ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2024;(8):79-91
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.83: 550.83 DOI: 10.25018/0236_1493_2024_8_0_79

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ С ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ ТРЕЩИН

П.Е. Сизин

НИТУ МИСИС, Москва, Россия, e-mail: mstranger@list.ru

Аннотация: Рассмотрена электрическая проводимость двумерной и трехмерной среды, содержащей плоскопараллельную систему идеально проводящих или изолирующих тонких трещин. С использованием известных формул для малых приращений проводимости при внесении в среду отдельной трещины получены дифференциальные уравнения для проводимости среды с трещинами при немалой их концентрации. Они имеют экспоненциальный характер и не содержат перколяционных порогов. В двумерном случае изучались трещины в виде отрезков, для трехмерной среды – трещины в виде тонких круговых дисков, что предполагает возможность моделирования трещиноватых горных пород. Далее в среде COMSOL Multiphysics проверялось согласие результатов численных экспериментов с полученными теоретическими зависимостями проводимости двухкомпонентных сред от концентрации включений, а в двумерном случае также с предсказаниями метода EMA. В двумерном случае при случайном расположении центров проводящих трещин рост проводимости с ростом концентрации трещин оказывается линейным. Изменение проводимости для среды с изолирующими трещинами оказывается дуальным к изменению проводимости в случае проводящих трещин. При более регулярном расположении трещин проводимость хорошо описывается методом EMA и методом добавления единичных включений. В трехмерном случае проводимость среды как с идеально проводящими, так и с изолирующими трещинами хорошо описывается методом добавления единичных включений. Преимущества предлагаемого метода перед методом EMA состоят в математической простоте и возможности применения к более широкому классу включений и трещин.

Ключевые слова: электрическая проводимость, двухкомпонентная среда, тонкие трещины, приближение эффективной среды, регулярное расположение трещин, двумерные и трехмерные модели, численное моделирование, среда COMSOL Multiphysics.

Для цитирования: *Сизин П. Е.* Электрическая проводимость геологической среды с плоскопараллельной системой трещин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 8. – С. 79–91. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_8_0_79.

Conductivity of geological environment with plane-parallel system of joints

P.E. Sizin

NUST MISIS, Moscow, Russia, e-mail: mstranger@list.ru

Abstract: The article discusses conductivity of two-dimensional and three-dimensional medium containing a plane-parallel system of conductive or insulating thin fractures. Using the known formulas for small increments of conductivity in a medium with a single crack, the differential equations are derived for the conductivity in a medium with cracks of a considerable concentration. The equations are exponential and contain no percolation thresholds. In the two-dimensional case, the cracks represented short segments, and in the three-dimensional case, the cracks were thin circular disks, which allowed modeling jointed rocks. Then, in COMSOL Multiphysics, agreement was checked between the numerical results and theoretical relationships of two-component medium conductivity and crack concentrations, and also with the EMA predictions in 2D case. In two dimensions, at random arrangement of centers of conductive cracks, the increment in conductivity with the increasing concentration of cracks is linear. The change in conductivity of a medium with insulating cracks is dual relative to the change in conductivity of a medium with insulating cracks. At a regular arrangement of cracks, conductivity is described well using the EMA and the method of addition of singular defects. In three dimensions, conductivity of a medium both with conductive and insulating cracks is described well using the method of adding singular defects. Advantages of the proposed technique over the EMA are the mathematical simplicity and applicability to a wider class of defects and cracks.

Key words: conductivity, two-component medium, thin cracks, effective medium approximation, regular arrangement of joints, two-dimensional and three-dimensional models, numerical modeling, COMSOL Multiphysics.

For citation: Sizin P. E. Conductivity of geological environment with plane-parallel system of joints. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(8):79-91. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_8_0_79.

Введение

Проблемы прочности горных пород с трещинами и пустотами в настоящее время не утратили актуальность и еще далеки от полного решения [1]. Трещинообразование является основным механизмом разрушения горных пород [2]. Информация о концентрации трещин, их типе и размерах необходима для решения широкого круга практических задач: устойчивости пород в окрестности горных выработок [3], крупных плотин и других инженерных сооружений, планирования бурения и взрывных работ [4], а также для построения моделей земной коры в сейсмически активных районах и прогноза землетрясений [5]. В целом можно сказать, что концентрация и форма трещин предопределяет ход разрушения горных пород с учетом интенсивности приложенных напряжений [1, 6]. При немалых концентрациях трещин необходимо специально исследовать процессы их слияния [7].

Очевидно, встает задача определения концентрации трещин в горных породах, что далеко не всегда возможно сделать прямыми наблюдательными методами. Существуют и косвенные методы оценки концентрации трещин в горных породах, в частности использующие информацию об их электрическом сопротивлении [8, 9]. Трещиноватость массива может оцениваться методами электротомографии [10].

Для оценки трещиноватости горных пород по их электрическому сопротивлению требуется знание зависимости

сопротивления (или проводимости) среды от ее трещиноватости или пористости.

В настоящей статье мы ограничимся случаем тонких трещин. Отметим сразу, что изолирующие трещины оказывают наибольшее влияние на проводимость в направлении, перпендикулярном к ним, и вообще не изменяют проводимость в параллельном направлении. Аналогично трещины с нулевым сопротивлением (идеально проводящие) максимально влияют на проводимость в параллельном направлении (играют роль проводов) и не влияют на проводимость в перпендикулярном направлении. Оба этих крайних случая реализуются на практике: трещины могут быть как пустыми или содержащими низкопроводящие жидкости, так и заполненными раствором солей (высокопроводящим флюидом) [11]. Соответственно, первый случай моделируется включениями с нулевой проводимостью, второй — идеально проводящими [12].

При небольших значениях их концентрации проводимость среды с трещинами хорошо описывается приближением единичного включения, известным как приближение Максвелла [13]. При немалых концентрациях включений наилучшим методом считается приближение эффективной среды (effective media approximation, EMA) [14, 15]. В этом формализме вмещающий компонент среды также представляется в виде включений, форма которыя может выбираться по-разному. В случае изотропной среды «включения» сплошного компонента можно выбрать сферическими (круговыми в двумерном случае), в неизотропном случае их форму часто принимают совпадающей с формой включений. Однако возможны и другие варианты выбора формы.

При этом приближение EMA очень чувствительно к форме «включений» сплошного компонента. Его формулировка очевидна только для круговых и сферических включений. Уже для тонких эллипсов и эллипсоидов оно допускает различные формы «включений», ведущие к разным результатам [16]. Заметим, что именно тонкие эллипсы и эллипсоиды являются простейшей моделью трещин — «царапин» в двумерном случае и круговых дисков в трехмерном. Для трещин более сложной формы применение метода EMA в принципе проблематично. Даже элементарное приближение Максвелла требует знания тензора поляризуемости рассматриваемых включений. Его точное нахождение возможно для весьма ограниченного класса двумерных фигур и практически невозможно для трехмерных, за исключением сфер и эллипсоидов.

Существующие на данный момент модели, связывающие проводимость геологических сред с их трещиноватостью, обычно предполагают наличие внутри горных пород крупномасштабных трещинных структур, играющих роль «проводов» и ощутимо уменьшающих сопротивление рассматриваемых пород. В работе [17], например, экспериментально полученные значения межзерновой и трещинной пористости песчаника сопоставляются с его проводимостью. Полученные результаты показывают хорошее согласие экспериментальных данных с формулами классических работ [18, 19], как раз использующих этот подход. Представляется, однако, интересным также анализ зависимости электрического сопротивления горных пород от проводящих или изолирующих включений, имеющих немалую концентрацию, но еще не объединенных в макроструктуры.

Разумеется, мощным методом исследования любых свойств гетерогенных структур со сложной геометрией в настоящее время является численный экспери-

мент. В некоторых случаях он оказывается единственно возможным, в других, более простых, он может служить для проверки предсказаний теоретических моделей. В работе [20] описана методика моделирования геологической среды (зернистой или с отдельными трещинами) и численных экспериментов для определения проводимости такой среды. В [21] с помощью численного эксперимента найдена проводимость двумерной среды с тонкими изолирующими трещинами, расположенными под случайными, но большими углами к полю.

В настоящей работе мы используем выражения для вклада отдельной трещины в проводимость среды. Для отрезков-«царапин» и тонких круговых дисков он хорошо известен [22]. Далее мы применяем метод добавления единичных включений, предложенный в [23]. Из рассмотрения малых приращений проводимости при добавлении в неоднородную среду одного включения мы получаем дифференциальное уравнение для проводимости среды в зависимости от концентрации трещин. Численный эксперимент в среде COMSOL Multiphysics позволяет проверить полученную зависимость для каждого вида трещин в проводящем и изолирующем случае.

Использование приближения Максвелла для нахождения электрической проводимости двухкомпонентной среды при немалых концентрациях включений

Векторы напряженности электрического поля E и плотности тока j в сплошной среде подчинены уравнениям

$$divj = 0; \quad rotE = 0; \qquad (1)$$

и связаны между собой материальным уравнением

$$j = \sigma E; \quad \sigma = \sigma(x, y, z). \qquad (2)$$

Проводимость σ_e двухкомпонентной среды определяется как

$$\langle j \rangle = \sigma_e \langle E \rangle, \qquad (3)$$

где средние значения физических величин

$$\langle a \rangle = \lim_{V \to \infty} \frac{1}{V} \iiint_V a dx dy dz. \qquad (4)$$

Для кубического образца с ребром L, к противоположным граням которого приложено напряжение U, вызывающее в образце ток I, имеем

$$\sigma_e = \lim_{L \to \infty} \frac{I}{LU}. \qquad (5)$$

Аналогично определяется проводимость для двумерных задач, в которых средние значения есть

$$\langle a \rangle = \lim_{S \to \infty} \frac{1}{S} \iint_S a dx dy. \qquad (6)$$

Пусть отдельные включения обладают проводимостью σ_1, вмещающая среда — проводимостью σ_2.

Проводимость двумерного образца с ребром L с идеально проводящими трещинами длиной l, ориентированными параллельно приложенному электрическому полю, при небольшой их концентрации хорошо известна [22]:

$$\sigma_e = \sigma_2 \left(1 + \pi \left(\frac{l}{2} \right)^2 n \right). \qquad (7)$$

Здесь $n = N/L^2$ — двумерная концентрация трещин; N — число трещин в образце. Пусть двумерный образец с некоторым числом трещин (не обязательно малой концентрации) имеет проводимость σ. Добавим в него еще одну такую же трещину.

Изменение проводимости образца, связанное с этим, составит

$$\Delta\sigma \approx \sigma \frac{\pi}{4} \left(\frac{l}{L} \right)^2. \qquad (8)$$

Получаем дифференциальное уравнение

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = \frac{\pi}{4}\left(\frac{l}{L}\right)^2 dN, \qquad (9)$$

решение которого есть

$$\sigma = Ce^{\frac{\pi}{4}\left(\frac{l}{L}\right)^2 N}. \qquad (10)$$

Используем очевидное соображение: проводимость образца без трещин $\sigma(0) = \sigma_2$. Тогда находим окончательно

$$\sigma = \sigma_2 e^{\frac{\pi l^2}{4} n}. \qquad (11)$$

Для изолирующих (с нулевой проводимостью) трещин, ориентированных перпендикулярно полю, из линейного приближения

$$\sigma_e = \sigma_2\left(1 - \pi\left(\frac{l}{2}\right)^2 n\right) \qquad (12)$$

вполне аналогично получаем

$$\sigma = \sigma_2 e^{-\frac{\pi l^2}{4} n}. \qquad (13)$$

Сходство формул (11) и (13) не случайно. Оно отражает известное свойство дуальности. Пусть в двумерной матрице проводимостью $\sigma_2 = 1$ имеется некоторый набор включений. Если теперь $\sigma_{\parallel}$ — проводимость вдоль оси *Ox* при идеально проводящих включениях, $\sigma_{\perp}$ — проводимость вдоль оси *Oy* при изолирующих включениях, то $\sigma_{\parallel}\sigma_{\perp} = 1$. Этой формулой и связаны проводимость среды вдоль идеально проводящих трещин и проводимость среды с таким же ансамблем изолирующих трещин, но ориентированных перпендикулярно полю.

В [22] приведены результаты приближения EMA для проводимости двумерной среды с плоскопараллельной системой трещин. Для среды с проводящими трещинами, параллельными полю, метод EMA дает

$$\sigma = \sigma_2\left(\sqrt{1 + \frac{1}{4}\left(\frac{\pi l^2}{4}\right)^2} + \frac{1}{2}\frac{\pi l^2}{4}\right)^2. \qquad (14)$$

Для изолирующих трещин, перпендикулярных полю, используем выражение, дуальное к предыдущему:

$$\sigma = \sigma_2\left(\sqrt{1 + \frac{1}{4}\left(\frac{\pi l^2}{4}\right)^2} + \frac{1}{2}\frac{\pi l^2}{4}\right)^{-2}. \qquad (15)$$

С этими теоретическими формулами мы и будем сравнивать результаты численных экспериментов.

Проводимость двухкомпонентной среды с плоскопараллельной системой трещин в двумерном случае

Для проверки полученных формул (11) и (13) было проведено моделирование в среде COMSOL Multyphysics проводимости двумерного образца с идеально проводящими и изолирующими трещинами. В качестве образца был взят квадрат со стороной 1 м, удельной проводимостью 1 См/м, к его противоположным сторонам было приложено напряжение 1 В. Протекающий через образец ток при этом численно совпадает с удельной проводимостью образца.

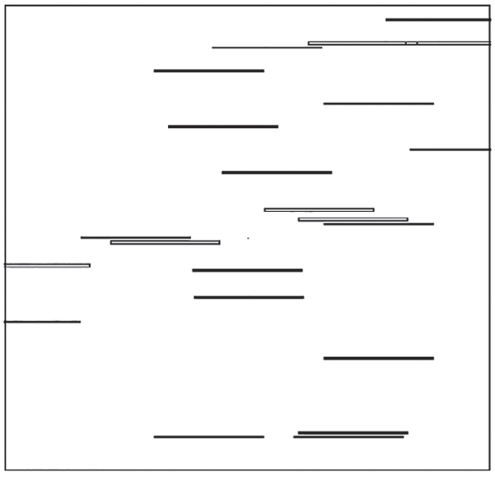

Рис. 1. Случайно расположенные трещины в двумерной модели
Fig. 1. The randomly placed cracks in the 2D model

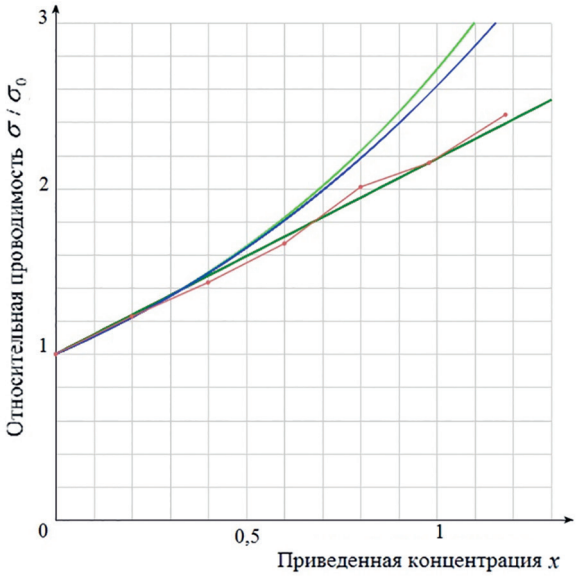

Рис. 2. Проводимость двумерной среды с проводящими трещинами
Fig. 2. Conductivity of the 2D medium with conductive cracks

Это позволило представить результаты в единообразной и удобной для анализа форме. По оси абсцисс на графиках для двумерного случая отложена безразмерная переменная $x = \pi l^2 n/4$, с использованием которой проводимость среды с идеально проводящими $\sigma = \sigma_2 e^x$ (в экспоненциальном приближении), среды с изолирующими трещинами, соответственно, $\sigma = \sigma_2 e^{-x}$.

В первом численном эксперименте координаты геометрических центров трещин выбирались полностью случайно в рамках квадратного образца. Полученный таким образом ансамбль трещин отличается сильной пространственной неоднородностью (рис. 1).

Результаты моделирования проводимости среды с проводящими трещинами представлены на рис. 2. Для удобства удельная проводимость вмещающего компонента принимается равной единице, $\sigma_2 = 1$. Светло-зеленым цветом обозначено предсказание предлагаемого метода добавления единичных включений, синим — предсказание метода EMA, красный график «по точкам» — результат численного эксперимента, темно-зеленый график — линейная аппроксимация $\sigma = 1 + 1{,}18x$. Оказывается, что проводимость среды с такими трещинами не описывается ни предлагаемым методом, ни методом EMA. С ростом концентрации трещин проводимость возрастает гораздо медленнее, и этот рост лучше всего описывается линейной аппроксимацией.

На рис. 3 представлены результаты моделирования проводимости среды с изолирующими трещинами. Светло-зеленым, синим и темно-зеленым цветами обозначены зависимости, дуальные по отношению к зависимостям, предсказываемым для системы проводящих трещин соответственно методом добавления единичных включений, методом EMA и линейной аппроксимацией по данным численного моделирования для проводящих трещин. Здесь вновь видно, что оба теоретических метода совсем не описывают проводимость среды, а выражение $\sigma = (1 + 1{,}18x)^{-1}$, дуальное по

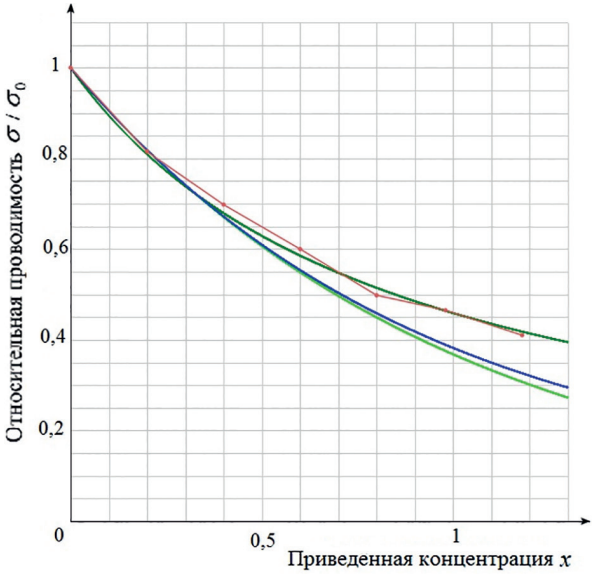

Рис. 3. Проводимость двумерной среды с изолирующими трещинами
Fig. 3. Conductivity of the 2D medium with insulating cracks

отношению к линейному закону, описывает ее весьма точно.

В следующем численном эксперименте была искусственно уменьшена хаотичность системы трещин. Исходный квадратный образец был разделен на 16 равных квадратов, и трещины добавлялись по одной в каждый из квадратов. Координаты центров трещин выбираются случайно, но для каждой внутри своего квадрата. Полученный таким образом ансамбль трещин показан на рис. 4.

Результаты для проводимости этого образца с проводящими трещинами приведены на рис. 5. Теперь уже предсказания метода EMA (синий график) и предлагаемого метода (светло-зеленый график) хорошо описывают реальность. На рис. 6 приведены результаты для проводимости этого же образца с изолирующими трещинами. Цветовые обозначения здесь такие же, как на рис. 3. Два теоретических метода хорошо описывают проводимость среды, имея явное преимущество перед линейной и дуальной к ней аппроксимацией. Также

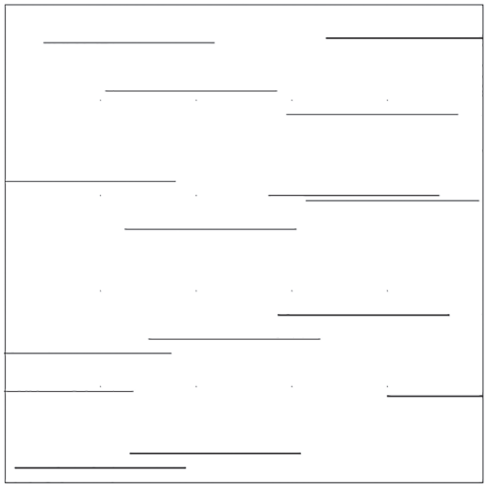

Рис. 4. Двумерная модель с регуляризованным расположением трещин
Fig. 4. The 2D model with regularized cracks pattern

можно отметить, что метод добавления единичных включений, приводящий к экспоненциальным зависимостям для включений сколь угодно сложной формы, имеет перед методом EMA несомненное преимущество простоты.

Отметим, что неожиданная линейная зависимость проводимости от кон-

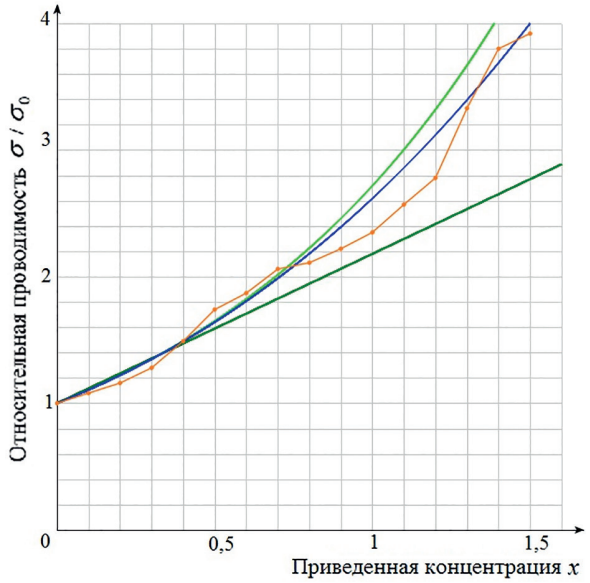

Рис. 5. Проводимость двумерной среды с регуляризованным расположением трещин (проводящий случай)

Fig. 5. Conductivity of the 2D medium with regularized cracks pattern (conductive case)

центрации имеет место только для параллельных трещин. В [21] проведено численное моделирование проводимости двумерного образца с изолирующими трещинами, расположенными под случайными углами от 70° до 90° к

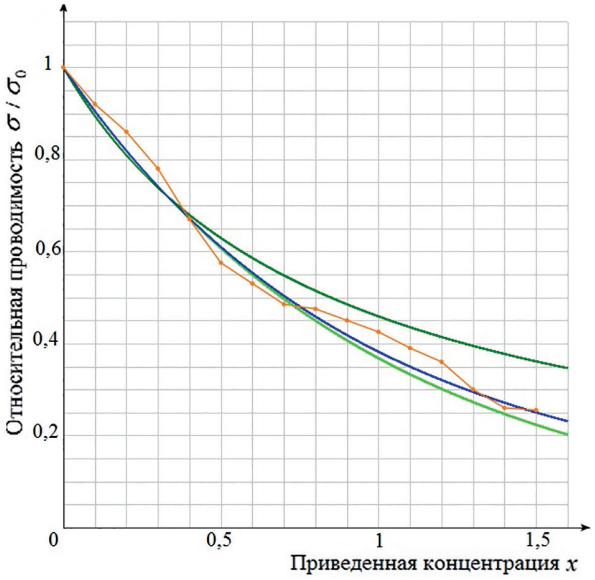

Рис. 6. Проводимость двумерной среды с регуляризованным расположением трещин (изолирующий случай)

Fig. 6. Conductivity of the 2D medium with regularized cracks pattern (insulating case)

электрическому полю. Оказалось, что эта проводимость при случайном расположении центров трещин хорошо описывается экспоненциальным законом. Можно предположить, что близко расположенные трещины «дублируют» друг друга, что приводит к более слабой зависимости проводимости от концентрации трещин. Этот вопрос требует отдельного исследования.

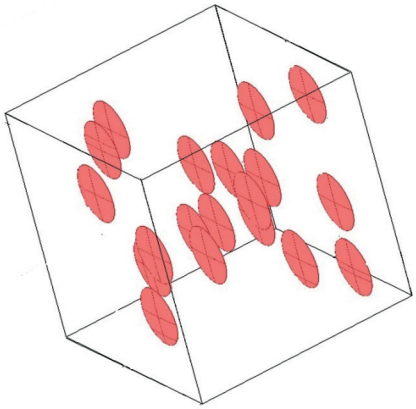

Рис. 7. Случайно расположенные дискообразные трещины в трехмерной модели
Fig. 7. The randomly placed disc-shaped cracks in the 3D model

Проводимость двухкомпонентной среды с плоскопараллельной системой трещин в трехмерном случае

Обратимся теперь к проводимости трехмерной среды с плоскопараллельной системой круговых дискообразных трещин. Предсказания метода EMA в этом случае различаются в зависимости от того, какой выбирается форма «включений» вмещающего компонента [16].

Воспользуемся методом добавления единичных включений. Для нахождения проводимости среды, содержащей включения в виде тонких дисков, эти диски можно приближенно заменить тонкими эллипсоидами.

Такой метод дает для проводимости трехмерного образца с ребром L с идеально проводящими трещинами радиусом r, параллельными полю, при небольшой их концентрации [22]

$$\sigma_e = \sigma_2\left(1+\frac{16}{3}R^3 n\right). \qquad (16)$$

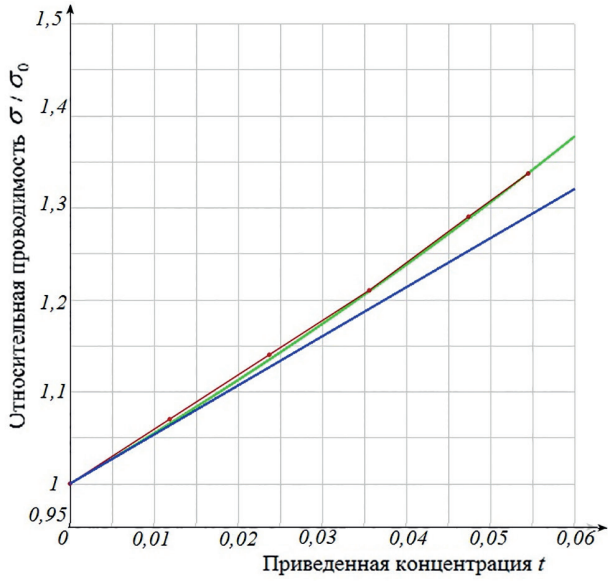

Рис. 8. Проводимость трехмерной среды с проводящими трещинами
Fig. 8. Conductivity of the 3D medium with conductive cracks

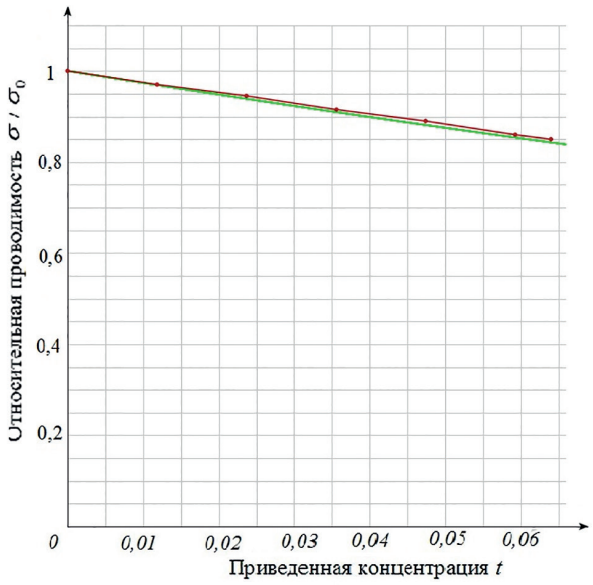

Рис. 9. Проводимость трехмерной среды с изолирующими трещинами
Fig. 9. Conductivity of the 3D medium with insulating cracks

В этом случае $n = N/L^3$ — трехмерная концентрация трещин. Повторяя все рассуждения, примененные выше для двумерного случая, получаем экспоненциальную зависимость

$$\sigma = \sigma_2 e^{\frac{16}{3}R^3 n}. \qquad (17)$$

В случае изолирующих трещин радиусом R, перпендикулярных полю, проводимость при малой концентрации есть [22]:

$$\sigma_e = \sigma_2 \left(1 - \frac{8}{3}R^3 n\right). \qquad (18)$$

Экспоненциальное выражение для проводимости

$$\sigma = \sigma_2 e^{-\frac{8}{3}R^3 n}. \qquad (19)$$

В численном эксперименте координаты центров трещин выбирались случайно. Расположение дискообразных трещин при большой их концентрации показано на рис. 7.

Для описания среды с проводящими трещинами используем безразмерную величину $t = R^3 n$, делающую результаты наглядными и сопоставимыми с двумерным случаем.

Результат для проводящих трещин представлен на рис. 8, для изолирующих — на рис. 9. Цветовые обозначения прежние, только не нужна зависимость, дуальная к линейной.

Видно, что экспоненциальные зависимости очень точно описывают проводимость трещиноватой среды. Они хорошо работают вплоть до такой концентрации параллельных трещин, за которой следует уже разрушение образца (см. рис. 7).

Выводы

1. Метод добавления единичных включений распространен на тонкие трещины. С его помощью получены дифференциальные уравнения для электрической проводимости среды с трещинами и простые экспоненциальные выражения для проводимости среды при немалой концентрации трещин.

2. Для проверки полученных теоретических результатов осуществлено моде-

лирование проводимости трещиноватой породы в среде COMSOL Multiphysics. В двумерном случае трещины моделировались отрезками, в трехмерном случае — тонкими круговыми дисками. Рассматривались идеально проводящие и изолирующие трещины.

3. В двумерном случае при случайном расположении центров проводящих трещин рост проводимости с ростом концентрации трещин оказывается линейным, намного медленнее, чем предсказывают метод EMA и метод добавления единичных включений. Изменение проводимости для среды с изолирующими трещинами оказывается дуальным к изменению проводимости в случае проводящих трещин.

4. При более регулярном расположении трещин проводимость хорошо описывается методом EMA и методом добавления единичных включений.

5. В трехмерном случае проводимость среды как с идеально проводящими, так и с изолирующими трещинами хорошо описывается методом добавления единичных включений.

6. Преимущества предлагаемого метода перед методом перед методом EMA состоят в математической простоте и возможности применения к более широкому классу включений и трещин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Feng P., Zhao J., Dai F., Wei M., Liu B.* Mechanical behaviors of conjugate-flawed rocks subjected to coupled static — dynamic compression // Acta Geotechnica. 2022, vol. 17, no. 5, pp. 1767 — 1784. DOI: 10.1007/s11440-021-01322-6.

2. *Корнев В. М., Зиновьев А. А.* Модель квазихрупкого разрушения горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2013. — № 4. — С. 74 — 82.

3. *Lu J., Jiang C., Jin Z., Wang W., Zhuang W., Yu H.* Three-dimensional physical model experiment of mining-induced deformation and failure characteristics of roof and floor in deep underground coal seams // Process Safety and Environmental Protection. 2021, vol. 150, no. 6, pp. 400 — 415. DOI: 10.1016/j.psep.2021.04.029.

4. *Андриевский А. П.* Методика расчета оптимальных параметров паспортов буровзрывных работ при проходке с прямым щелевым ярусным врубом // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 1992. — № 5. — С. 71 — 77.

5. *Соболев Г. А.* Основы прогноза землетрясений. — М.: Наука, 1993. — 313 с.

6. *Feng P., Dai F., Shuai K., Wei M.* Dynamic mechanical behaviors of pre-fractured sandstone with noncoplanar and unparallel flaws // Mechanics of Materials. 2022, vol. 166, no. 6, article 104219. DOI: 10.1016/j.mechmat.2022.104219.

7. *Chengzhi Qi, Fa Zhao, Dyskin A. V., Chen Xia, Pasternak E.* Crack interaction and fracturing of geomaterials with multiscale cracks // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2022, vol. 153, no. 5, article 105084. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2022.105084.

8. *Ren S., Han T., Fu L., Yan H.* Pressure effects on the anisotropic velocities of rocks with aligned fractures // Acta Geophysica Sinica. 2021, vol. 64, no. 7, pp. 2504 — 2514. DOI: 10.6038/cjg2021O0318DOI: 10.6038/cjg2021O0318.

9. *Anderson I., Ma J., Wu X., Stow D.* Determining reservoir intervals in the Bowland Shale using petrophysics and rock physics models // Geophysical Journal International. 2022, vol. 228, pp. 39 — 65. DOI: 10.1093/gji/ggab334.

10. *Grib N. N., Uzbekov A. N., Imaev V. S., Grib G. V., Abetov A. E.* Variations in the geoelectric properties of the rock masses as a result of the seismic effects of industrial explosions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, vol. 362, no. 1, article 012120. DOI: 10.1088/1755-1315/362/1/012120.

11. *Касахара К.* Механика землетрясений. — М.: Мир, 1985. — 264 с.

12. *Сизин П. Е., Шкуратник В. Л.* Теоретическая оценка влияния микротрещиноватости горных пород на их проводимость в приближении Максвелла // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 3. — С. 212 — 218.

13. *Балагуров Б. Я.* О влиянии формы включений на проводимость двумерных моделей композитов // Журнал технической физики. — 2011. — Т. 81. — № 5. — С. 11—17.

14. *Bruggeman D. A. G.* Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen // Annals of Physics. 1935, vol. 416, pp. 665—679. DOI: 10.1002/andp.19354160802.

15. *Landauer R.* Conductivity of cold-worked metals // Physical Review. 1951, vol. 82, pp. 520—521. DOI: 10.1103/PhysRev.82.520.

16. *Saevik P. N., Jakobsen M., Lien M., Berre I.* Anisotropic effective conductivity in fractured rocks by explicit effective medium methods // Geophysical Prospecting. 2014, vol. 62, no. 6, pp. 1297—1314. DOI: 10.1111/1365-2478.12173.

17. *Жуков В. С.* Влияние межзерновой и трещинной пористости на электросопротивление коллекторов Чаяндинского месторождения (Восточная Сибирь) // Геофизические исследования. — 2022. — Т. 23. — № 2. — С. 5—17. DOI: 10.21455/gr2022.2-1.

18. *Пархоменко Э. И.* Электрические свойства горных пород. — М.: Наука, 1965. — 164 с.

19. *Aguilera R.* Analysis of naturally fractured reservoirs from conventional well log // Journal of Petroleum Technology. 1976, vol. 28, no. 7, pp. 764—772.

20. *Вознесенский А. С., Кидима-Мбомби Л. К.* Формирование синтетических структур и текстур горных пород при их моделировании в среде COMSOL Multiphysics // Горные науки и технологии. — 2021. — Т. 6. — № 2. — С. 67— 72. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-2-65-72.

21. *Сизин П. Е., Вознесенский А. С., Кидима-Мбомби Л. К.* Влияние длины трещин со случайными параметрами на электрическую проводимость горных пород // Горные науки и технологии. — 2023. — Т. 8. — № 1. — С. 30—38. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-07-11.

22. *Балагуров Б. Я.* Электрофизические свойства композитов: Макроскопическая теория. — М.: URSS, 2018. — 752 с.

23. *Сизин П. Е.* Теоретическое и численное моделирование электрической проводимости пористых сред // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 5. — С. 43—56. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_5_0_43. ГИАБ

REFERENCES

1. Feng P., Zhao J., Dai F., Wei M., Liu B. Mechanical behaviors of conjugate-flawed rocks subjected to coupled static—dynamic compression. *Acta Geotechnica*. 2022, vol. 17, no. 5, pp. 1767—1784. DOI: 10.1007/s11440-021-01322-6.

2. Kornev V. M., Zinovyev A. A. Model of quasi-brittle rocks fracture. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2013, no. 4, pp. 74—82. [In Russ].

