Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LVII, вып. 1, 1969 г.

ОЦЕНКА ТРЕЩИНОВАТОСТИ ПОРОД В ЗОНЕ НЕУПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ

В. Б. Бокий, А. И. Кудряшов, А. М. Фридлянд

Зона неупругих деформаций, возникающая в результате проведения горных выработок, как известно, характеризуется в большинстве случаев трещинообразованием, развивающимся во времени. С другой стороны, по прошествии определенного срока, трещиноватость пород может уменьшаться за счет их уплотнения, т. е. закрытия трещин.

Трещинообразование связано со смещением пород, величина которого определяет устойчивость их обнажений и, в конечном счете, нагрузку на крепь. Поэтому для оценки и прогноза устойчивости выработок необходимо создание методики и средств установления развития трещинообразования во времени.

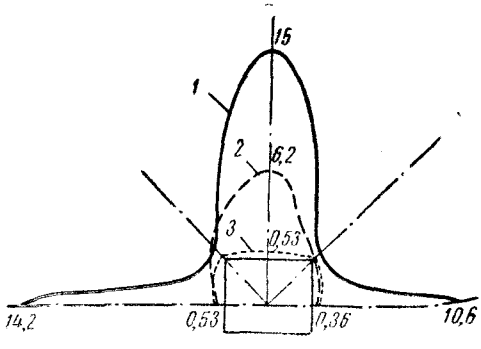


Рис. 1. Эпюра трещиноватости пород вокруг горной выработки в *ати/м·мин*:

1, 2 и *3* – соответственно на расстоянии от контура выработки 0,2–0,5, 0,5–1,2 и 1,2–1,5 *м*.

По предложению А. М. Фридлянда для этого было использовано нагнетание по скважинам сжатого воздуха в массив пород, окружающий горную выработку*. Степень трещиноватости пород в этом случае определяется по интенсивности падения давления сжатого воздуха в резервуаре, из которого он поступает в скважину. Падение давления при этом выражается в атмосферах на 1 *м* скважины в минуту (*ати/м·мин*).

Исследования трещиноватости пород в зоне неупругих деформаций проводились по этой методике ЛГИ совместно с трестом Долинскшахтострой на шахтах Чурубай-Нуринского и Тентекского районов Карагандинского бассейна.

Практика показала, что этот метод обеспечивает возможность установления степени трещиноватости породного массива на различном расстоянии от контура выработки и позволяет выразить это в виде графика. Вместе с тем принятая единица измерения *ати/м·мин* предопределяет наибольшее поднятие кривой, характеризующей среднюю максимальную скорость падения давления, а следовательно и

* Фридлянд А. М. Исследование трещиноватости пород в массиве, окружающем горную выработку. Шахтное строительство № 5, 1965.

максимальную трещиноватость, в то время как эти условия соответствуют зоне пород на расстоянии 0,2—0,5 *м* от контура выработки (рис. 1).

Более удаленные зоны (1—1,5 *м*) характеризуются кривыми, вершины которых располагаются ниже кривой *1*, что не обеспечивает наглядности характеристики состояния пород.

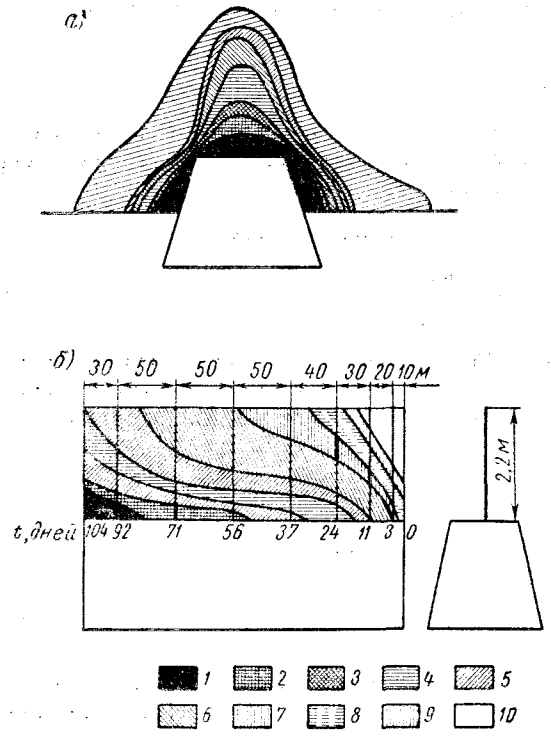


Рис. 2. Эпюры трещиноватости пород вокруг горной выработки:

а) вокруг сечения квершлага; б) развитие трещинообразования во времени. Трещиноватость, *мм²/м*: *1*—<35; *2*—>25; *3*—>10; *4*—>3; *5*—>1; *6*—>0,5; *7*—>0,2; *8*—<0,2; *9*—отсутствует.

