



СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-07-11>

УДК 622.83:550.83

Влияние длины трещин со случайными параметрами на электрическую проводимость горных породП. Е. Сизин  , А. С. Вознесенский   , Л. К. Кидима Мбомби 

Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация

 al48@mail.ru**Аннотация**

При решении практических задач горного производства возникает необходимость оценки трещинной пустотности горных пород. Геофизические методы при решении данной задачи являются косвенными, поэтому интерпретация результатов может вызывать определенные трудности, обусловленные непрозрачностью физических связей между параметрами трещин и результатами измерений. В этой связи одним из путей решения данной проблемы является сочетание экспериментальных методов исследования с аналитическим и численным моделированием. Исследования были направлены на изучение электрической проводимости двумерной среды при наличии тонких изолирующих трещин. В статье предложен аналитический метод оценки зависимости удельной проводимости среды с включениями в виде эллиптических трещин от их полудлины. Показано, что данная зависимость имеет вид экспоненты, зависящей от квадрата длины максимальной полуоси в качестве аргумента. Метод моделирования основан на допущении эллиптической формы трещины при устремлении к нулю длины малой полуоси эллипсов. Анализ публикаций и результаты, изложенные в статье, показали, что такой метод нахождения удельной проводимости среды с тонкими трещинами один из наилучших в плане соответствия экспериментальным данным. Его предсказания близки к предсказаниям метода эффективной среды (ЕМА), но он отличается простотой формул и их физической наглядностью, что существенно для использования при интерпретации данных физического эксперимента. В двумерной постановке проведено численное моделирование в среде COMSOL Multiphysics удельной электрической проводимости образца среды размером 1×1 м с эллиптическими трещинами меньшей, чем у матрицы, проводимости. Рассмотрен квадратный образец единичных размеров с единичной проводимостью, в котором помещалось 25 трещин, имевших равномерное распределение по длине. Было построено 40 моделей, в которых максимальная длина трещин менялась от 0,01 до 0,4 размера образца, с шагом 0,01 м. Показано удовлетворительное соответствие результатов численной и аналитической моделей как визуальное, так и подтвержденное с помощью статистических оценок. Отмечено, что при изменении размера трещин до значения максимальной полуоси $a = 0,15$ м преобладает влияние одиночных трещин, не выходящих за границы образца. Выше этого значения при $a > 0,15$ м начинает сказываться влияние слияния трещин, а также их выхода на границы и за пределы образца. Сравнение предложенной теоретической модели электрической проводимости, зависящей от квадрата длины максимальной полуоси трещины, с похожей моделью в виде экспоненты с линейной зависимостью показало лучшее соответствие предложенной модели на стадии отсутствия слияния трещин и их выхода на границы образца при $a < 0,15$ м. При $a > 0,15$ м предложенная модель имеет меньший коэффициент детерминации по сравнению с полным диапазоном, включающим оба участка, но более высокий, чем у модели с линейной зависимостью в аргументе экспоненты, что говорит об универсальном характере предложенной модели.

Ключевые слова

электрическое сопротивление, длина трещины, численный, аналитический, моделирование, COMSOL Multiphysics

Для цитированияSizin 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;8(1):30–38. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-07-11>



MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research paper

Influence of random parameter joint length on rock electrical conductivity

P. E. Sizin  , A. S. Voznesenskii   , L. K. Kidima-Mbombi 

University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

 al48@mail.ru**Abstract**

Rock joint hollowness coefficient is an important parameter when resolving practical mining problems. Geophysical methods used to resolve this problem are indirect. Thus the interpretation of their results may cause certain difficulties as a result of the uncertainty of the physical relationships between the parameters of joints and the measurement results. One of the ways to resolve this problem is to combine experimental research methods with analytical and numerical simulation. The studies were aimed at investigating the electrical conductivity of a two-dimensional medium in the presence of thin insulating (non-conducting) joints. This paper proposes an analytical method for assessing the dependence of the specific conductivity of a medium with inclusions in the form of elliptical joints on their half-length. This dependence is shown to have the form of an exponent depending on the square of the length of the maximum semi-axis as an argument. The simulation method is based on the assumption of the elliptical shape of a joint when the length of the minor semi-axis of the ellipses tends to zero. A review of publications and their results presented in this paper showed that this method for determining the specific conductivity of the medium with thin joints is one of the best in terms of compliance with experimental data. Its predictions are close to those of the Effective Media Approximation (EMA). However, the proposed method is distinguished by the simplicity of the formulas and their physical visibility essential for the use in interpreting the data of a physical experiment. In two-dimensional formulation, numerical simulation of the specific electrical conductivity of a sample of a medium measuring 1×1 m with elliptical joints of conductivity less than that of the matrix was carried out in the COMSOL Multiphysics environment. A square sample of unit sizes with unit conductivity was considered in which 25 joints with uniform distribution along the length occurred. 40 models were built wherein the maximum length of the joints varied from 0.01 to 0.4 sample size in increments of 0.01 m. The satisfactory concordance of the results of numerical and analytical models, both visual and confirmed by statistical estimates, has been shown. It was noted that when the size of the joints changes to achieve the value of the maximum semi-axis $a = 0.15$ m, the influence of single joints that do not extend beyond the boundaries of the sample prevails. Above this value, at $a > 0.15$ m, the influence of joint coalescence, as well as their extension to and beyond the sample boundaries begins to affect. Comparison of the proposed theoretical model of electrical conductivity, depending on the square of the length of the maximum semi-axis of a joint, with a similar model in the form of an exponent with a linear dependence showed a better concordance of the proposed model with observations at the stage of the lack of joint coalescence and their extension to the sample boundaries at $a < 0.15$ m. At $a > 0.15$ m. The proposed model has a lower coefficient of determination compared to the full range including both intervals, but higher than that of the model with a linear dependence in the exponent argument. This indicates the universal nature of the proposed model.

Keywords

electrical resistance, joint length, numerical, analytical, simulation, COMSOL Multiphysics

For citation

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;8(1):30–38. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-07-11>

Введение

Актуальность темы оценки параметров трещинной пустотности горных пород вытекает из необходимости решения задач прочности [1–4], устойчивости пород вокруг горных выработок [5–7], гидроразрыва породных массивов [8–10], фильтрации флюида через массив [11, 12], расчета параметров бурения и взрыва [13–15], а также из других практических задач горного производства. Для определения трещиноватости используют геологические [16–18], маркшейдер-

ские [19–21], видеометоды [22, 23]. Особое место здесь занимают геофизические методы [24–26]. Среди них значительное место отводится электромагнитным [27] и электрическим [28] методам. Несмотря на значительные преимущества электрических методов исследования трещиноватости горных пород, они имеют и ряд недостатков. Геофизические методы являются косвенными, поэтому интерпретация результатов может вызывать определенные трудности, обусловленные непрозрачностью физических связей между параме-



трами трещин и результатами измерений. В этой связи одним из путей решения данной проблемы является сочетание экспериментальных методов исследования с аналитическим и численным моделированием. В качестве примера можно привести работу [29], где показана теоретическая возможность аналитического расчета зависимости между трещиноватостью и электросопротивлением горных пород.

Задача о сопротивлении образца с трещинами сводится в конечном счёте к задаче о проводимости двухкомпонентной среды, состоящей из сплошного компонента (матрицы) и компонента, представленного отдельными включениями. При небольшой концентрации включений такая проводимость находится легко [30]. Она связана с концентрацией включений по линейному закону. Для немалых концентраций наилучшим методом считается приближение эффективной среды (effective media approximation, ЕМА) [31–33]. Изначально разработанное для «объёмных» включений (сфер в трёхмерном пространстве, кругов, квадратов и т. д. в двумерных задачах), оно затем было модифицировано для случая «бестелесных» включений, например, бесконечно тонких дисков в трёхмерном случае и «царапин» в двумерном [34]. Такой подход позволяет, в частности, моделировать электрическую проводимость горных пород, содержащих трещины. При этом в реальных горных породах трещины могут быть как пустыми или содержащими низкопроводящие жидкости (нефть), так и заполненными раствором солей (высокопроводящим флюидом) [35]. В первом случае трещины следует считать изолирующими, во втором – практически идеально проводящими, когда проводимость флюида на несколько порядков выше проводимости вмещающей его горной породы [29]. В настоящей работе используется модель «сухих» или заполненных флюидами трещин с проводимостью, составляющей 10^{-4} от проводимости минеральной матрицы. Следует отметить также, что при некоторой достаточно высокой концентрации включений происходит перколяция, когда они перекрываются, образуя непрерывный проводящий или изолирующий кластер [36–38]. Однако в первую очередь столь высокие концентрации трещин не будут рассматриваться, поскольку при приближении к перколяционному порогу наступает механическое разрушение образца.

Целью настоящей работы являются разработка аналитической и численной моделей зависимостей электросопротивления образца горной породы от размеров трещин и сравнение между собой результатов моделирования этими методами, а также с результатами, полученными в физическом эксперименте на образцах горных пород.

2. Методы исследования

2.1. Аналитический метод

Рассмотрим задачу о проводимости двумерной среды с тонкими трещинами (в пределе – царапинами нулевой толщины). Для случая малой концентрации царапин, перпендикулярных градиенту приложенного напряжения (и направлению электрического тока), получаем [34]

$$\sigma = \sigma_0 \left(1 - \pi \left(\frac{l}{2} \right)^2 N \right), \quad (1)$$

где σ_0 – проводимость среды без трещин; $l/2$ – «радиус» трещины, равный половине её длины; N – двумерная концентрация трещин. В случае хаотической ориентации трещин (равномерного распределения по углу) вклад этих трещин в проводимость уменьшается в два раза:

$$\sigma = \sigma_0 \left(1 - \frac{\pi l^2}{8} N \right).$$

Причина этого заключается в том, что при усреднении проводимости по статистическому ансамблю трещин одна из двух координатных осей не даёт вклада: изолирующие трещины, ориентированные параллельно току, сколь-нибудь заметно не влияют на проводимость.

Заметим, что при наличии в квадратном образце со стороной L и проводимостью σ_0 ровно одной трещины длиной l , перпендикулярной полю, концентрация $N = 1/L^2$, а проводимость образца

$$\sigma = \sigma_0 \left(1 - \frac{\pi l^2}{4L^2} \right).$$

Пусть теперь квадратный образец со стороной L содержит n трещин, перпендикулярных приложенному напряжению, и имеет проводимость σ . Поместим в этот образец ещё одну такую же трещину. При этом приращение проводимости образца

$$\Delta\sigma = -\sigma \frac{\pi l^2}{4L^2}.$$

Таким образом, получаем дифференциальное уравнение ($\Delta n = 1$)

$$\frac{\Delta\sigma}{\Delta n} = -\sigma \frac{\pi l^2}{4L^2}, \quad (2)$$

решением которого является

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\pi l^2 n}{4L^2}},$$

где использовано очевидное начальное условие: проводимость при отсутствии трещин равна σ_0 . С учетом двумерной концентрации трещин это решение можно записать в виде

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\pi l^2 N}{4}}. \quad (3)$$

Пусть теперь длины трещин распределены равномерно в интервале от 0 до l . В этом случае среднее значение квадрата длины трещины составляет $l^2/3$. Этой величиной и будет определяться средний вклад отдельной трещины в изменение проводимости. Тогда исходное дифференциальное уравнение следует заменить на

$$\frac{\Delta\sigma}{\Delta n} = -\sigma \frac{\pi l^2}{12L^2},$$

и для проводимости образца получаем

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\pi l^2}{12L^2}n},$$

или с учётом концентрации трещин в двумерном случае $N = n/L^2$

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\pi l^2}{12}N}. \quad (4)$$

Часто бывает удобно использовать половину длины трещины $a = l/2$ (аналогично радиусу кругового включения), и тогда

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\pi a^2}{3}N}. \quad (5)$$

Если обозначить $A = \pi N/3$, формула (3) принимает вид

$$\sigma = \sigma_0 e^{-Aa^2}. \quad (6)$$

Параметр A имеет физический смысл эффективной концентрации трещин и может быть найден из численного или физического эксперимента.

Следует отметить, что в [36] с помощью метода ЕМА для проводимости двумерной среды с параллельными изолирующими трещинами получено выражение

$$\sigma = \sigma_0 \left(\sqrt{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\pi l^2}{4} N \right)^2} - \frac{1}{2} \frac{\pi l^2}{4} N \right). \quad (7)$$

Это выражение при не очень больших концентрациях трещин, вплоть до

$$\frac{\pi l^2}{4} N \approx 1,$$

очень близко к (3), но (3) гораздо проще, удобнее для анализа и имеет наглядный физический смысл.

2.2. