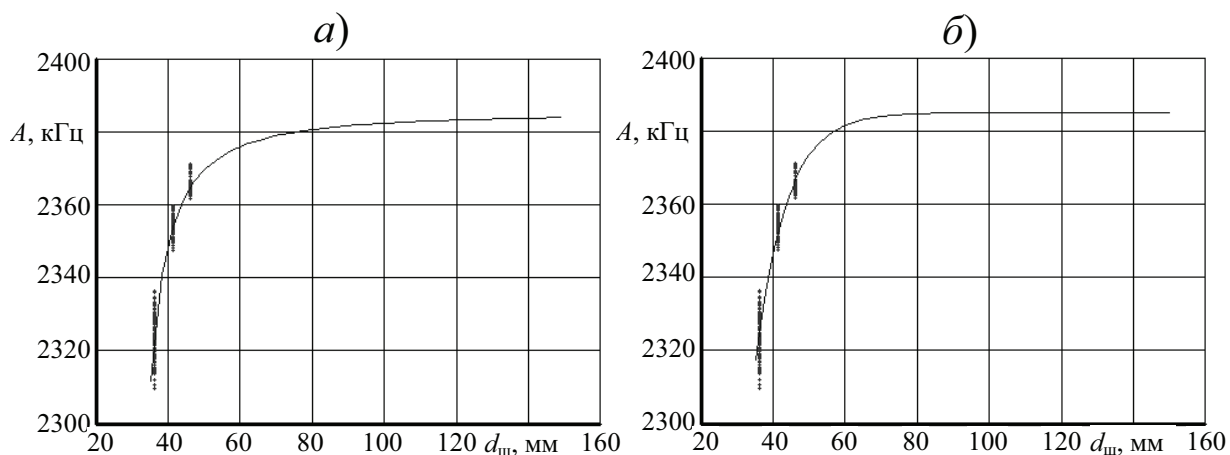


Рис. 4. Квадратичная (а) и экспоненциальная (б) зависимости частоты сигнала A от диаметра шпура $d_{ш}$

Обе зависимости асимптотически стремятся к показанию прибора на воздухе $A_{в} = 2385$ кГц, так как с ростом диаметра шпура увеличивается кольцевой воздушный зазор между зондом и поверхностью шпура. 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 относительного диаметра шпура $d_{ш} / d_з$ ($d_з$ – диаметр зонда) в песке и дробленой породе (рис. 5), причем с ростом пустотности среды нелинейность становится менее выраженной.

Влияние зазора между датчиком и стенкам шпура на показания интроскопа наглядно демонстрируется на рис. 6. Из анализа рисунка следует, что ростом зазора чувствительность интроскопа снижается, так как при этом разность показаний прибора в массиве и на воздухе (по модулю) уменьшается. Истинное показание прибора в массиве $A_{м}$ соответствует случаю, когда зазор между зондом и стенкой шпура будет равен нулю, т.е. при $d_{ш} = d_з$, а предельное показание, равное показанию прибора на воздухе, достигается, когда диаметр шпура многократно превышает размер электрического поля вокруг датчика.

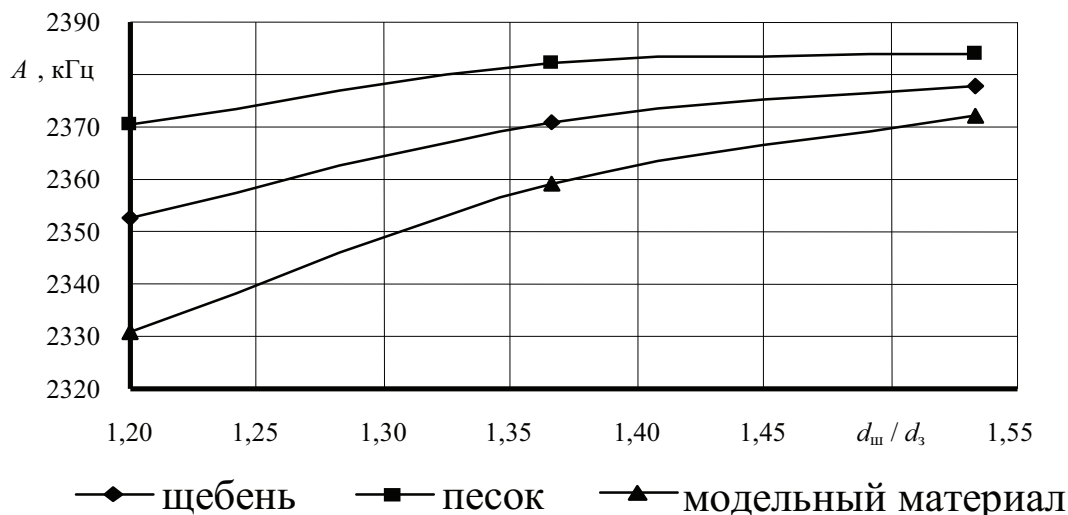
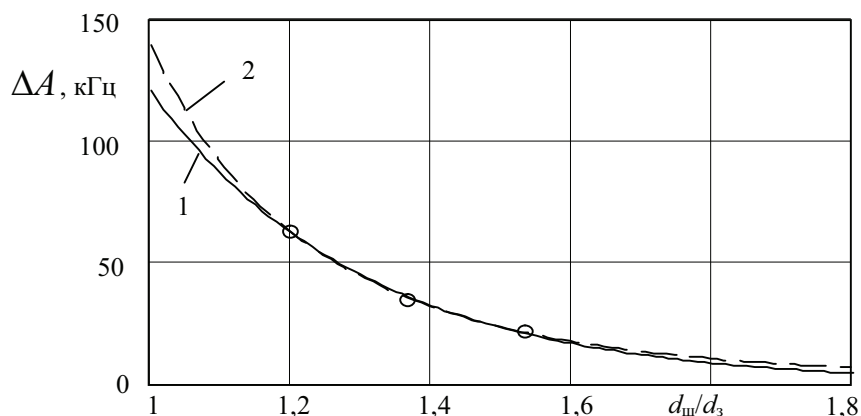


Рис. 5. Зависимости показаний интроскопа от относительного диаметра шпура $d_{\text{ш}}/d_3$ для различных материалов

Приведенные на рис. 6 зависимости хорошо аппроксимируются экспоненциальной ($corr = 0,999$) и степенной ($corr = 1$) за-



1 – экспоненциальная зависимость; 2 – степенная зависимость

Рис. 6. Влияние зазора между шпуром и зондом на разность показаний ΔA интроскопа в модельном материале и на воздухе

висимостями, полученными методом наименьших квадратов:

$$\Delta A = 3273,9 \cdot \exp(-2,807 \cdot [d_{\text{ш}} / d_3]); \quad (4)$$

$$\Delta A = 139,7 (d_{\text{ш}} / d_3)^{-4,4}. \quad (5)$$

где ΔA – разность показаний прибора в массиве и на воздухе.

В этой связи следует отметить, что устранить неопределенность в получении показания прибора на ненарушенных участках массива A_m можно за счет определения показания прибора с использованием зависимостей (4) и (5) при $d_{ш} = d_3$.

На основании проведенных исследований можно попутно заметить, что увеличить чувствительность датчика ΔA и снизить разброс показаний можно путем измерения прижатым к среде зондом, т.е. при минимальной величине зазора, хотя бы с одной стороны зонда.

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 плоскости напластования в слоистом породном массиве, границе задела 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, дробленой породой. Шпур в емкости также имитировался тонкой бумажной трубкой.

Методика измерений в этом случае заключалась в следующем. После снятия начального отсчета на воздухе, датчик размещали в одной из сред таким образом, чтобы электрическое поле емкостного преобразователя не выходило за пределы модели, т.е. датчик полностью находился в этой среде. Далее зонд перемещали с интервалом 1 см в направлении другой среды и фиксировали отчеты до тех пор, пока он не выходил за пределы модели с другой стороны. После этого замеры повторяли в ином направлении, а в конце замеров снимали заключительный отчет на воздухе. Результаты измерений представлены на рис. 7.

Анализ графических 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

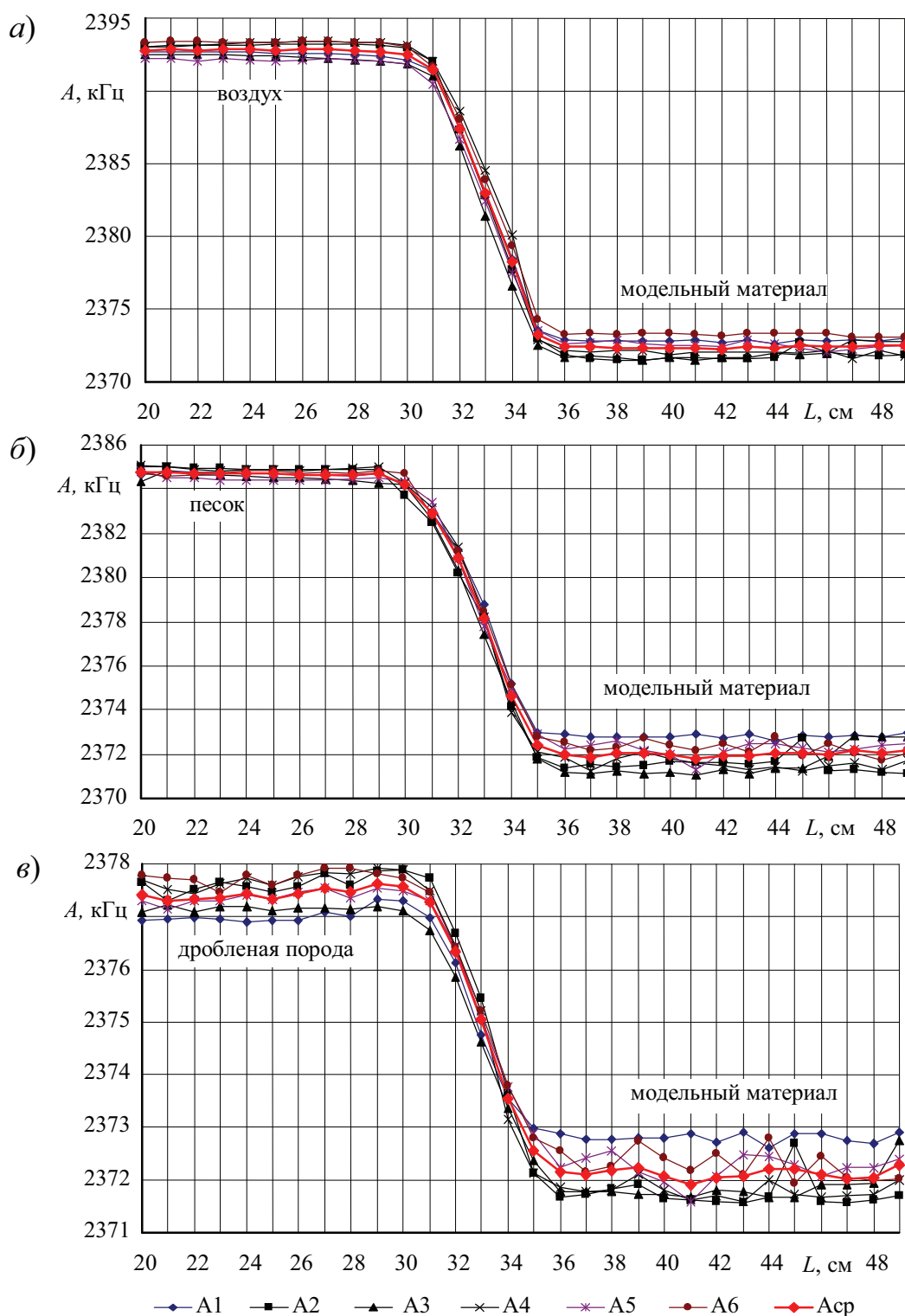
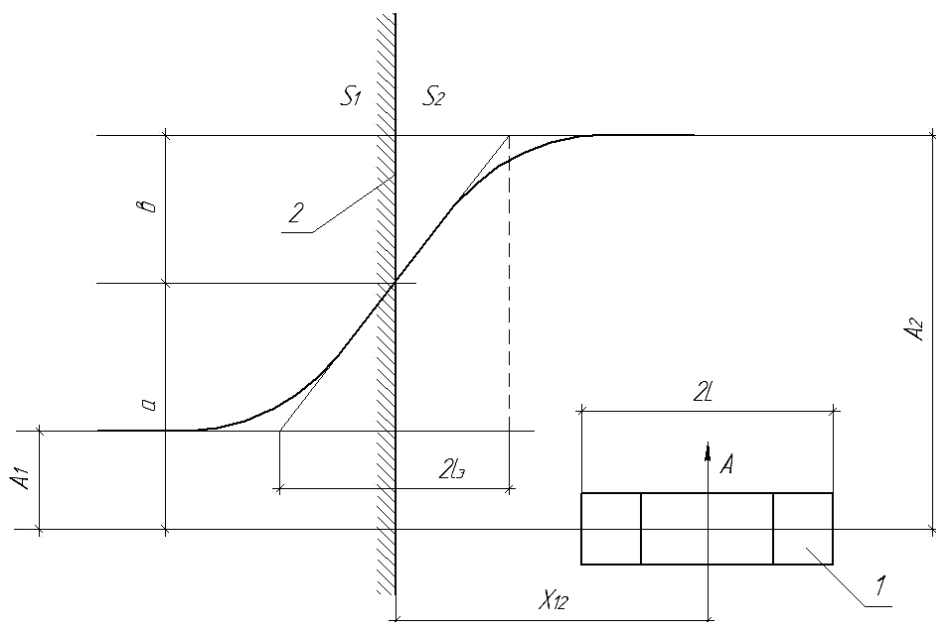


Рис. 7. Графики изменения показаний интроскопа при переходе датчика из модельного материала на воздух (а), в песок (б) и в дробленую породу (в) в шпуре диаметром 41 мм

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 [5], расстояние между асимптотами которого равно разности показаний прибора в контактируемых средах.

В этом случае расчетная схема для определения показаний интроскопа на контакте двух сред имеет вид, представленный на рис. 8. Пусть датчик перемещается из среды S_1 в среду S_2 , причем расстояние по нормали от контакта сред до датчика равно x_{12} . Начало координат разместим в центре датчика, а длину электроемкостного преобразователя обозначим через $2L$. Тогда показания интроскопа A_{12} при переходе контакта можно описать зависимостью [5]:



1 – электроемкостный преобразователь; 2 – контакт сред S_1 и S_2

Рис. 8. Расчетная схема к определению показаний интроскопа на контакте двух сред

$$A_{12} = a_{12} + b_{12} \cdot th(\alpha_{12} \cdot x_{12}), \quad (6)$$

где a_{12} – показания интроскопа, когда центр датчика совпадает с плоскостью контакта сред:

$$a_{12} = (A_1 + A_2) / 2; \quad (7)$$

b_{12} – полуразность показаний интроскопа в двух средах, равная

$$b_{12} = (A_1 - A_2) / 2; \quad (8)$$

A_1 и A_2 – показания интроскопа соответственно в средах S_1 и S_2 вне зоны влияния контакта;

α_{12} – модуль чувствительности интроскопа:

$$\alpha_{12} = \frac{1}{b} \cdot \frac{\partial A_{12}}{\partial X_{12}} \Big|_{x_{12}=0} = \frac{2}{(A_2 - A_1)} \frac{(A_2 - A_1)}{2l_3} = \frac{1}{l_3}, \quad (9)$$

где l_3 – половина длины эффективной зоны чувствительности датчика интроскопа.

Из выражений (6 – 9) следует, что при переходе датчика из среды S_2 в среду S_1 справедливы следующие соотношения:

$$a_{12} = a_{21}; \quad b_{12} = b_{21}; \quad \alpha_{12} = \alpha_{21}, \quad (10)$$

а формула для вычисления показаний интроскопа A_{21} запишется в виде:

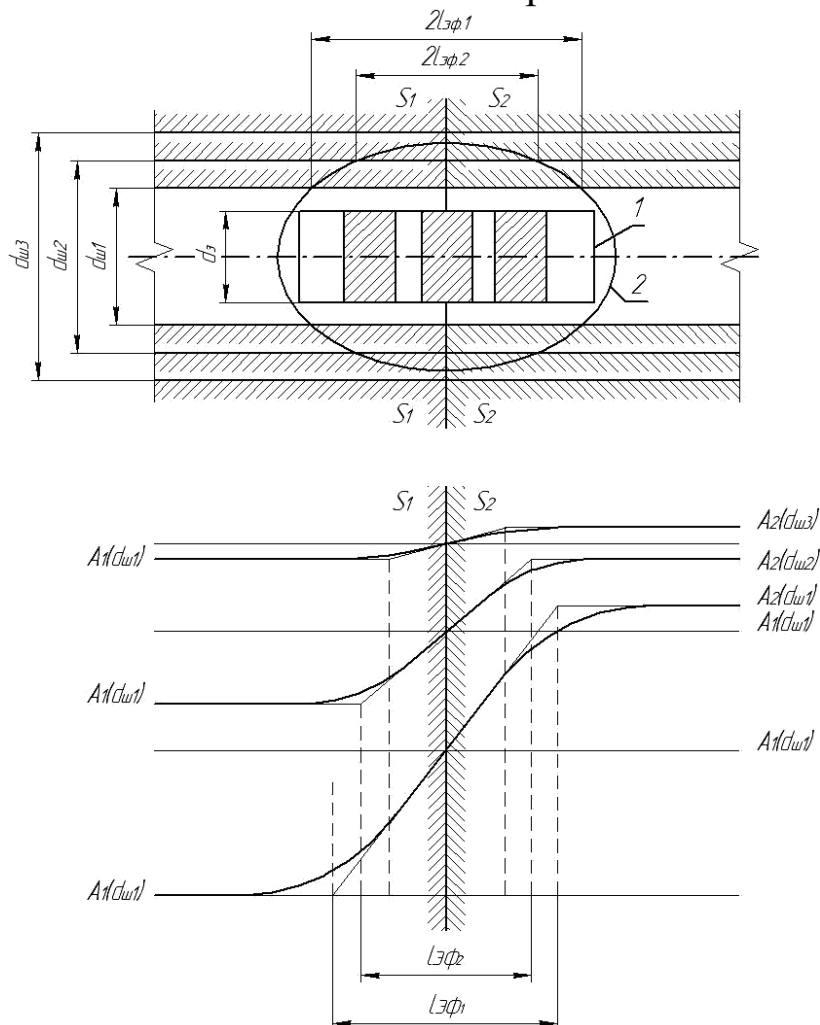
$$A_{21} = a_{12} - b_{12} \operatorname{th}(\alpha_{12} \cdot x_{12}). \quad (11)$$

Необходимо заметить, что приведенные зависимости справедливы, если показания интроскопа линейно зависят от физических свойств среды (диэлектрической проницаемости).

Из рис. 8 авторы метода формулируют геометрический смысл эффективной полудлины l_3 , которая является проекцией на ось x касательной, проведенной в точке перегиба кривой показаний интроскопа, т.е. является протяженностью зоны чувствительности электроемкостного преобразователя. При этом длина датчика $2L$ не обязательно совпадает с эффективной длиной $2l_3$. По мнению авторов работы [5] параметр l_3 полностью предопределяется конструктивными размерами датчика и является константой для данного прибора, подлежащей определению в ходе его тарировки.

Однако расчетная схема, приведенная на рис. 8, не учитывает то, что зонд интроскопа в породном массиве может быть размещен только в шпуре, размеры которого переменны $d_{\text{ш}} = \text{var}$ и, как показали исследования, существенно влияют на показания прибора при $d_3 = \text{const}$, а электрическое поле датчика распространяется в ограниченном пространстве, представленном, в первую очередь, полостью шпура, а затем уже контактирующими средами (см. рис. 9). Поэтому протяженность зоны чувствительности электроемкостного преобразователя также определяется пересечением

поля датчика с поверхностью шпура. Если кольцевой зазор между зондом и стенками шпура остается постоянным, т.е. $d_{\text{ш}} / d_3 = \text{const}$, то, независимо от диэлектрической проницаемости сред, величина эффективной длины $2l_e$ 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.



1 – электроемкостный преобразователь; 2 – поле интроскопа

Рис. 9. Расчетная схема к определению показаний интроскопа на контакте двух сред с учетом диаметра шпура

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, при постоянстве диэлектрических свойств контакти-

руемых сред, абсолютная частота сигнала A увеличивается, при этом эффективная длина датчика с ростом диаметра шпура и разность показаний интроскопа в двух средах уменьшаются.

Данные теоретические положения подтверждаются экспериментальными зависимостями, представленными на рис. 10 и рис. 11, где на рисунке 10 графически демонстрируется практическое постоянство эффективной длины датчика в различных средах при $d_{\text{ш}} / d_3 = \text{const}$, и приведены ее значения для различных диаметров шпуров, а на рисунке 11 дана нелинейная зависимость половины эффективной длины от относительных размеров шпура, которая с теснотой связи $\text{corr} = 0,994$ аппроксимируется экспонентой

$$l_3 = 1377,4 \cdot \exp(-2,807 \cdot [d_{\text{ш}} / d_3]), \quad (12)$$

и с теснотой связи $\text{corr} = 0,997$ степенной зависимостью вида

$$l_3 = 94,45 \cdot (d_{\text{ш}} / d_3)^{-3,753} \quad (13)$$

Следует заметить, что при $d_{\text{ш}} = d_3$ для зависимости (12) $2l_3 = 166,4$ мм, а для зависимости (13) – $2l_3 = 189$ мм, что превышает конструктивную длину датчика $2L = 3 \cdot 37 + 2 \cdot 10 = 131$ мм (рис. 1) в 1,3-1,44 раза.

Учитывая сказанное, зависимость для расчета показаний интроскопа на границе раздела двух сред должна быть уточнена путем умножения каждого из членов в выражении (11), зависящих от величины диаметра шпура, на нелинейную функцию, учитывающую влияние зазора на показания прибора. Однако строгое теоретическое определение вида функции наталкивается на серьезные математические трудности в виду неограниченности пространственного распределения электромагнитного поля датчика и его зависимости от диэлектрической проницаемости среды.

Влияние трещин на показания интроскопа. Для исследования влияния трещинной пустотности на показания интроскопа использованы также цилиндрические модели, изготовленные из модельного материала на основе измельченных горелых пород с диаметром шпура $d_{\text{ш}} = 36$ мм и $d_{\text{ш}} = 46$ мм. Трещины выполняли путем разрезания модели пилой перпендикулярно к оси шпура на отдельные части различного размера. Трещиноватый породный

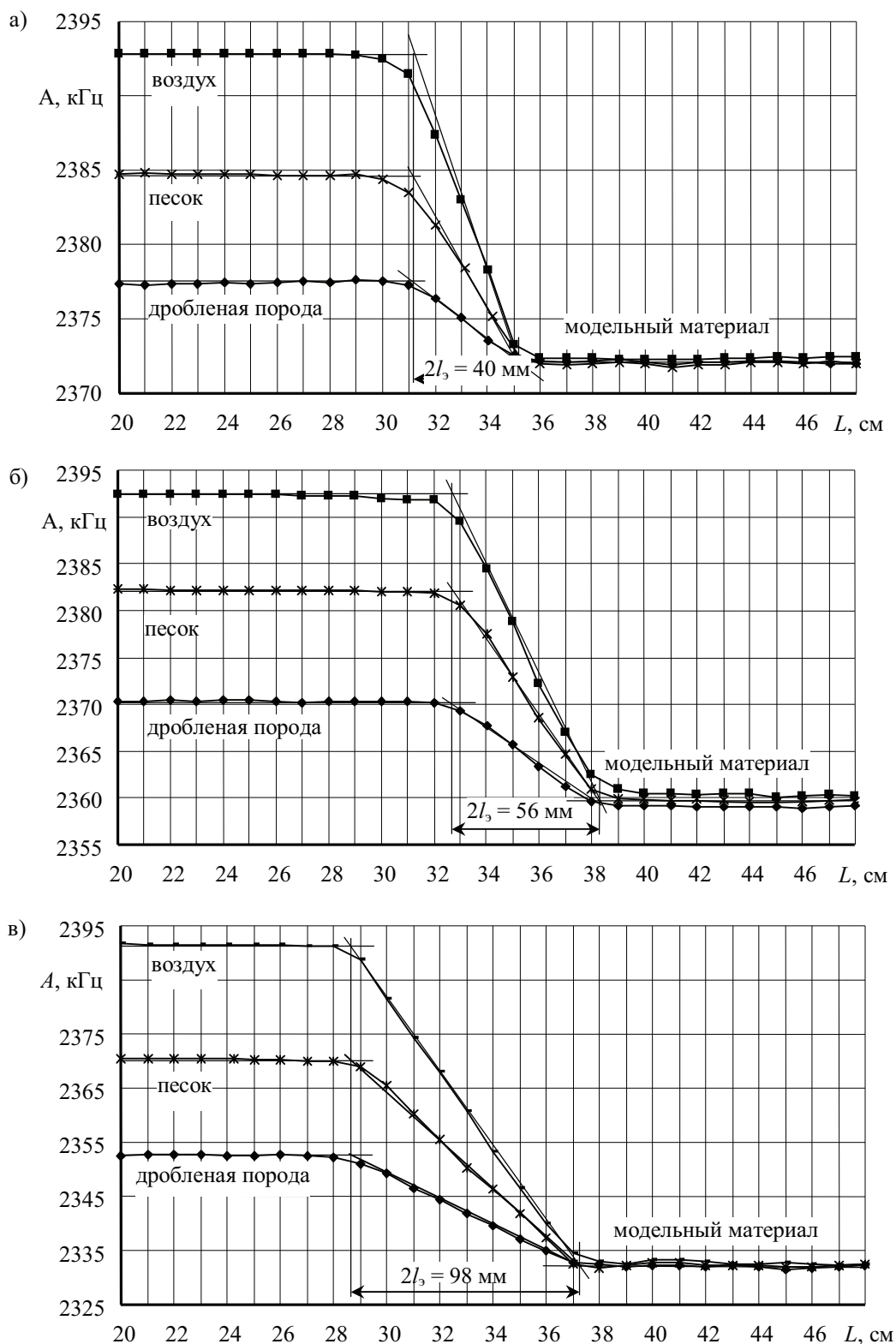
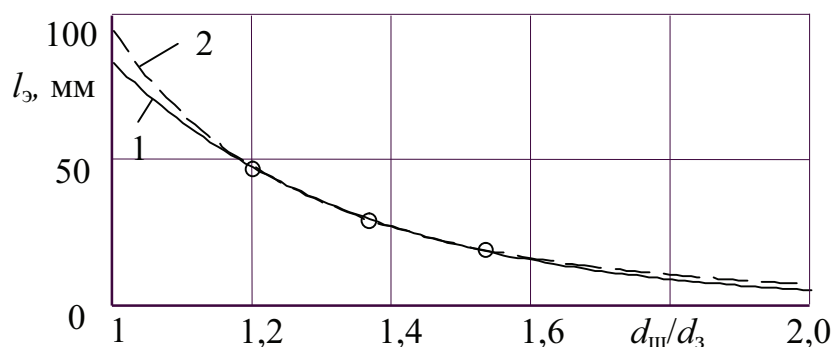


Рис. 10. Определение эффективной длины датчика по результатам тарировки интроскопа в различных средах при диаметрах шпура $d_{\text{ш}} = 46 \text{ мм}$ (а), $d_{\text{ш}} = 41 \text{ мм}$ (б), $d_{\text{ш}} = 36 \text{ мм}$ (в)



1 – експонента; 2 – степенная зависимость

Рис. 11. Зависимость эффективной длины датчика от зазора между зондом и шпуром

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, при этом методика измерений состояла в следующем. После снятия начального отсчета на воздухе, на стенде фиксировалось требуемое раскрытие трещины, которое 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. Затем зонд помещали в шпур и в зоне влияния трещины, на участке длиной 15-30 см, снимали показания прибора, перемещая зонд через 1 см. При этом измерения повторяли 2 раза, а отсчеты снимали при движении зонда в прямом и обратном направлениях, что позволяло иметь в каждой точке четыре показания. В конце замеров каждой серии (одного раскрытия трещины) снимали заключительный отсчет на воздухе.

При вариации показаний прибора на воздухе (из-за изменения влажности) результаты измерений корректировались путем введения поправочного коэффициента. Так как за счет раскрытия трещины длина шпура постоянно увеличивалась, а месторасположение датчика фиксировалось по шкале отсчетного устройства относительно края модели, то для каждой серии замеров вводилась линейная поправка на раскрытие трещины, что позволило совместить середины всех трещин на одной линии, которая находилась между 22 и 23 см измерительного участка. Эксперимен-

тальные зависимости для средних показаний интроскопа даны на рис. 12. Для устранения вторичных эффектов графики построены в координатах ΔA и x , где ΔA – 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 средних показаний интроскопа вблизи одиночной трещины представляют собой куполообразные кривые, являющиеся результатом наложения зависимостей для двух смежных поверхностей раздела одной и той же трещины. Поэтому максимальная частота сигнала прибора приурочена к середине трещины, причем по мере роста ее раскрытия увеличиваются как ширина зоны влияния трещины, так и амплитуда возмущения. При такой базе измерения для модели с диаметром шпура $d_{\text{ш}} = 36$ мм минимальное раскрытие трещины, оказывающее влияние на показания интроскопа, составляет $\delta = 3$ мм, а при $d_{\text{ш}} = 46$ мм – $\delta = 6$ мм. 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.

Отмеченные закономерности наглядно демонстрируются на совмещенном графике прироста показаний интроскопа по длине шпура для одного и того же раскрытия трещины ($\delta = 20$ мм и $\delta = 60$ мм) при различных диаметрах шпура ($d_{\text{ш}} = 36$ мм и $d_{\text{ш}} = 46$ мм) (рис. 13). Анализ рисунка позволяет отметить, что эти факторы являются взаимовлияющими, 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 по середине трещины и ширина зоны ее влияния увеличиваются, что предполагает рост частоты сигнала в заполнителе трещины, тогда как в выражении [5]

$$\delta/l_0 = A_1 - A_T / A_1 - A_2, \quad (14)$$

где A_T – показания прибора, когда датчик установлен по центру трещины;

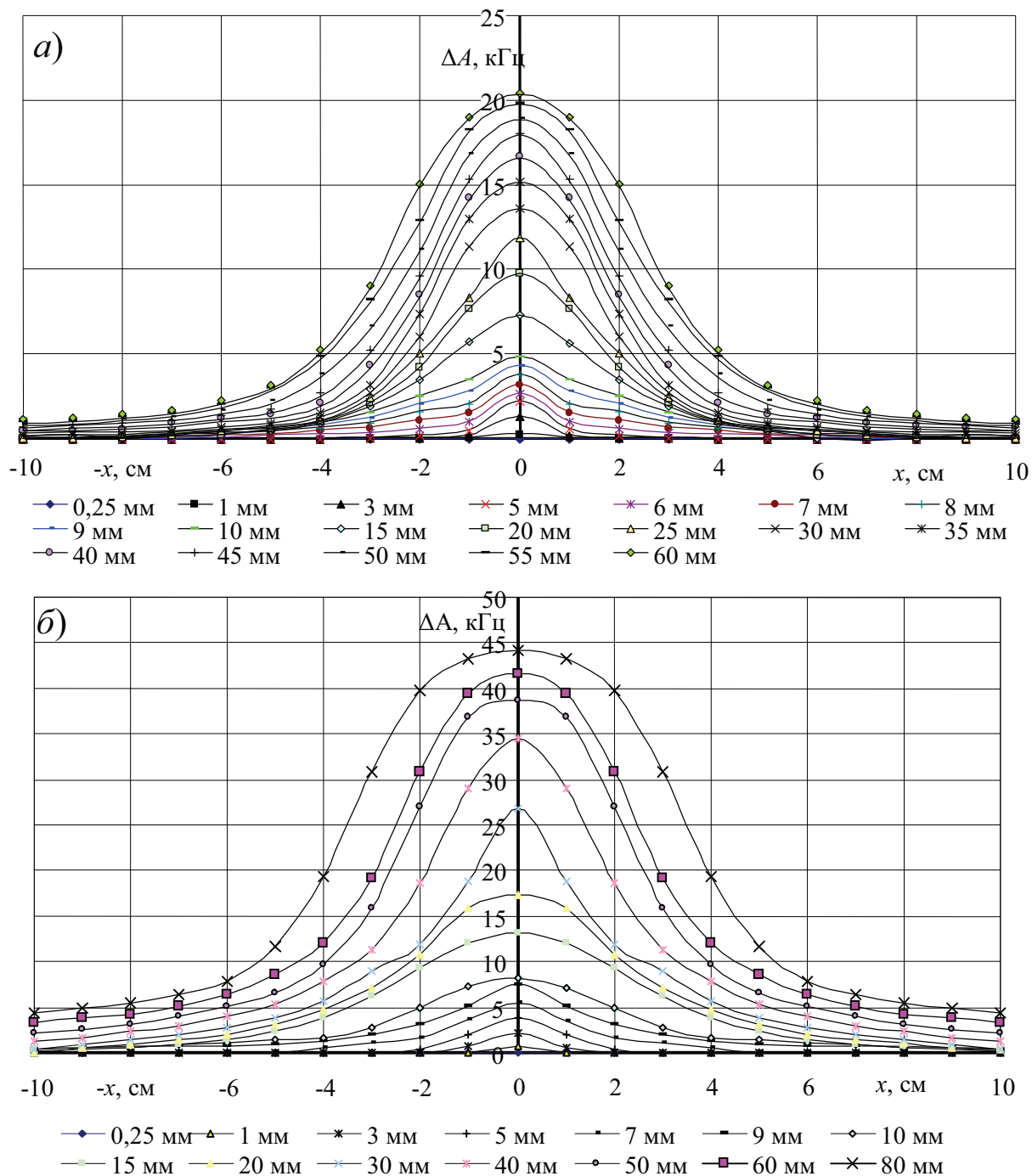


Рис. 12. Графики изменения средних приращений показаний интроскопа в зоне влияния одиночной трещины ΔA для шпура диаметром $d_{ш} = 46$ мм (а) и $d_{ш} = 36$ мм (б)

A_1 и A_2 – соответственно показания прибора, когда датчик находится в массиве вне зоны влияния трещины или в трещине бесконечного раскрытия. Значение частоты A_2 принимается авторами метода [3] постоянным и равным показанию прибора на воздухе A_B .

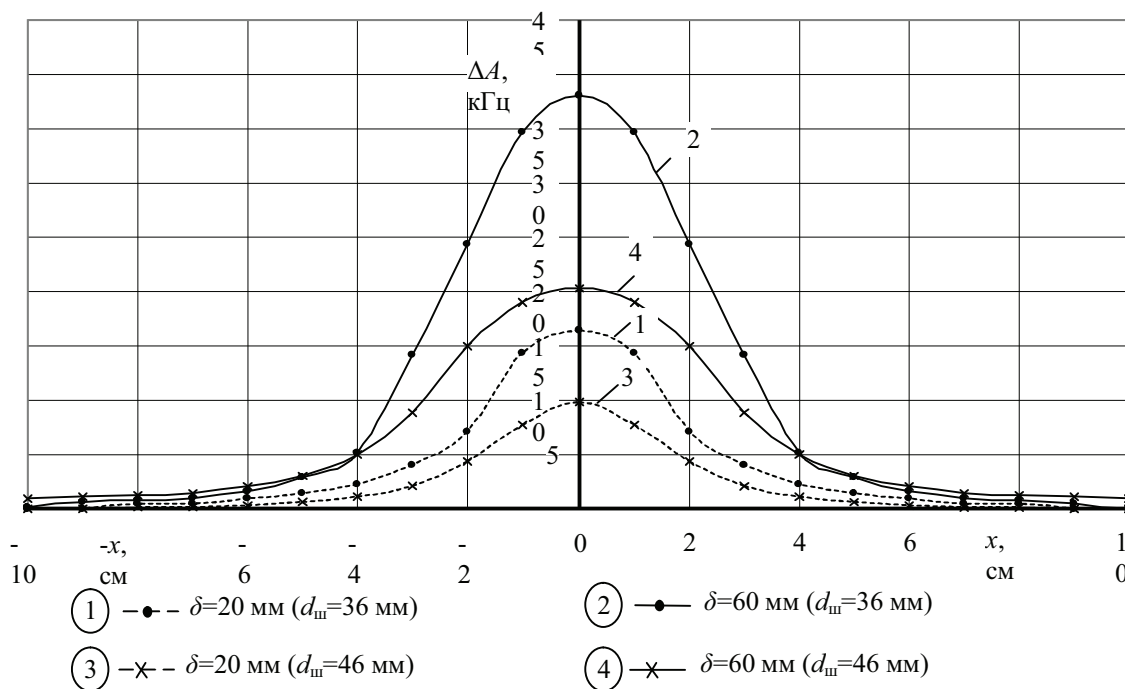


Рис. 13. Зависимость прироста показаний интроскопа по длине шпура для одного и того же раскрытия трещины при различных диаметрах шпура

Сказанное иллюстрируется на графике (рис. 14), построенном в безразмерных координатах $\tilde{A} = (A_T - A_1) / (A_B - A_1)$ и δ / l_3 . Из рис. 14 следует, что относительные показания интроскопа, независимо от диаметра шпура, нелинейно зависят от раскрытия трещины и с теоретическим корреляционным отношением $\text{corr} = 0,989$ могут быть представлены экспонентой вида

$$\tilde{A} = 1 - \exp(-0,705 \delta / l_3). \quad (15)$$

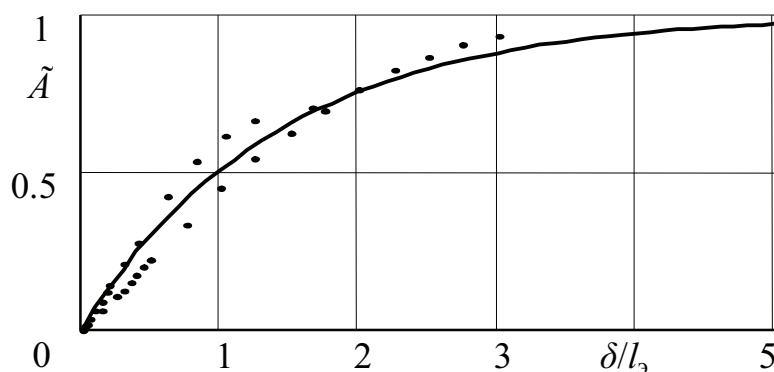


Рис. 14. Зависимость относительных показаний интроскопа \tilde{A} от относительной ширины трещины δ / l_3 при установке датчика по ее середине

Отметим, что вплоть до значений $\delta/l_0 \leq 1$ наблюдается линейная зависимость показаний интроскопа от относительного раскрытия трещины. Это существенно упрощает расшифровку данных шахтных наблюдений, и дало основание авторам метода рекомендовать к применению линейную зависимость (14) между относительным раскрытием трещины и показателем неоднородности массива \tilde{A} . Исследование ошибки линеаризации показало, что при $\tilde{A} < 5$ величина ошибки не превышает $\varepsilon < 5\%$.

Изучив закономерности изменения показаний датчика интроскопа в зоне влияния одиночной трещины, перейдем к рассмотрению более сложного случая, когда в зоне чувствительности датчика находятся две параллельные трещины, разделенные целиком постоянной толщины $S = 1$ см и имеющие одинаковое раскрытие δ , которое в ходе опыта изменялось от 0,25 мм до 80 мм. Графики изменения средних приращений показаний интроскопа для этого случая в шпуре диаметром 46 мм приведены на рис. 15. Вначале, когда трещины имеют небольшое раскрытие, датчик реагирует на них как на одну трещину. Однако при дальнейшем увеличении суммарного раскрытия трещин наблюдается изменение формы графической 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 $\Sigma\delta = 30$ мм. Теперь рассмотрим другой случай, когда между двумя трещинами с суммарным раскрытием $\Sigma\delta = 10 + 10 = 20$ мм имеется целик переменной толщины S . На рис. 16 представлены графики распределения средних приращений показаний интроскопа в окрестности двух трещин с раскрытием $\delta = 10$ мм, разделенных целичками шириной 0, 10, 20, 30 и 50 мм. График для $S = 0$ 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 ΔA для одиночной трещины. Следовательно, постулируемый в работе [5] принцип аддитивно-

сти показаний интроскопа при расположении любого числа трещин произвольного раскрытия в пределах $\Sigma\delta < l_3$ при измерениях датчиком данного типа не подтверждается экспериментально.

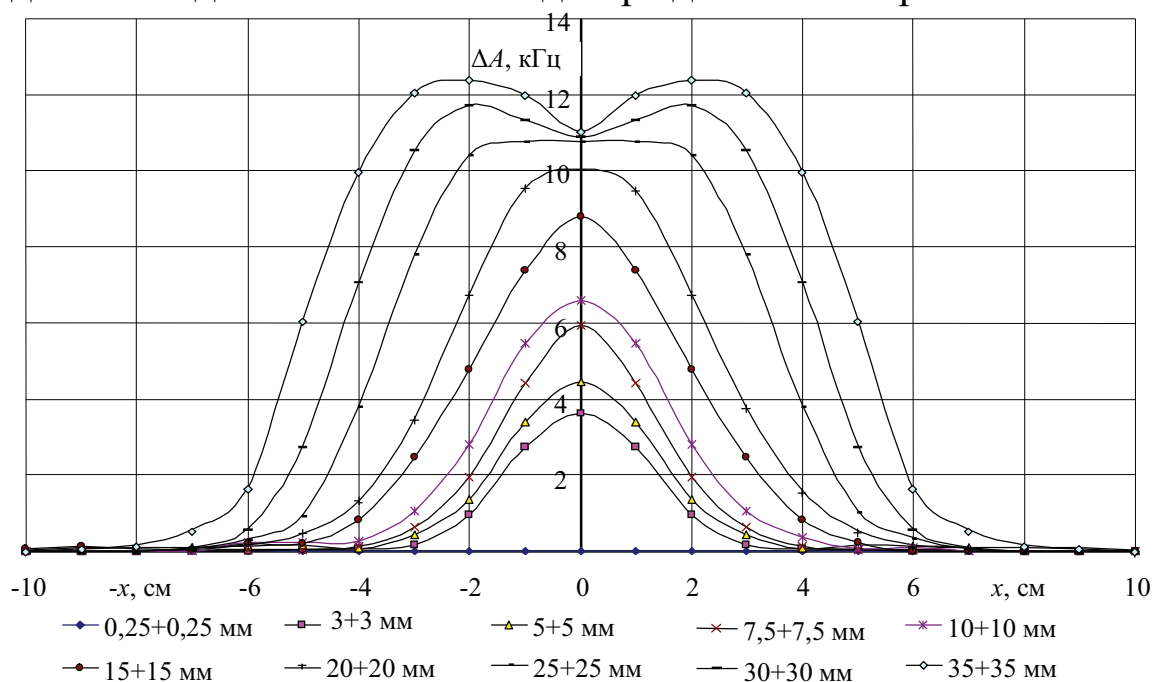


Рис. 15. Графики распределения средних приращений показаний интроскопа в зоне влияния двух трещин различного раскрытия при постоянной величине целика $S = 1$ см для шпура диаметром $d_{ш} = 46$ мм

При дальнейшем росте ширины целика S между трещинами, т.е. увеличении расстояния между ними, 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 $(S + \delta)/l_3 > 2$.

Зависимость приращений интроскопа, когда датчик находится посередине целика между двумя трещинами с раскрытием $\delta = 10$ мм, представлена на рис. 17. Зависимость нелинейная, при $S = 0$ прирост показаний интроскопа соответствует одиночной трещине, а с увеличением S прирост показаний асимптотически стремится к нулю ($\Delta A \rightarrow 0$). Однако в диапазоне от 0 до $S/l_3 = 1$ зависимость близка к линейной.

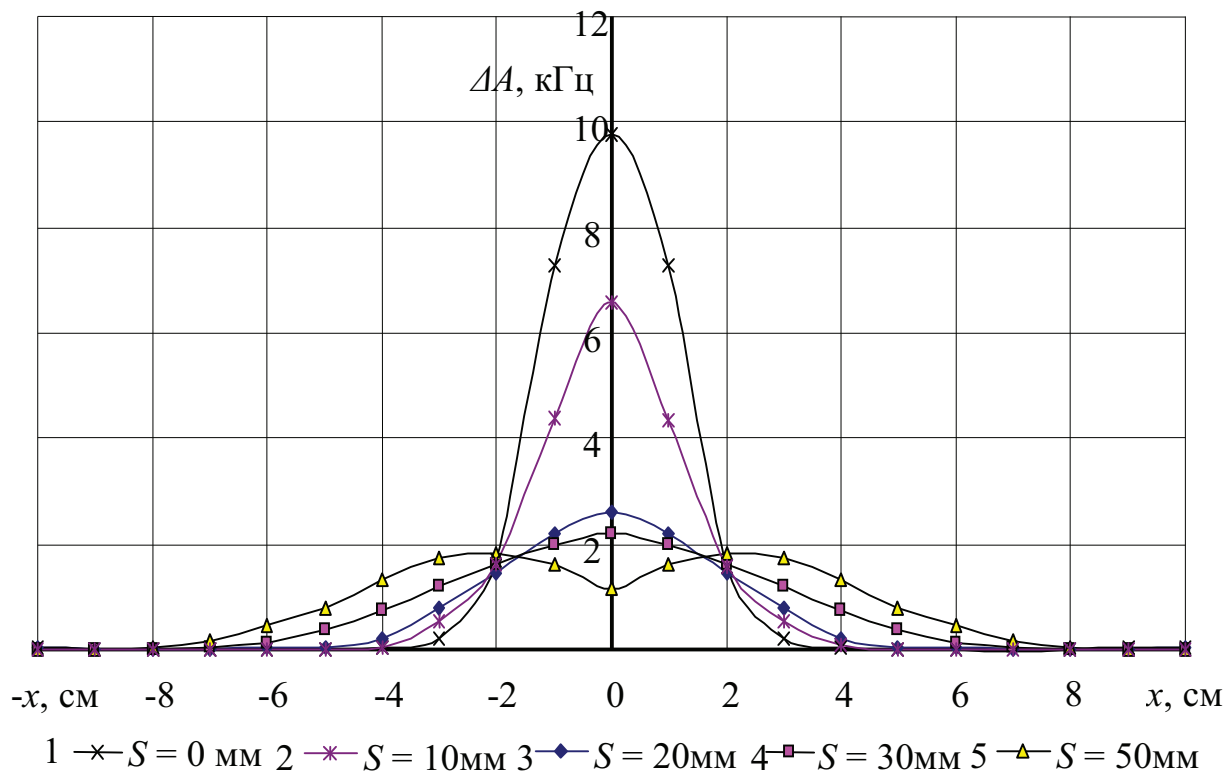


Рис. 16. Графики распределения приращений показаний интроскопа в окрестности двух трещин одинакового раскрытия $\delta = 10$ мм, разделенных целиком переменной ширины S , для шпура диаметром $d_{ш} = 46$ мм

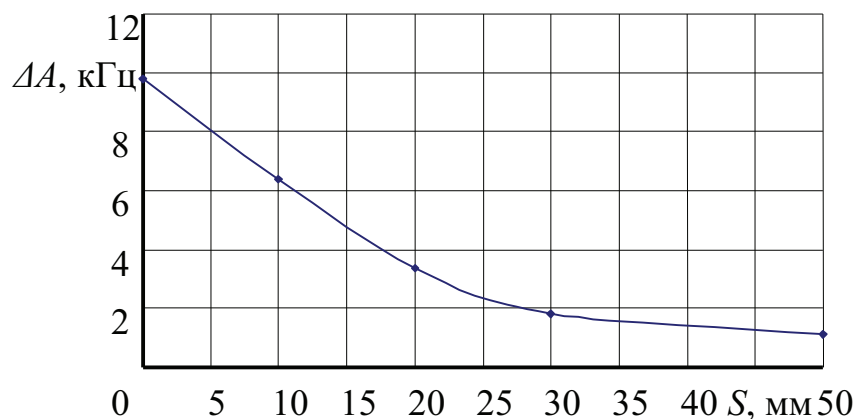


Рис. 17. Изменение приращений показаний интроскопа в зависимости от ширины целика S

Влияние эксцентриситета положения датчика на результаты измерений. При измерениях в реальных условиях одним из основных факторов, влияющих на показания интроскопа, является уступ на поверхности шпура, образующийся в результате пе-

ремещения 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 на показания прибора такая ситуация моделировалась на стенде (рис. 18), а на котором были проведены следующие опыты. Датчик интроскопа вначале располагали в неискривленном шпуре диаметром 46 мм и 36 мм с кольцевым зазором соответственно 8 мм и 3 мм, т.е. без эксцентриситета ($e = 0$), и проводили измерения по длине шпура при различном раскрытии трещины δ . Затем создавали фиксированный уступ между двумя частями модели, т.е. смещали оси отдельных частей шпура относительно оси зонда на величину эксцентриситета e , причем, так как досылочное устройство с корпусом датчика соединяется жестко, эксцентриситеты на отдельных частях модели оказывались в противоположных направлениях. 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 $d_{III} = 46$ мм эксцентриситету задавали два значения:

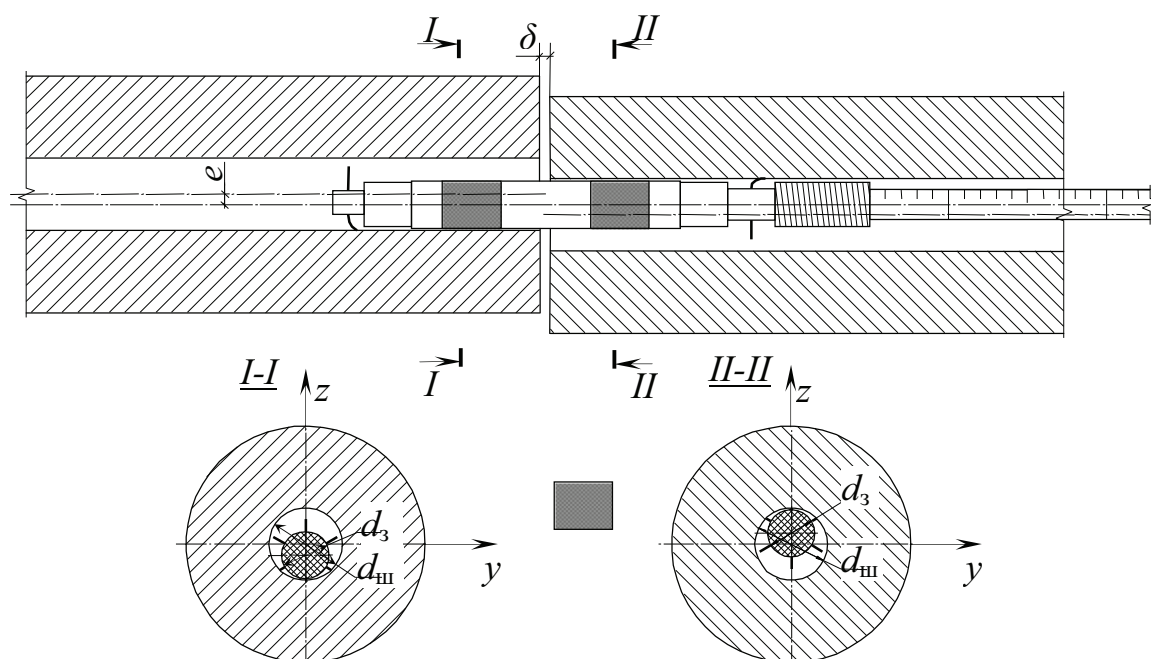


Рис. 18. Стенд для исследований показаний интроскопа при смещении оси шпура относительно оси зонда

$e = 16$ мм и $e = 8$ мм, в шпуре диаметром $d_{ш} = 36$ мм – соответственно $e = 6$ мм и $e = 3$ 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. 19. 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, максимум 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 в полости шпура и трещины.

Отмеченное влияние факторов наглядно видно на рис. 19. Без эксцентриситета ($e = 0$ мм) зависимости средних приращений в зоне влияния трещины, независимо от диаметра шпура, представляют собой куполообразные кривые, обращенные пиком вверх, величина которого постепенно увеличивается с ростом раскрытия трещины. Появление эксцентриситета приводит к образованию купола, т.е. снижению показаний интроскопа по сравнению с исходными значениями в однородном шпуре. Это свидетельствует, что вначале более значимым фактором является эксцентриситет. Дальнейший рост раскрытия трещины при постоянной величине эксцентриситета ведет к появлению обращенного вверх пика в месте расположения купола и его раздвоению. По мере роста раскрытия трещины пик по ее середине увеличивается,

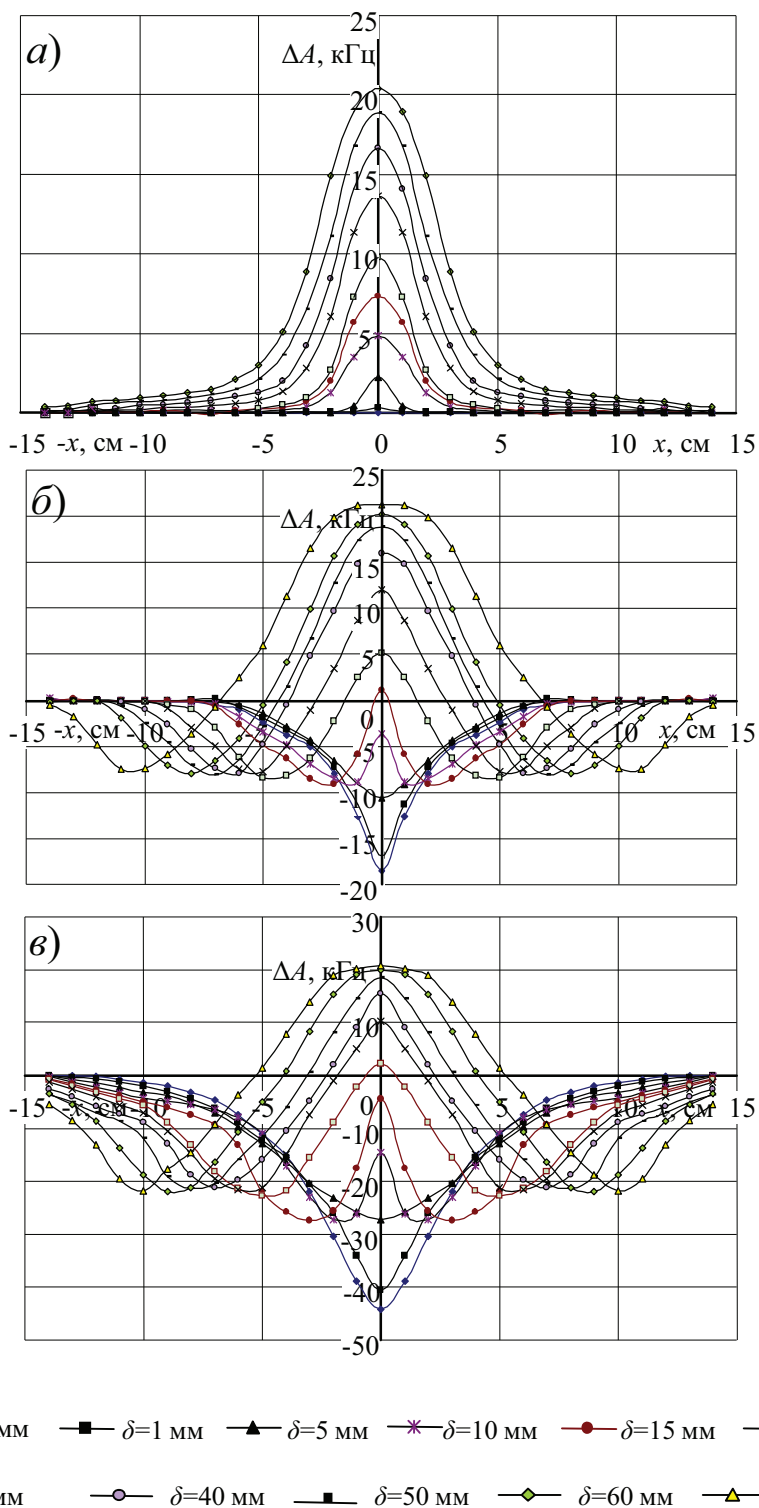


Рис. 19. Прирост показаний интроскопа ΔA вдоль модели шпура диаметром $d_{ш} = 46$ мм при величине эксцентриситета $e = 0$ мм (а), $e = 8$ мм (б) и $e = 16$ мм (в) и различных значениях раскрытия трещины δ

а по бокам от уступа образуются две расширяющиеся с ростом трещины выемки, которые соответствуют моментам, когда зонд прижат к поверхности шпура и максимум зоны действия датчика приходится на породу, а не на воздух. В шпуре меньшего диаметра ($d_{ш} / d_3 = 1,2$) в связи с уменьшением доли воздуха в зоне действия датчика размах показаний интроскопа в зоне влияния дефекта шпура увеличивается.

Отмеченные закономерности демонстрируются на рис. 20, где представлены графики прироста показаний интроскопа по середине трещины в зависимости от её раскрытия при минимальном, среднем и максимальном значениях эксцентриситета в шпуре диаметром 46 мм. С ростом раскрытия трещины показания интроскопа увеличиваются по нелинейной зависимости, подобной приведенной на рис. 14. 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

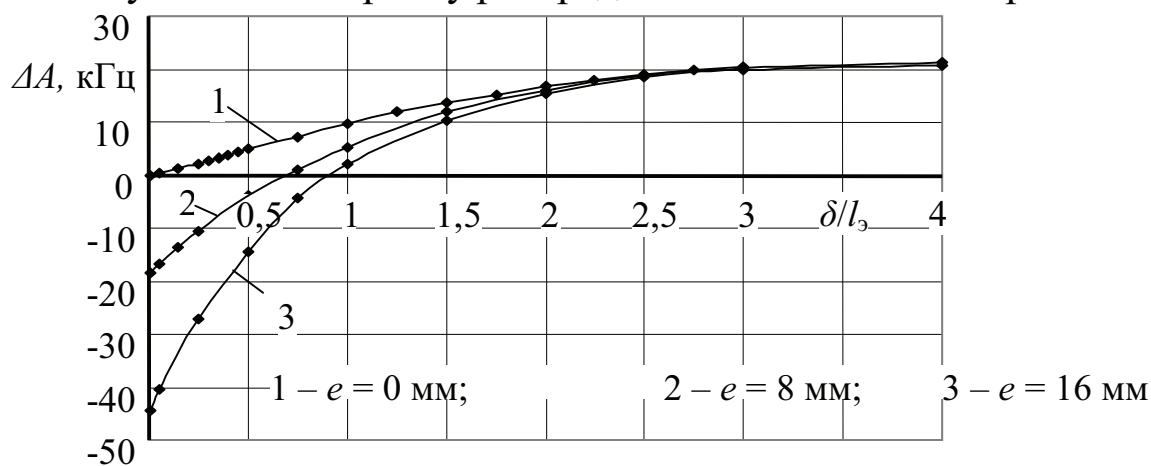


Рис. 20. Прирост показаний интроскопа посередине трещины в зависимости от её раскрытия при различных значениях эксцентриситета e в шпуре диаметром 46 мм

вдоль шпура, расшифровка, которой с помощью методики, полученной на основании исследования влияния лишь одного фактора

(раскрытия трещины), становится невозможной в виду нестабильного положения датчика в шпуре. При реальных замерах в шахтных условиях число взаимодействующих факторов еще больше 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.

Регрессионная модель зависимости показаний интроскопа от влияющих факторов. 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 [6]. Их применение исключает произвол в задании условий эксперимента и позволяет получить математическую зависимость показаний интроскопа от совокупного действия случайных факторов.

В этом случае система «зонд-шпур-породный массив» имеет ряд характеризующих ее случайных входов, управлять которыми исследователь не может, поэтому модель выхода имеет следующий вид:

$$y = \eta(\bar{x}) + \varepsilon(\bar{x}), \quad (16)$$

где $\eta(\bar{x})$ – функция отклика или неслучайная функция от совокупного действия факторов;

$\varepsilon(\bar{x})$ – ошибка опыта, т.е. случайная величина, распределение которой определяется значением вектора (\bar{x}) , а математическое ожидание $M[\varepsilon(\bar{x})] = 0$.

По полученным из опыта данным оценить функцию отклика для того или иного фактора можно лишь приближенно. Значение этой функции в фиксированной точке факторного пространства равно условному математическому ожиданию изучаемой переменной, т.е. $\eta(\bar{x}) = M[y(\bar{x})]$. Так как вид функции нам заранее неизвестен, то ее мы будем представлять уравнением регрессии:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + a_{12}x_1x_2 + \dots \\ \dots + a_{(n-1)n} \cdot x_{n-1} \cdot x_n + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + \dots + a_{nn}x_n^2, \quad (17)$$

где a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii} – коэффициенты регрессии.

В связи с трудоемкостью эксперимента основная задача его планирования состоит в выборе такого плана, при котором для оценки функции отклика потребовалось бы провести минимальное число опытов n . Наиболее часто в подобных случаях используют планы экстремального эксперимента [6], позволяющие описать модель с помощью полинома. 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 . Третий фактор (эксцентриситет) исключен благодаря новой методике измерений. Входные факторы x_1 и x_2 представлены в виде кодированных переменных [6], уровни и интервалы варьирования которых, приведены в табл. 1.

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.

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

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования факторов

Наименование фактора и единицы измерения	Обозначение фактора	Уровни факторов			Интервал варьирования
		нижний -1	основной 0	верхний +1	
Диаметр шпура $d_{ш}$, мм	x_1	36	41	46	5
Раскрытие трещины δ , мм	x_2	0	20	40	20

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	y_j	$S^2\{y_j\}$
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

$$y = 118,75 + 10,64x_1 + 17,58x_2 - 9,77x_1x_2, \quad (18)$$

$$y = 125,88 + 10,64x_1 + 17,58x_2 - 9,77x_1x_2 - 9,05(x_1)^2 - 1,92(x_2)^2. \quad (19)$$

Проверка адекватности полученных моделей экспериментальным данным производилась статистически по методике, изложенной в работе [6]. При этом производилась оценка однородности дисперсий выходной величины через коэффициент Кохрена, значимости коэффициентов уравнения регрессии по критерию Стьюдента и проверка модели на адекватность по критерию Фишера. Проверка показала, что все значения коэффициентов в уравнениях регрессии (18 и 19) – значимы, а модели – адекватны. Сравнение значения выходной величины в центре плана со свободным членом уравнения регрессии позволило определить ошибку сходимости δ , которая для уравнения (18) составила 4,1%, а для уравнения (19) – 1,66%, т.е. математическое уравнение второго порядка лучше описывает исследуемую область.

Найденные уравнения позволяют 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 уравнений (18 и 19) 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 показание интроскопа.

Криволинейные поверхности на рис. 20 дают наглядное представление о поведении уравнений регрессии в факторном пространстве. Из рис. 20 видно, что поверхность описываемая уравнением второго порядка, лучше соответствует результатам лабораторных исследований. Полученное уравнение (19) может использоваться для определения раскрытия трещин в массиве, т.е. по показанию интроскопа, замерив диаметр шпура $d_{ш}$, можно определить величину раскрытия трещин δ .

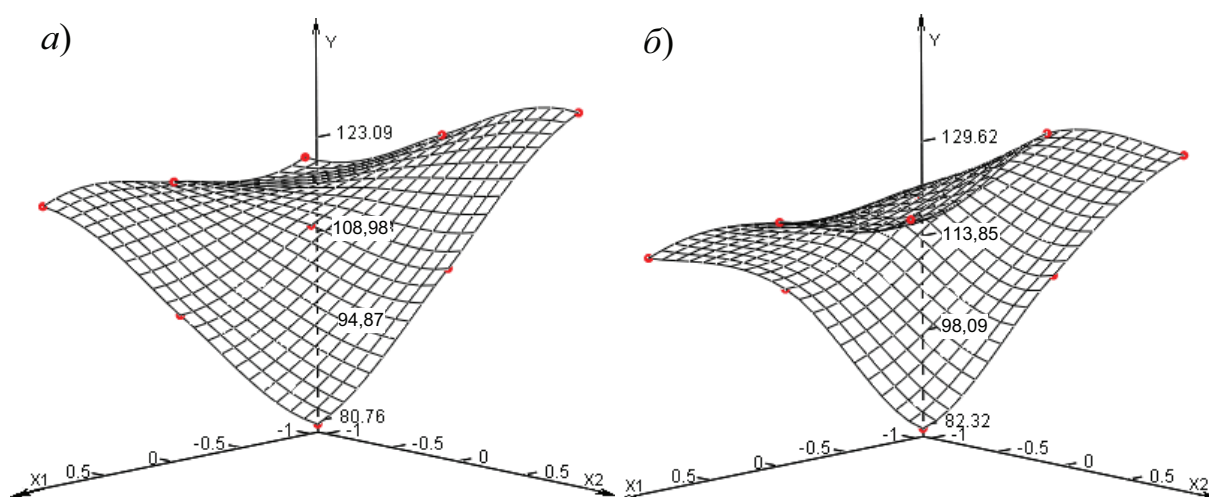


Рис. 20. Факторное пространство математической модели нелинейного уравнения регрессии первого (а) и второго (б) порядка

Разработка новой конструкции зонда для интроскопии породного массива. Работа с интроскопом в шахтных условиях позволила выявить следующие недостатки метода [3]: невысокая достоверность измерений, так как конструкция датчика не обеспечивает линейной связи между диэлектрической проницаемостью пород и показателями прибора; нестабильность частоты колебаний от внешних факторов (в частности от температуры); уз-

кий діапазон вимірювання частоти; змінчивість чутливості датчика по його довжині при вимірюванні на довгій базі; велика споживана потужність приладу, що обмежує тривалість його роботи; нестабільність положення датчика відносно осі шпура в результаті нерівномірного зносу направляючих стінок шпура; помилка вимірювання в результаті зменшення діаметра шпура внаслідок розвитку деформаційних процесів в породному масиві з часом; жорстка конструкція досылочного пристрою, що ускладнює вимірювання при искривленні шпура.