Поэтому нами была разработана другая методика. Для этого, по аналогии с проветриванием шахт, введено понятие об эквивалентном отверстии. В данном случае под ним понимается отверстие в тонкой стенке, при котором в резервуаре наблюдается та же скорость падения давления сжатого воздуха, что и при существующей на исследуемом участке скважины трещиноватости пород. Размерность показателя трещиноватости в этом случае может быть принята *мм²/м*.

На рис. 2,*а* представлено распределение зон трещиноватости пород вокруг квершлага на горизонте +356 шахты 14 Чурубай-Нуринской через 55 дней после его проходки, определенной по новой методике.

Применяя предлагаемый метод, можно проследить развитие трещиноватости во времени не только в данном сечении выработки, но и по ее протяженности. В качестве примера характеристики развития трещиноватости во времени по длине выработки на рис. 2,*б* приведен график применительно к условиям кровли промежуточного штрека пласта d_7 на шахте 12 Чурубай-Нуринской. Замеры проводились на участке длиной 280 *м* при наибольшем сроке существования пункта замера 104 дня *.

---

* Пути построения указанных графиков изложены ниже.

Правомерность принятой постановки вопроса может быть обоснована законами физики применительно к определению размеров отверстия в тонкой стенке в зависимости от времени истечения газа. Для решения этой задачи, учитывая небольшое давление (1—3 *ати*) сжатого воздуха в резервуаре применяемого прибора, можно принять с известным допущением, что в данном случае могут быть использованы законы молекулярной физики для идеальных газов. При этом можно воспользоваться зависимостью Клапейрона—Менделеева

$$pV=\frac{m}{\mu}RT, \tag{1}$$

где p—давление газа в резервуаре; V—объем резервуара; m—масса газа; μ—молекулярный вес газа; T—абсолютная температура газа; R—универсальная газовая постоянная.

Из выражения (1) можно определить массу газа

$$m=\frac{\mu Vp}{RT}. \tag{2}$$

В рассматриваемых условиях температуру и объем газа в резервуаре можно считать постоянными. Тогда при истечении газа с уменьшением давления на dp масса газа в резервуаре уменьшится на

$$dm=\frac{\mu V}{RT}dp,$$

и, следовательно, масса истекшего газа будет

$$dm=-\frac{\mu V}{RT}dp. \tag{3}$$

Минус в формуле (3) показывает, что с уменьшением давления в резервуаре увеличивается масса истекшего из него газа. Увеличение массы истекшего газа за сколь угодно малое время dt, если плотность его ρ и скорость истечения v практически остаются постоянными, можно выразить формулой

$$dm=\rho vsdt, \tag{4}$$

где s—площадь отверстия, через которое истекает газ.

Из формул (3) и (4) следует

$$\rho vsdt=-\frac{\mu V}{Rt}dp. \tag{5}$$

Определив из формулы (2) значение плотности

$$\rho=\frac{m}{V}=\frac{\mu p}{RT} \tag{6}$$

и подставив его в формулу (5), получим

$$\frac{\mu p}{RT}vsdt=-\frac{\mu V}{RT}dp$$

или

$$pvsdt=-Vdp. \tag{7}$$

Для нахождения скорости истечения воздуха воспользуемся уравнением Бернулли для газа

$$\frac{v_2-v_1}{2}+g(h_2-h_1)+\int_1^2\frac{dp}{\rho}+\Sigma\lambda\frac{L}{d}\frac{v_2^2-v_1^2}{2}+\Sigma\varphi\frac{v_2^2-v_1^2}{2}=0, \qquad (8)$$

где v_1 и v_2—скорости газа в двух произвольных сечениях s_1 и s_2 газовой среды; h_1 и h_2—расстояния от этих сечений до условного уровня; λ—гидравлический коэффициент сопротивления; L—длина шланга или трубы; d—диаметр шланга; φ—коэффициент местных сопротивлений.

Выражением $g(h_2-h_1)$ в формуле (8) можно пренебречь, так как, ввиду малой плотности газа и незначительной величины перепада (h_2-h_1), изменение потенциальной энергии газа весьма незначительно.

В качестве s_1 примем сечение резервуара, а s_2—сечение, проходящее через отверстие истечения воздуха. Так как s_1 значительно больше s_2, то скорость истечения воздуха v_1 значительно меньше скорости v_2 и ею можно пренебречь.

При сделанных допущениях уравнение (8) приобретает вид

$$\frac{v^2}{2}+\int_p^{p_0}\frac{dp}{\rho}+\Sigma\lambda\frac{L}{d}\frac{v^2}{2}+\Sigma\varphi\frac{v^2}{2}=0, \qquad (9)$$

где p и p_0—соответственно давление газа внутри и вне резервуара.

Из уравнения (9) можно определить скорость v истечения воздуха

$$v=\sqrt{\frac{-2\int_p^{p_0}\frac{dp}{\rho}}{1+\Sigma\lambda\frac{L}{d}+\Sigma\varphi}}. \qquad (10)$$

Значение интеграла $\int_p^{p_0}\frac{dp}{\rho}$ зависит от характера изменения плотности ρ воздуха между сечениями s_1 и s_2.

Подставляя значение ρ из уравнения (6) и помня, что температура и объем воздуха в резервуаре за весь срок его истечения остаются неизменными, получим

$$\int_p^{p_0}\frac{dp}{\rho}=\frac{RT}{\mu}\int_p^{p_0}\frac{dp}{p}=\frac{RT}{\mu}\ln\frac{p_0}{p}=-\frac{RT}{\mu}\ln\frac{p}{p_0}.$$

При этом формула (10) приобретает вид

$$v=\frac{\sqrt{2\frac{RT}{\mu}\ln\frac{p}{p_0}}}{\sqrt{1-\Sigma\lambda\frac{L}{d}+\Sigma\varphi}}=\frac{\sqrt{2\frac{RT}{\mu}}\sqrt{\ln\frac{p}{p_0}}}{k}, \qquad (11)$$

где

$$k=\sqrt{1+\Sigma\lambda\frac{L}{d}+\Sigma\varphi}. \qquad (12)$$

Подставляя значение v из (11) в формулу (7), получим

$$\frac{1}{k} p \sqrt{\frac{2RT}{\mu}} \sqrt{\ln \frac{p}{p_0}}\, s dt = -V dp,$$

откуда

$$dt = \frac{kV}{\sqrt{\frac{2RT}{\mu}}\, s} \frac{dp}{p \sqrt{\ln \frac{p}{p_0}}}. \qquad (13)$$

Интегрируя уравнение (13) слева от 0 до t и справа от $p_н$ до $p_к$ (соответственно от начального и конечного давления воздуха в резервуаре), найдем время истечения газа из резервуара при снижении в нем давления от $p_н$ до $p_к$

$$\int_0^t dt = \frac{kV}{\sqrt{\frac{2RT}{\mu}}\, s} \int_{p_н}^{p_к} \frac{dp}{p \sqrt{\ln \frac{p}{p_0}}}$$

и

$$t = \frac{2kV}{\sqrt{\frac{2RT}{\mu}}\, s} \left(\sqrt{\ln \frac{p_н}{p_0}} - \sqrt{\ln \frac{p_к}{p}} \right). \qquad (14)$$

Таким образом, при определенных объеме резервуара и температуре газа время его истечения зависит от начального и конечного давления воздуха в резервуаре и величины отверстия s, которое может быть определено из уравнения (14), если известно время t истечения воздуха

$$s = \frac{2kV}{\sqrt{\frac{2RT}{\mu}}\, t} \left(\sqrt{\ln \frac{p_н}{p_0}} - \sqrt{\ln \frac{p_к}{p_0}} \right). \qquad (15)$$

В выражение (15) входит коэффициент k, точное значение которого неизвестно. Оно может быть подсчитано по формуле (12) на основе справочных значений входящих в него параметров. Однако k может находиться в пределах от 1 до 5. Это происходит от того, что теоретические расчеты, в том числе и наши, ведутся исходя из законов, выведенных для идеальных газов, в то время как воздух является газом реальным.

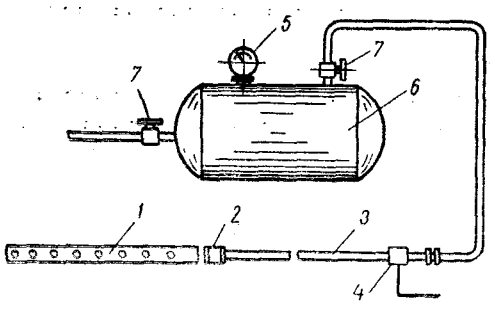


Рис. 3. Прибор для определения эквивалентного отверстия.

Поэтому, при определении k и s для конкретных параметров применяемого аппарата, с одной стороны были рассчитаны соответственно по формулам (12) и (15), а с другой—определены экспериментом.

Для имитации скважин и трещин в породе была изготовлена перфорированная труба *1* (рис. 3) с герметически закрытым одним концом, который соответствовал забою скважины. Размеры отверстий и число их на единицу длины трубы строго фиксированы. При производстве экспериментов в перфорированную трубу вводилось герметизирующее устройство *2*, закрепленное на конце трубы *3*, соединяющей

его с механизмом *4*, с помощью которого создается распор герметизирующего устройства в перфорированной трубе (или скважине) на любом ее участке. Благодаря этому можно имитировать любую суммарную площадь трещиноватости на данной длине скважины—трубы. При открытии вентиля *7* сжатый воздух из резервуара *6* поступает в скважину—трубу и истекает через имеющиеся в ней отверстия на участке между герметизирующим устройством и закрытым концом трубы. Перемещая герметизирующее устройство внутри трубы, можно фиксировать время истечения воздуха на любом отрезке ее длины и, следовательно, при различной суммарной площади отверстий (различном эквивалентном отверстии).

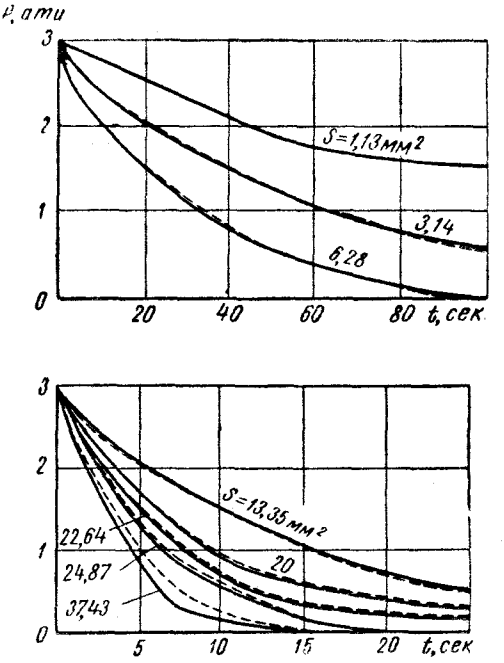


Рис. 4. Графики падения давления сжатого воздуха в зависимости от времени при различной степени трещиноватости:

сплошная—расчетная, пунктир-экспериментальная кривые.

Исследования проводились сначала при одном открытом отверстии, затем при двух и т. д., т. е. число отверстий, через которые истекал воздух, а следовательно и общая их площадь (эквивалентное отверстие) постепенно увеличивалось. В результате этих работ установлена правомерность определения величины эквивалентного отверстия на любом участке скважины, путем вычитания из большого значения эквивалентного отверстия меньшего.

Установлено также, что эквивалентное отверстие нескольких участков скважины равно сумме эквивалентных отверстий этих участков. Это позволяет при одном герметизирующем устройстве выбирать длину исследуемого участка скважины без всяких ограничений, что чрезвычайно важно.

В процессе исследований было установлено также, что при эквивалентном отверстии более 30 *мм*^{2} скорость истечения воздуха настолько велика, что замерить время истечения его практически не представляется возможным. Такое положение в натуре соответствует полному разрушению пород.

Поэтому верхним пределом области применимости определения трещиноватости пород данным методом является трещиноватость, эквивалентным отверстием которой является 30 *мм*^{2}.

Результаты проведенных экспериментов приведены на графиках рис. 4.

Усредненное значение k на основании проведенных расчетов и экспериментов получено равным 2,37. Примем давление вне резервуара 1 *ата*; тогда формула (14) приобретет вид

$$t=\frac{4{,}74V}{\sqrt{\frac{2RT}{\mu}}s}\left(\sqrt{\ln(p_н+1)}-\sqrt{\ln(p_к+1)}\right). \qquad (16)$$

При $p_н = 3$ *ати*; $p_к = 1$ *ати*; $T = 17°C = 290°K$; $\mu = 29$ *кг/кмоль* для воздуха; $R = 8{,}31 \cdot 10^3$ *дж/кмоль·град*; s в *мм²* и t в *сек* формула (16) приобретает вид

$$t = \frac{200}{s_э}, \text{ откуда } s_э = \frac{200}{t}. \qquad (17)$$

Развитие зон трещиноватости породного массива, окружающего выработку представлено на графиках рис. 2. Построение таких графиков сводится к следующему: на линии, соответствующей оси скважины, в выбранном масштабе, откладывается расстояние границ последовательно исследуемых участков, считая от устья скважины. Расстояние между двумя смежными точками является в масштабе шириной зоны массива, обладающей трещиноватостью, соответствующей замеренному эквивалентному отверстию $\frac{мм^2}{м}$. Соединив точки, соответствующие границам зон одинаковой трещиноватости по отдельным скважинам, получим характеристику развития трещиноватости породного массива на различном расстоянии от контура выработки (рис. 2).

Из приведенных графиков можно заключить, что предполагаемый метод оценки трещиноватости породного массива вокруг горной выработки обеспечивает получение необходимых характеристик не только для определенного сечения выработки, но и динамику развития трещиноватости.

Это, в свою очередь, позволяет прогнозировать степень устойчивости выработок и, в угрожающих случаях своевременно принимать необходимые меры.