точной части Мегринского рудного района. Автореф. дисс. на соискание уч. ст. канд. геол.-мин. наук. Баку: М-во высш. и сред. спец. образ. Азерб. ССР. Аз[illegible] Государственный ун-т им. С. М. Кирова 19[illegible], 22 с.
17. Ш[illegible] Л. И. О магнезиально-скарновой рудной формации.—В кн.: Вопросы генезиса и закономерности размещения эндогенных месторождений. М.: Изд. Наука, 1966, с. 88—101.

Известия АН Армении. Науки о Земле, 1992, XLV, №2, 30—34.

Г. М. АВЧЯН

СЖИМАЕМОСТЬ ТРЕЩИННЫХ ПОРОД

На основе анализа уравнений скорости распространения упругих волн в порово-трещинной породе получено выражение для оценки сжимаемости среды с «n» системами трещиноватости в любом направлении пространства.

Рекомендуется новый параметр, который может характеризовать концентрацию накопленных напряжений или интегральную сжимаемость среды.

Деформация пород, как многокомпонентных пористых агрегатов, рассмотрена в работах М. Био, Ф. Гассмана, Дж. Гирстма, Ш. Нагумо, В.М. Добрынина, Г. И. Петкевича, А. И. Савича, Г. А. Соболева и многих других авторов.

Такой интерес в геологии к теоретическому и экспериментальному изучению деформации пород обусловлен с одной стороны тем, что деформация пород является причиной многих катастрофических землетрясений, а с другой—трещины, возникающие при деформации, являются путями миграции нефти и газа, способствуют эксплуатации месторождений, а также предопределяют возникновения рудных залежей при перемещении гидротермальных растворов.

Между коэффициентом сжимаемости пористой среды и пористостью существует связь [1, 5].

$$\beta_{ск}=\beta_{т}+K_{п}\beta_{п}, \tag{1}$$

где $\beta_{ск}$, $\beta_{т}$ и $\beta_{п}$ соответственно сжимаемости скелета, твердой фазы и порового пространства, $K_{п}$—коэффициент пористости.

Это уравнение является фундаментальным, так как оно определяет не только связь между величинами, характеризующими свойства породы деформироваться, но и роль пористости [5]. Если в породе имеется и трещинная пористость, то уравнение принимает вид:

$$\beta_{ск}=\beta_{т}+K_{п.гр}\beta_{п.гр}+K_{тр}\beta_{тр}, \tag{2}$$

где индексы (гр) и (тр) относятся к гранулярным (межзерновым) и трещинным порам.

Имеется множество работ, посвященных оценке величины сжимаемости гранулярных пор $\beta_{гр}$. Эта величина не зависит от пористости, а определяется напряжением, колеблется в пределах (80—500)·10^{-5} $МПа^{-1}$ в атмосферных условиях и снижается до (30—100)·10^{-5} $МПа^{-1}$ в глубинных условиях залегания пород [1].

Сжимаемость твердой фазы β колеблется в пределах (1,4—4,0)·10^{-5} $МПа^{-1}$, т. е. меньше на один-два порядка относительно сжимаемости гранулярных пор.

Вопрос сжимаемости трещин до настоящего времени остается открытым. Имеются теоретические исследования В. М. Добрынина [5] по оценке величины $\beta_{тр}$ для карбонатных пород в зависимости от раскрытости и напряжения. Сжимаемость трещин может превышать сжимаемость гранулярных пор более чем в 4—5 раз и особенно, если сжимающая сила перпендикулярна плоскости трещины. Это значение $\beta_{тр}$ фактически является максимальным ($\beta_{тр.\,max}$). Когда сила направлена под углом относительно плоскости трещин и если в породе имеются несколько трещин или систем трещиноватости с произвольной ориентировкой, то способы оценки их интегральной величины в произвольном направлении нам не известны. Упругие модули горных пород, из-за пространственно-направленной палеомагнитной слоистости [3] обладают значительной анизотропией. Эта анизотропия обусловлена направленным распределением внутренних напряжений в породе, ориентированной кристаллизацией многих минералов, ориентированного осадконакопления, определенной пространственной ориентировкой плоскости трещиноватости и т. д. Следовательно, знание величины сжимаемости трещин в зависимости от направления приложенной силы и интегральная величина сжимаемости в заданном направлении (модуль одностороннего сжатия) при наличии в породе нескольких произвольно ориентированных систем трещиноватости должно являться одной из важных задач в области изучения упругих характеристик трещинных сред.

Представим связь сжимаемости трещин от направления действия сил, т. е. перейдем от модуля всестороннего сжатия трещины к модулю одностороннего сжатия с помощью уравнения

$$\beta_{тр} = \beta_{тр.\,max}\,\alpha, \tag{3}$$

где α—коэффициент ориентировки трещин, $\beta_{тр.\,max}$—максимальная сжимаемость трещины, когда сила направлена перпендикулярно плоскости трещины.

Если в породе «n» систем трещиноватости с коэффициентами трещиноватости $K_{тр.\,i}$ и коэффициентами максимальной сжимаемости $\beta_{тр.\,i.\,max}$, то уравнение (1) для такой системы будет иметь вид:

$$\beta_{ск} = \beta_{т} + K_{п.\,гр}\beta_{п.\,гр} + \sum_{i=1}^{n} K_{тр.\,i}\,\beta_{тр.\,i.\,max}\cdot\alpha_i. \tag{4}$$

Таким образом, для оценки сжимаемости скелета или средней, интегральной сжимаемости трещин при их произвольном пространственном распределении необходимо определить максимальную сжимаемость заданной системы трещиноватости и коэффициент ориентировки системы α.

Для оценки максимальной сжимаемости трещин, раскрытие которых больше размеров зерен, слагающих породу, можно использовать уравнение В. М. Добрынина [4]:

$$\beta_{тр.\,max} \approx \frac{2}{3\xi}\left|\frac{1-\mu_т^2}{1-2\mu_т}\,\beta_т\right|^{2/3} P_{эф}^{-1/3}, \tag{5}$$

где ξ—коэффициент, равный отношению пустотного пространства трещины к ее полному объему, который при равномерном распределении контактов на поверхности назван В. М. Добрыниным коэффициентом просветности трещины; $P_{эф}$—эффективное давление, $\mu_т$—коэффициент Пуассона твердой фазы породы.

Величина ξ может меняться от $\xi = 0{,}476$ для кубической упаковки шаровых выступов в трещине до $\xi = 1$ при уменьшении числа контактов до нуля.

Оценка $\beta_{тр.\,max}$ по формуле (5) при $\beta_т = 0{,}025\cdot 10^{-3}\ МПа^{-1}$; $\mu = 0{,}2$, $\xi = 1 \div 0{,}476$ дает

$$\beta_{тр.\,max} \approx 2{,}5\cdot 10^{-3} \div 5{,}3\cdot 10^{-3}\ МПа^{-1}.$$

Для оценки величины α воспользуемся двумя независимыми уравнениями скорости продольных волн в пористых средах, т. е. определим динамическую сжимаемость среды. Согласно первому уравнению [1] скорость в поровой v_p или в порово-трещинной v'_p среде равна

$$v_p = \left\{3\,\frac{1-\mu}{1+\mu}\,/(\beta_т + K_{п.\,гр}\,\beta_{п.\,гр})\sigma\right\}^{1/2}. \qquad (6)$$

$$v'_p = \left\{3\,\frac{1-\mu'}{1+\mu'}\,/\left(\beta_т + K_{п.\,гр}\beta_{п.\,гр} + \sum_i^n K_{тр.\,i}\,\beta_{тр.\,i}\right)\sigma'\right\}^{1/2}, \qquad (7)$$

где μ—коэффициент Пуассона ;σ—плотность. Штрихи сверху относятся к порово-трещинным породам.

Поскольку трещиноватость породы обычно составляет несколько процентов (1, 5), то σ от σ' и μ от μ' отличаются соответственно не более чем на 2—3% и 5—10%. Изменения μ и σ в этих пределах практически не влияют на значения функции $f(\mu, \sigma)$ при переходе от поровых к порово-трещинным породам, т. е.

$$f(\mu, \sigma) = \left|3\,\frac{1-\mu}{(1+\mu)\sigma}\right|^{1/2} \approx \left|3\,\frac{1-\mu'}{(1+\mu')\sigma'}\right|^{1/2}. \qquad (8)$$

В этом случае уравнение (7) можно представить в виде

$$v'_p = \left\{3\,\frac{1-\mu}{1+\mu}\,/\left(\beta_т + K_{п.\,гр}\,\beta_{п.\,гр} + \sum_i^n K_{тр.\,i}\beta_{тр.\,i}\right)\sigma\right\}^{1/2}. \qquad (9)$$

Уравнение (9) справедливо для однородной изотропной среды, если величину $\beta_{тр}$ представить как скалярную величину, т. е. $\beta_{тр}$ имеет постоянное значение в любом произвольном направлении. Однако было отмечено, что $\beta_{тр}$ зависит от соотношения направлений силы и плоскости трещины. В этом случае получим:

$$v'_p = v_0/\left(1 + \frac{\sum_i^n K_{тр.\,i}\beta_{тр.\,i.\,max}\alpha_i}{\beta_т + K_{п.гр}\beta_{п.гр}}\right)^{1/2}, \qquad (10)$$

где

$$v_0 = \left|3\,\frac{1-\mu}{1+\mu}\,/(\beta_т + K_{п.\,гр}\beta_{п.\,гр})\sigma\right|^{1/2}.$$

Здесь величина v_0 фактически является максимальной скоростью однородной изотропной среды с гранулярной пористостью $K_{п.\,гр}$.

В работе [2] нами предложено другое уравнение для порово-трещинной породы с «n» системами трещиноватости

$$v'_p = v_0/\left\{\sum_i^n \left[(1 + (\lambda_i^2 - 1)\alpha_i^2)\right]^{1/2} - (n-1)\right\}. \qquad (11)$$

Здесь

$$\alpha_i = |\cos\varphi\sin\theta_i\cos(D - D_i) - \sin\varphi\cos\theta_i|\cos\gamma_i - \cos\varphi\sin(D - D_i)\sin\gamma_i,$$

где D_i и θ_i азимут и наклонение заданной системы трещиноватости; γ_i—угол вращения плоскости трещиноватости относительно оси падения; D и φ—азимут и наклонение профиля наблюдения; λ_i—коэффициент анизотропии скорости при наличии в породе только одной, данной системы трещиноватости; a —параметр ориентировки.

Коэффициент анизотропии λ_i для заданной системы трещиноватости можно определить из граничных условий:

а) при распространении волны перпендикулярно плоскости трещин.

В этом случае

$\beta_{тр} = \beta_{тр.\,max}$;

$v_p' = v_{p,\,min}$;

$$v_{p,\,min} = \left\{ 3\,\frac{1-\mu}{1+\mu} \Big/ (\beta_т + K_{п,\,гр} \cdot \beta_{п,\,гр} + K_{тр\,i}\beta_{тр,\,i\,max})\rho \right\}^{1/2}. \tag{13}$$

б) при совпадении направления распространения волны с плоскостью трещиноватости $\alpha = 0$,

$v_p' = v_{p,\,max}$

$$v_{p,\,max} \left\{ 3\,\frac{1-\mu}{1+\mu} \Big/ (\beta_т + K_{п,\,гр}\,\beta_{п\,гр})\rho \right\}^{1/2}. \tag{14}$$

Следовательно,

$$\lambda_i = \frac{v_0}{v_{min}} = \sqrt{1 + \frac{K_{тр,\,i}\,\beta_{тр,\,i,\,max}}{\beta_т + K_{п,гр}\,\beta_{п,гр}}}. \tag{15}$$

Таким образом, для порово-трещинной породы имеем два уравнения—(10) и (11). Из их сравнения следует

$$\sum_i^n K_{тр,i}\beta_{тр,i,max}\alpha_i = (\beta_т + K_{п,гр}\beta_{п,гр}) \left\{ \left| \sum_i^n \sqrt{1 + (\lambda_i^2 - 1)\alpha_i^2} - (n-1) \right|^2 - 1 \right\}^2. \tag{16}$$

Обозначим

$$\beta_т + K_{п,гр}\beta_{п,гр} = C;$$

$$\sum_i^n \beta_{тр,i} K_{тр,i} = A^{-1}.$$

Тогда

$$A^{-1} = C \left\{ \left| (1-n) + \sum_i^n \sqrt{1 + (\lambda_i^2 - 1)\alpha_i^2} \right|^2 - 1 \right\} \tag{17}$$

Коэффициент A характеризует концентрацию накопленных напряжений или интегральную сжимаемость среды в направлении D φ при наличии в породе *«n»* систем преград [4]. Согласно (17) значение A определяется максимальной сжимаемостью каждой системы преграды $\beta_{тр,i,max}$, интенсивностью их трещиноватости $K_{тр,i}$ и коэффициентом ориентации α системы относительно направления распространения волны.

Если все преграды имеют одинаковую интенсивность, то, видоизменив уравнение (17), получим

$$\sum_i^n \beta_{тр,\,i} = \frac{C\left\{ \left| (1-n) + \sum_i^n \sqrt{1 + (\lambda_i^2 - 1)\alpha_i^2} \right|^2 - 1 \right\}}{K_{тр}}. \tag{18}$$

Анализ уравнений (17, 18) показывает, что:

1. Сжимаемость единичной системы трещин зависит от направления приложенной силы относительно плоскости трещин φ,

$$\beta_{тр} = \beta_{тр,max} \cdot \sin^2\varphi, \tag{19}$$

$$\alpha = \sin^2\varphi. \tag{20}$$

2. При *«n»* систем трещиноватости с одинаковой интенсивностью трещиноватости $K_{тр}$ интегральная сжимаемость выражается уравнением (18).

Уравнения (18) и (19) могут служить не только для оценки сжимаемости единичной трещины или среды с несколькими системами трещиноватости в произвольном направлении, но и с их помощью на основе уравнения (17) можем оценить напряженное состояние среды в любом направлении.

Ереванский государственный университет

Поступила 27.XI.1989.

Հ. Մ. ԱՎՉՅԱՆ

ՃԵՂՔՎԱԾՔԱՎՈՐՎԱԾ ԱՊԱՐՆԵՐԻ ՍԵՂՄԵԼԻՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ամփոփում

Ծակոտկեն-ճեղքվածքավորված ապարում առաձգական ալիքների տարածման արագության հավասարումների վերլուծության հիման վրա ստացված է տարածության ցանկացած ուղղությամբ ճեղքվածքավորվածության «n» համակարգեր ունեցող միջավայրի սեղմելիության գնահատման արտահայտությունը։

Մի նոր չափանիշ է առաջարկվում, որը կարող է բնորոշել կուտակված լարվածությունները կամ միջավայրի միասնական սեղմելիությունը։

H. M. AVCHIAN

THE FRACTURED ROCKS COMPRESSIBILITY

Abstract

On the basis of elastic waves spreading velocity eqations analysis in porous-fractured rocks the expression for evaluation the compressibitity of a medium with "n"-systems of fracturing in every directionis obtained.

A new parameter is recommended, wich is able to characterise the concentration of accumulated stresses or a medium integral compressibility.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Авчян Г. М., Матвеенко А. А., Стефанкевич З. Б.* Петрофизика осадочных пород в глубинных условиях. М.: Недра, 1979, 224 с.
2. *Авчян Г. М.* Скорость распространения упругих волн в анизотропных породах. Изв. АН АрмССР, Науки о Земле, №1, 1982, с. 47—55.
3. *Авчян Г. М., Гентеман Л., Маркосян Г. В.* Анизотропия скорости упругих волн в горных породах. — Изв. АН АрмССР, Науки о Земле, 1988, № 3, с. 39—46.
4. *Авчян Г. М., [illegible] А. О.* Линеаменты и сейсмичность. ДАН АрмССР, 1989.
5. *Добрынин В. М.* Деформации и изменения физических свойств коллекторов нефти и газа. М.: Недра, 1970, 239 с.