Для урахування встановлених закономірностей і усунення відзначених недоліків розроблена нова конструкція інтроскопа [7], загальний вигляд якого представлений на рис. 21.

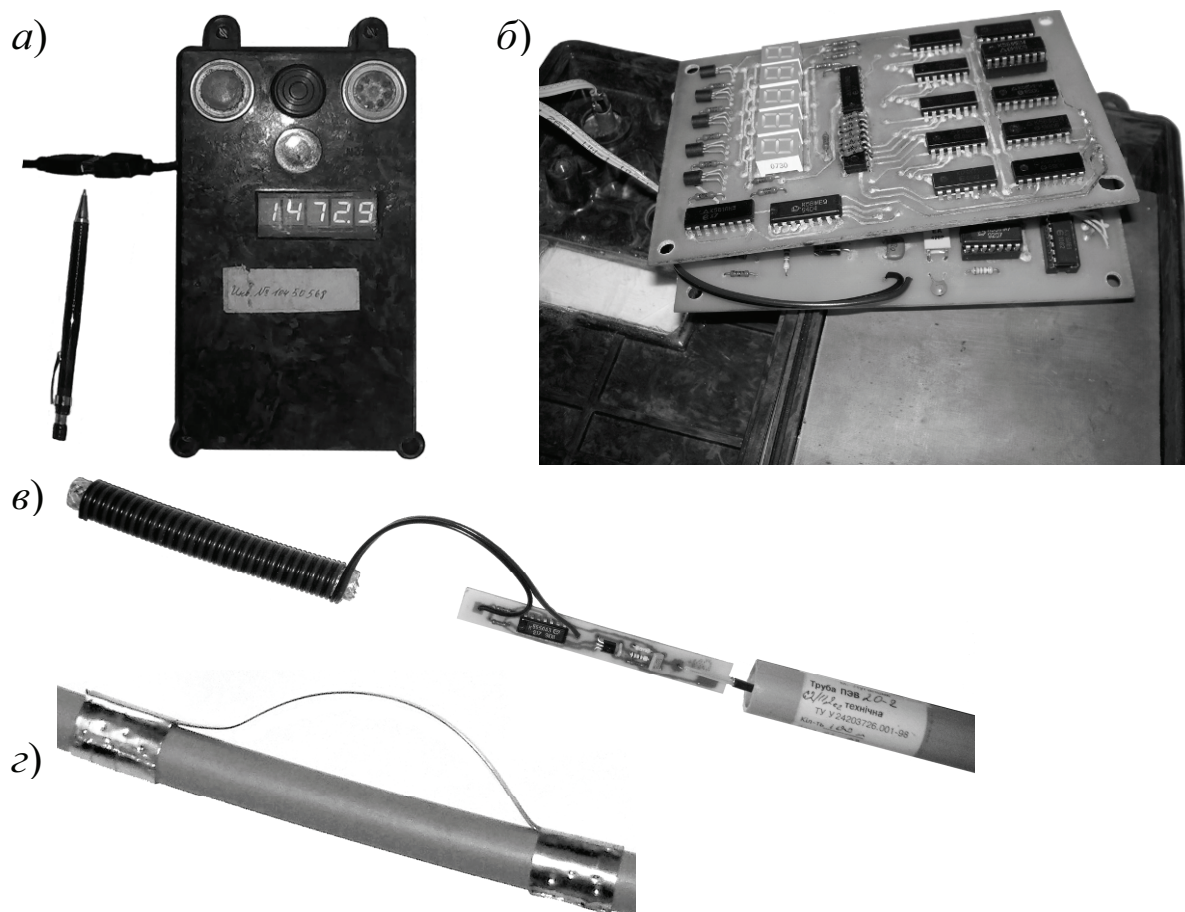


Рис. 21. Внешний вид измерительного блока интроскопа (а), его внутреннее устройство (б), конструкция зонда (в) и прижимного элемента (з)

Достоверность измерений предложенным интроскопом, прежде всего повышена путем внесения изменений в электрическую схему интроскопа, а именно, путем замены автогенератора гармонических колебаний релаксационным генератором прямоугольных импульсов, собранном на одной интегральной микросхеме и имеющим линейную зависимость частоты от электрической емкости.

Все входящие в микросхему радиоэлементы выполнены на одном полупроводниковом кристалле при одних и тех же технологических параметрах производства, что обеспечивает более высокую стабильность частоты колебаний от внешних факторов по сравнению с автогенератором, собранным на дискретных элементах. Высокая температурная стабильность обеспечивается также за счет применения микросхемы, работающей в режиме микротоков, которые не вызывают её нагрева во время работы. Дополнительно для стабилизации частоты в схему интроскопа введен интегральный стабилизатор напряжения питания с коэффициентом стабилизации по напряжению $K_u=2000$.

Точность измерения частоты колебаний в усовершенствованном приборе возросла в 10 раз за счет увеличения разрядности частотомера от 0,1 кГц до 9999,9 кГц. Уменьшение потребляемой прибором мощности достигнуто за счет использования в измерительном блоке микросхем, изготовленных по технологии КМОП, и модуля индикации на основе семисегментных светодиодных индикаторов. Такое решение позволило применить динамическую индикацию, при которой отдельные знакоместа зажигаются поочередно с коротким интервалом переключения, поэтому зрительно воспринимаются как непрерывное свечение всех разрядов индикатора. В этом случае общая потребляемая индикатором мощность не зависит от его разрядности и равна мощности, потребляемой одним знакоместом, что значительно меньше по сравнению с ранее применявшимися вакуумными люминесцентными индикаторами, основным источником потребления энергии которых являются цепи накаливания катодов. Уменьшение общей потребляемой мощности с 800 до 50 мВт значительно увеличило продолжительность работы прибора при питании его от батареи при проведении шахтных исследований,

а также уменьшило нестабильность показаний интроскопа, связанную с изменением напряжения источника питания при его разрядке.

В первоначальном варианте (см. рис. 1) датчик прибора был жестким и состоял из трех элементов, образующих два параллельно включенных конденсатора. Такое включение обеспечивает симметричность характеристики прибора относительно середины зонда, однако при этом в зоне центрального электрода характеристика чувствительности датчика имеет провал. Устранить этот недостаток можно за счет увеличения числа параллельно включенных электродов, при этом характеристика чувствительности будет иметь несколько менее глубоких провалов, а при значительно большем числе электродов может быть получена практически равномерная характеристика. В усовершенствованном варианте интроскопа чувствительный элемент зонда реализован в виде спирали (рис. 21, в), навитой на гибкий каркас двужильным проводом с наружным диаметром жилы 2 мм, что при длине датчика 104 мм соответствует 52 электродам. Сравнение характеристик авторского и усовершенствованного интроскопа по длине датчика при измерении надлинной базе приведено на рис. 22, где уровень чувствительности \tilde{A} выражен как процентное отношение разницы показаний прибора на воздухе A_B и в модели с одиночной трещиной A_T к показателю прибора на воздухе A_B .

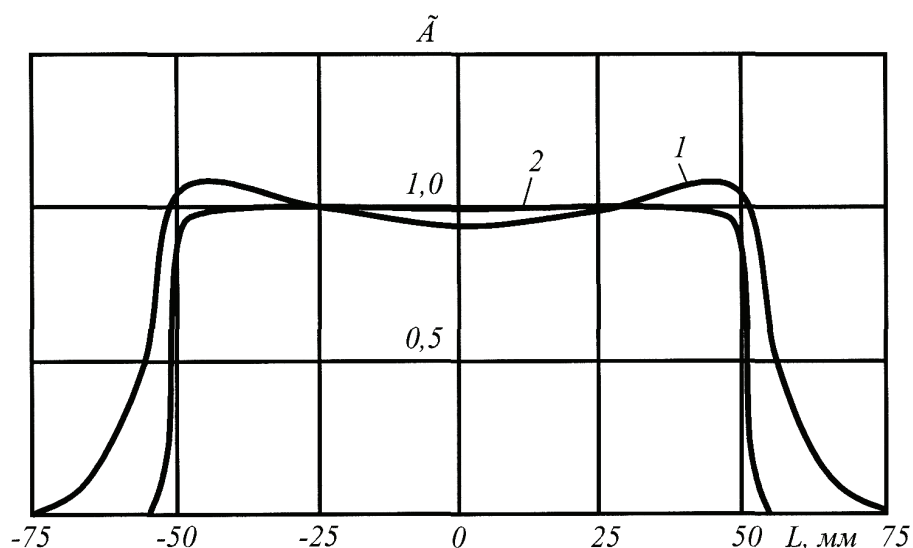


Рис. 22. Характеристика чувствительности авторского (1) и усовершенствованного (2) интроскопа по длине датчика при измерении на длинной базе

Электронная схема зонда (рис. 21, в) собрана на печатной плате размером 14x120 мм, изготовленной из двухсторонне фольгированного текстолита, что позволяет разместить её совместно со спиральным датчиком в гибкой пластиковой трубе, которая одновременно играет роль досылочного устройства.

Для того чтобы измерения не зависели от зазора между стенками шпура и датчиком прибора, зонд в виде пластиковой трубы прижимается к стенкам шпура с помощью гибкой пружины, расположенной вдоль шпура (рис. 21, г). Данная конструкция зонда дает возможность приспосабливаться к неровностям шпура и изменению его диаметра, допускает регулирование степени прижатия зонда за счет изменения жесткости пружины и позволяет измерять диаметр шпура по удлинению пружины, для этого один из ее концов закреплен кольцом на трубе, а второй выполнен подвижным, допускающим перемещение вдоль оси зонда.

Измерительный блок интроскопа собран на двух печатных платах (рис. 21, б) размером 90x140 мм, изготовленных из двухсторонне фольгированного текстолита. Размеры и расположение радиоэлементов на платах измерительного блока допускает их герметичное размещение в корпусе от шахтного анализатора метана «Сигнал-2», что дает возможность применять интроскоп в газовых шахтах.

Использование интроскопа для оценки проявлений горного давления в выработке. Исследования были направлены на изучение проявлений горного давления непосредственно вблизи забоя проводимой выработки. Получение геомеханической информации осуществлялось с помощью контурных реперов и емкостного каротажа в шпурах, пробуренных в кровле, почве и боках воздухоподающего уклона пласта l_1 шахты имени XIX съезда КПСС ГП «Луганскуголь», проводимого вне зоны влияния очистных работ.

Воздухоподающий уклон (рис. 23) предназначен для подачи свежей струи от вспомогательной вентиляционной скважины, пробуренной у южной границы шахтного поля до гор. 700 м. Уклон проводился сверху вниз под углом 3-5° от западного откаточного штрека гор. 610 м параллельно ранее проведенному 4-му

западному вентиляционному уклону на расстоянии 150 м от него. При проведении воздухоподающего уклона выемка угля пласта l_1 , мощностью 0,9 м, и пород кровли пласта производилась комбайновым способом. Проходческий забой был оснащен комбайном КСП-22, ленточным перегружателем типа ППЛ-1К и ленточным конвейером 1ЛТП-80. Форма поперечного сечения выработки – арочная, крепление выработки – трехзвенная арочная металлическая податливая крепь КМП-А3 из спецпрофиля СВП-27 с плотностью установки 1,43 рамы/м с деревянной затяжкой кровли. Проектная площадь поперечного сечения выработки в свету до осадки – 12,8 м², а проектная длина – 800 м. К моменту начала исследований было пройдено 576 м выработки.

Место оборудования комплексной замерной станции (КЗС), включавшей три замерных пункта (рис. 23), расположенных на расстоянии 5 м друг от друга, совпало с геологическим нарушением в виде мелкоамплитудной флексурной складки, вследствие чего угольный пласт оказался ниже контура поперечного сечения выработки. Каждый замерный пункт комплексной замерной станции состоял из пяти шпуров глубиной 2,2 м, предназначенных для оценки трещинной пустотности окружающего выработку породного массива и контурных реперов для контроля смещений породного обнажения выработки. Для установки контурного репера бурили шпур длиной 0,3 м, в них плотно забивали деревянные пробки, в которые затем закрепляли реперы с измерительным кольцом, служащим для зацепления крючка рулетки с натяжной лентой. Смещения породного контура выработки регистрировали на замерной станции по реперам, заложенным в кровле, почве и боках выработки.