3. Lu J., Jiang C., Jin Z., Wang W., Zhuang W., Yu H. Three-dimensional physical model experiment of mining-induced deformation and failure characteristics of roof and floor in deep underground coal seams. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021, vol. 150, no. 6, pp. 400—415. DOI: 10.1016/j.psep.2021.04.029.

4. Andrievskij A. P. Design procedure of optimal parameters of drilling and blasting operations certificate under drilling with straight slot tier cut. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 1992, no. 5, pp. 71—77. [In Russ].

5. Sobolev G. A. *Osnovy prognoza zemletryaseniy* [Earthquakes prediction basics], Moscow, Nauka, 1993, 313 p.

6. Feng P., Dai F., Shuai K., Wei M. Dynamic mechanical behaviors of pre-fractured sandstone with noncoplanar and unparallel flaws. *Mechanics of Materials*. 2022, vol. 166, no. 6, article 104219. DOI: 10.1016/j.mechmat.2022.104219.

7. Chengzhi Qi, Fa Zhao, Dyskin A. V., Chen Xia, Pasternak E. Crack interaction and fracturing of geomaterials with multiscale cracks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2022, vol. 153, no. 5, article 105084. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2022.105084.

8. Ren S., Han T., Fu L., Yan H. Pressure effects on the anisotropic velocities of rocks with aligned fractures. *Acta Geophysica Sinica*. 2021, vol. 64, no. 7, pp. 2504—2514. DOI: 10.6038/cjg2021O0318DOI: 10.6038/cjg2021O0318.

9. Anderson I., Ma J., Wu X., Stow D. Determining reservoir intervals in the Bowland Shale using petrophysics and rock physics models. *Geophysical Journal International*. 2022, vol. 228, pp. 39—65. DOI: 10.1093/gji/ggab334.

10. Grib N. N., Uzbekov A. N., Imaev V. S., Grib G. V., Abetov A. E. Variations in the geoelectric properties of the rock masses as a result of the seismic effects of industrial explosions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019, vol. 362, no. 1, article 012120. DOI: 10.1088/1755-1315/362/1/012120.

11. Kasakhara K. *Mekhanika zemletryaseniy* [Earthquake mechanics], Moscow, Mir, 1985, 264 p.

12. Sizin P. E, Shkuratnik V. L. Theoretical estimation of microcracks influence on rocks conductivity with Maxwell approximation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. 3, pp. 212 — 218. [In Russ].

13. Balagurov B. Ya. On the influence of the shape of inclusions on the conductivity of two-dimensional models of composites. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2011, vol. 81, no. 5, pp. 11 — 17. [In Russ].

14. Bruggeman D. A. G. Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen. *Annals of Physics*. 1935, vol. 416, pp. 665 — 679. DOI: 10.1002/andp.19354160802.

15. Landauer R. Conductivity of cold-worked metals. *Physical Review*. 1951, vol. 82, pp. 520 — 521. DOI: 10.1103/PhysRev.82.520.

16. Saevik P. N., Jakobsen M., Lien M., Berre I. Anisotropic effective conductivity in fractured rocks by explicit effective medium methods. *Geophysical Prospecting*. 2014, vol. 62, no. 6, pp. 1297 — 1314. DOI: 10.1111/1365-2478.12173.

17. Zhukov V. S. Influence of intergranular and fractured porosity on the electrical resistivity of the reservoirs of the Chayandinskoye field (Eastern Siberia). *Geofizicheskie Issledovaniya*. 2022, vol. 23, no. 2, pp. 5 — 17. [In Russ]. DOI: 10.21455/gr2022.2-1.

18. Parkhomenko E. I. *Elektricheskie svoystva gornykh porod* [Electrical properties of rocks], Moscow, Nauka, 1965, 164 p.

19. Aguilera R. Analysis of naturally fractured reservoirs from conventional well log. *Journal of Petroleum Technology*. 1976, vol. 28, no. 7, pp. 764 — 772.

20. Voznesensky A. S., Kidima-Mbombi L. K. Formation of synthetic structures and textures of rocks when simulating in COMSOL Multiphysics. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021, vol. 6, no. 2, pp. 67 — 72. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-2-65-72.

21. Sizin P. E., Voznesenskii A. S., Kidima-Mbombi L. K. Influence of random parameter joint length on rock electrical conductivity. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023, vol. 8, no. 1, pp. 30 — 38. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-07-11.

22. Balagurov B. Ya. *Elektrofizicheskie svoystva kompozitov: Makroskopicheskaya teoriya* [Electrophysical properties of composites: Macroscopic theory], Moscow, URSS, 2018, 752 p.

23. Sizin P. E. Theoretical and numerical modeling of electric conductance in porous media. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 5, pp. 43 — 56. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_5_0_43.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Сизин Павел Евгеньевич — канд. физ.-мат. наук,
доцент, НИТУ МИСИС, e-mail: mstranger@list.ru,
ORCID ID: 0000-0001-8156-4972.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

P.E. Sizin, Cand. Sci. (Phys. Mathem.),
Assistant Professor, NUST MISIS,
119049, Moscow, Russia, e-mail: mstranger@list.ru,
ORCID ID: 0000-0001-8156-4972.

Получена редакцией 30.10.2023; получена после рецензии 20.02.2024; принята к печати 10.07.2024.
Received by the editors 30.10.2023; received after the review 20.02.2024; accepted for printing 10.07.2024.