Результаты замеров смещений контура выработки представлены на рис. 24. За весь период наблюдений (86 сут) вертикальная конвергенция кровли и почвы составила 286 мм, горизонтальная конвергенция боков выработки – 45 мм, максимальное опускание пород кровли – 93 мм. Следует также отметить значительные смещения пород почвы выработки, которые на протяжении всего времени наблюдений превышали величину опускания кровли и на последний замер составили 193 мм.

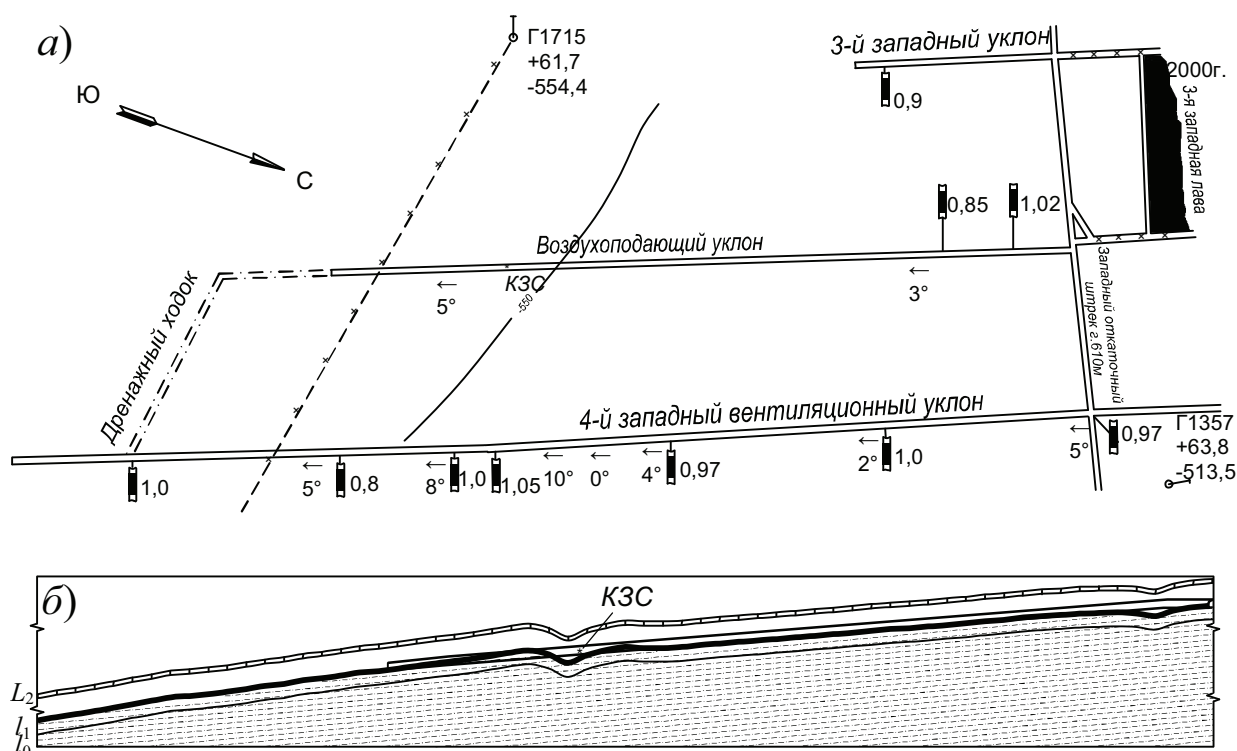


Рис. 23. Выкопировка с плана горных работ (а) с указанием места расположения комплексной замерной станции (КЗС) и геологический разрез по воздухоподающему уклону

Максимальное значение интенсивности опускания кровли (от 23 до 7 мм/сут) наблюдалось в первые 10 суток после обнажения пород (рис. 24, б), далее наблюдалось снижение скорости смещений. В период с 35 по 86 сут интенсивность опускания кровли практически не менялась и составила в среднем 0,2 мм/сут, что свидетельствует о стабилизации процесса. Средняя интенсивность смещений кровли за весь период наблюдений составила 1,1 мм/сут. Отсутствие на графике периода нарастания интенсивности смещений пород дает основания утверждать, что зарождение разрушения пород имеет место уже впереди забоя.

Измерения в шпурах проводились при помощи разработанного электроемкостного зонда. Замеры электроемкостным методом производились с той же периодичностью, что и смещений пород контура выработки, до момента их стабилизации. Это позволило сопоставить результаты интроскопии массива с данными, полученными на контурных реперах. Фиксировались показания прибора через каждые 5 см шпура при пятикратном

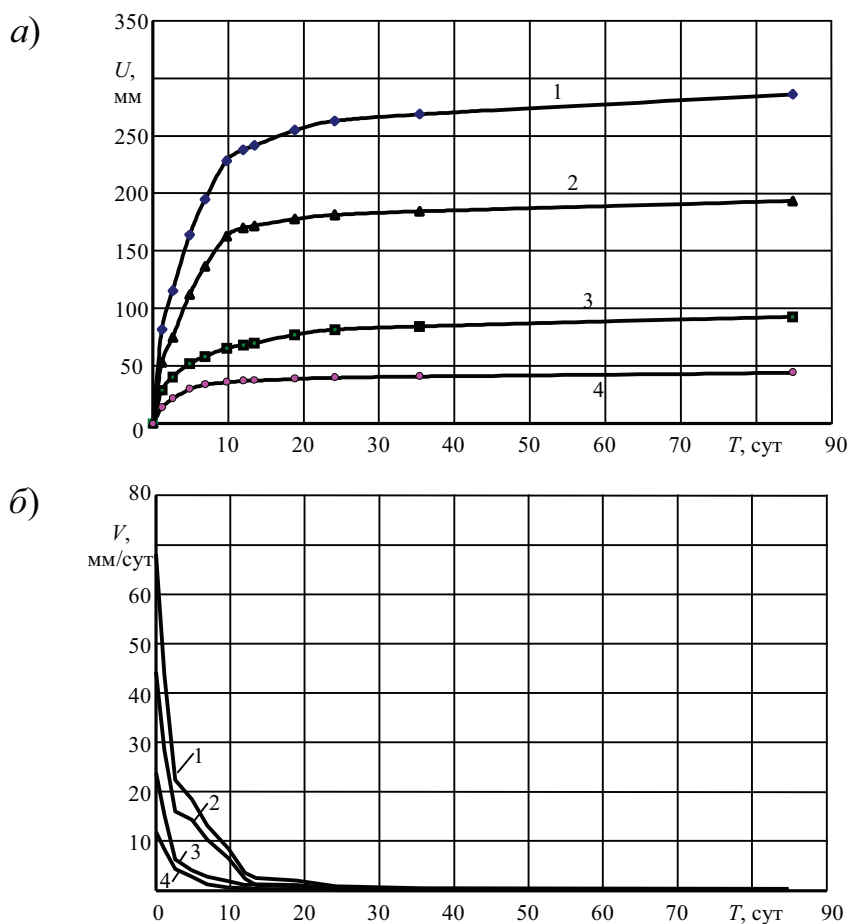


Рис. 24. Смещения породного контура (а) и скорости смещений (б) в воздухоподающем уклоне: 1 – почвы и кровли выработки; 2 – почвы; 3 – кровли; 4 – боков

повторении измерений. В результате анализа показаний прибора были получены данные о структурных особенностях массива, наличии и раскрытии отдельных трещин, а также установлены закономерности образования зоны неупругих деформаций (ЗНД) вокруг выработки.

При этом, так как при ширине раскрытия трещины, не превышающей половины длины эффективной зоны чувствительности датчика, наблюдается почти линейная зависимость показателя неоднородности от ширины раскрытия трещины, зависимость между относительным показателем неоднородности и коэффициентом трещинной пустотности массива была представлена в линейном виде:

$$k_{mp} = a \cdot P_n = a \cdot \frac{A_m - A_{ш}}{A_m - A_3}, \quad (20)$$

где $k_{тр}$ – линейный коэффициент трещинной пустотности пород;

a – коэффициент пропорциональности;

P_H – показатель неоднородности пород, установленный по данным каротажа;

A_M , $A_{ш}$ и A_3 – показания прибора соответственно в ненарушенных участках массива, в шпуре и заполнителе трещины, скорректированные по данным лабораторных исследований в зависимости от диаметра шпура, кГц.

Поскольку смещения породного контура известны по результатам измерений на контурных реперах, используя данную зависимость (20), можно перейти к смещениям u_j породного контура выработки в месте заложения j -го шпура:

$$u_j = \int_0^{r_{Lj}} k_{mp,j}(l) dl = \int_0^{r_{Lj}} a_j \cdot \frac{A_M - A_{uj}(l)}{A_M - A_3} dl = \frac{a_j}{A_M - A_3} \cdot \left[A_M \cdot r_{Lj} - \int_0^{r_{Lj}} A_{uj}(l) dl \right], \quad (21)$$

где r_{Lj} – размер ЗНД в направлении j -го шпура.

Смещения пород по шпурам, пробуренным в угольный пласт, расположенный в почве выработки, для сопоставления с результатами электроемкостной интроскопии рассчитывались по формуле:

$$u = u_b \cdot \cos \alpha + u_n \cdot \sin \alpha, \text{ мм}, \quad (22)$$

где u_b , u_n – соответственно смещения, измеренные по контурным реперам в боках и в почве выработки, мм;

α – угол наклона шпура к горизонтальной плоскости, равный 15° .

Так как глубина ЗНД уже на момент первого наблюдения превысила глубину всех шпуров, оценка её размеров проводилась экстраполяцией до уровня его показаний в ненарушенном массиве с использованием зависимости вида:

$$A = b \cdot \exp(-c \cdot l), \quad (23)$$

где A – показание интроскопа в шпуре, зависящее от расстояния l между зондом прибора и контуром выработки;

b , c – эмпирические коэффициенты, определяемые на каждую дату замера для каждого шпура.

Поскольку зависимость (23) является асимптотически убывающей, граница ЗНД определялась при разнице между рассчитанным по ней показанием интроскопа A и показанием в ненарушенном массиве (являющимся асимптотой) равной 0,1 кГц. Для примера на рис. 25 представлены графики показаний интроскопа на первую (а) и на последнюю (б) даты замеров, по которым видно, что размер ЗНД в кровле выработки за время наблюдений увеличился с 2,19 м до 8,24 м. Результаты расчета размеров ЗНД в зависимости от расстояния до забоя выработки представлены в табл. 3.

Таблица 3

Размеры зоны неупругих деформаций вокруг воздухоподающего уклона

Расстояние от забоя, м	≤ 1,2	2,8	5,6	11,9	17,5	23,8	28	30,8	44,1	57,4	74,2	189
Размер ЗНД в боках, м	2,05	2,33	2,59	2,73	2,92	3,15	3,27	3,34	3,54	3,62	3,65	3,67
Размер ЗНД в кровле, м	2,19	5,49	6,04	6,33	6,71	7,18	7,44	7,58	7,98	8,14	8,21	8,24

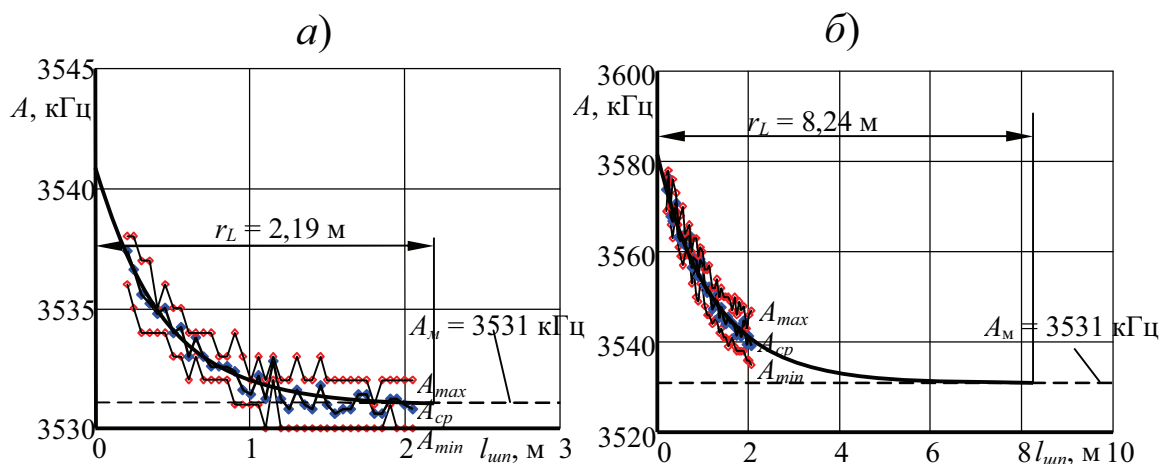
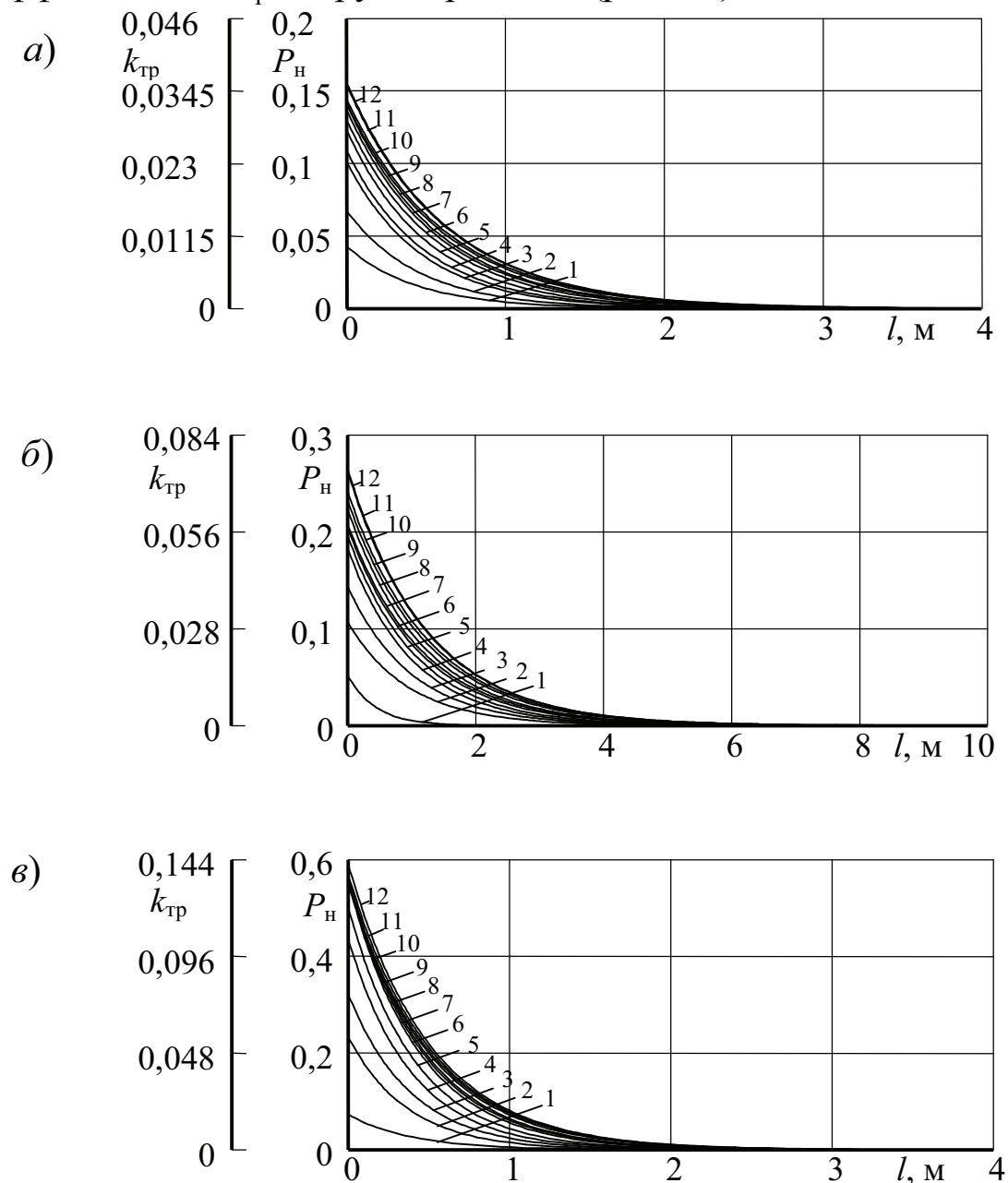


Рис. 25. Графики показаний интроскопа по шпур, расположенному в кровле воздухоподающего уклона, на первые (а) и 86-е сутки замеров (б)

Сопоставление результатов измерений на контурных реперах и данных емкостного каротажа позволило определить из формулы (21) коэффициент a , связывающий показатель неоднородности P_n с коэффициентом трещинной пустотности массива $k_{тр}$, а также построить зависимости коэффициента трещинной

пустотности $k_{тр}$ от глубины шпура (рис. 26) и изолинии равных коэффициентов $k_{тр}$ вокруг выработки (рис. 27).



Расстояние от забоя:

1 – 1,2 м; 2 – 2,8 м; 3 – 5,6 м; 4 – 11,9 м; 5 – 17,5 м; 6 – 23,8 м;
7 – 28 м; 8 – 30,8 м; 9 – 44,1 м; 10 – 57,4 м; 11 – 74,2 м; 12 – 189 м;

Рис. 26. Зависимости показателя относительной неоднородности P_n и коэффициента трещинной пустотности $k_{тр}$ от глубины l шпура, расположенного:
а – в боку, б – в кровле, в – в почве

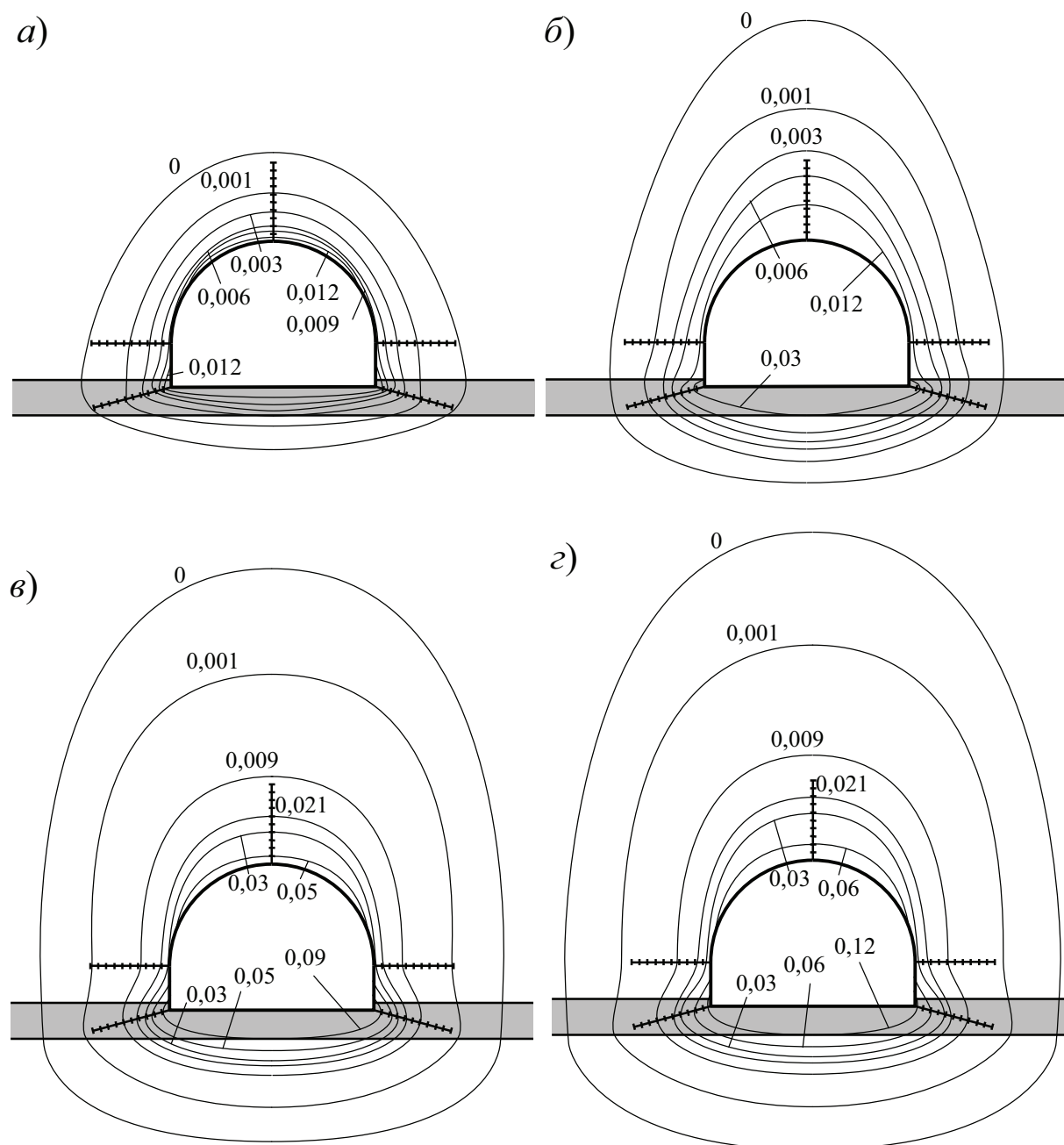


Рис. 27. Распределение изолиний коэффициента трещинной пустотности вокруг воздухоподающего уклона на расстояниях от забоя: *а* – 1,2 м, *б* – 2,8 м, *в* – 28 м, *г* – 189 м

Особенностью деформирования пород при проведении уклона является зарождение разрушения в опережающем забой массиве, которое сразу после обнажения пород развивалось преимущественно в кровле выработки. Уже в первые сутки наблюдений зона неупругих деформаций распространилась в кровле за пределы измерительного шнура (рис. 27, а), а еще через сутки из-

за разрыхления слоистых и анизотропных пород и действия гравитационных сил в кровле выработки образовался свод, прослеживающийся по изолиниям k_{mp} (рис. 27, б). По мере удаления забоя размеры зоны разрушения постоянно росли, причем интенсивность разрушения в кровле опережала разрушения в боках и почве выработки. Окончание процесса интенсивного трещинообразования произошло на 10 сутки наблюдений, что соответствует удалению от забоя на 23,8 м. После этого наблюдалась стабилизация деформационного процесса, обусловленная окончанием перераспределения напряжений и включением в работу крепи, что согласуется с результатами замеров смещений породного контура (рис. 24, а).

Выводы и направление дальнейших исследований. На основе лабораторных исследований электроемкостного метода оценки структурных неоднородностей в массиве горных пород установлены экспериментальные зависимости показаний интроскопа (частоты сигнала) от основных влияющих факторов, а также обоснованы наиболее значимые факторы и требования к приборно-методическому обеспечению для его усовершенствования. Предложена регрессионная зависимость показаний интроскопа от раскрытия трещин и диаметра шпура и разработаны новая конструкция интроскопа и методика оценки трещинной пустотности пород вокруг выработки, использование которых позволяет оценивать проявления горного давления вокруг выработок.

Разработанное оборудование и методику определения трещинной пустотности пород вокруг выработок в дальнейшем планируется положить в основу текущего контроля геомеханических процессов и их проявлений, являющегося частью разрабатываемой системы геомеханического контроля на угольных шахтах.

Список литературы

1. Ямщиков В.С. Контроль процессов горного производства / В.С. Ямщиков. – М.: Недра, 1989. – 446с.
2. Бабиюк Г.В. Геомеханический контроль состояния массива вокруг горных выработок/ Г.В. Бабиюк // Проблеми гірського тиску. – Збірник наукових праць. Випуск №14. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – С.157 – 170.
3. А.с. 1794253 СССР, МКИ G01V 3/18 Способ определения неоднородностей массива горных пород / Г.Г. Литвинский, В.А. Касьянов; Ком-

мунарский горно-металлургический институт. №4790255/25; Заявлено 8.02.90; Опубл. 7.02.93. Бюл. №5.

4. Бабиюк Г.В. Определение показателей нарушенности пород по результатам электроемкостного каротажа / Г.В. Бабиюк, А.А. Леонов, В.А. Касьянов // Известия Донецкого горного института. – 1997. – №2 (6). – С. 86 – 92.

5. 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.

6. Володарский Е.Т. Планирование и организация измерительного эксперимента / Е.Т. Володарский, Б.Н. Малиновский, Ю.М. Туз. – К.: Вища шк., 1987. – 280с.

7. 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.

Стаття надійшла до редакції 17.11.2012.

Рекомендовано до друку д-ром техн.наук С.В. Борщевським

Г.В. Бабіюк, В.Ф. Пунтус, М.А. Діденко

Донбаський державний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ, ВДОСКОНАЛЕННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОЄМНІСНОГО МЕТОДУ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ПРОЯВІВ ГІРСЬКОГО ТИСКУ НАВКОЛО ВИРОБОК

За допомогою лабораторних досліджень електроємнісного методу оцінювання неоднорідностей у масиві гірських порід встановлено, що основними факторами які впливають на показання інтроскопу, є розкриття тріщин і діаметр шпуру. Запропонована з використанням методики планування експерименту регресійна залежність показань інтроскопу від впливових факторів. На основі встановлених закономірностей вдосконалені конструкція інтроскопу та методика шахтних досліджень тріщинної порожнечності порід, з використанням яких оцінені прояви гірського тиску у виробці.

Ключові слова: електроємнісний метод, інтроскоп, гірські породи, тріщини, лабораторні дослідження, шпур, виробка.

G. Babiyuk, V. Puntus, M. Didenko

Donbass State Technical University

STUDY, IMPROVEMENT AND USE OF ELECTROCAPACITY METHODS TO ESTIMATE ROCK PRESURE AROUND EXCAVATIONS

Laboratory testing of the electrocapacity method of estimating heterogeneities in rock mass has shown that basic factors influencing the introscope data are crack opening and borehole diameter. Using the method of experiment planning we propose the regression dependence of introscope data on influencing factors. Besides we improved the introscope design and the methods of studying rock cracking and that allowed estimating the rate of rock pressure in excavations.

Keywords: electrocapacity method, introscope, rocks, laboratory research, borehole, excavation.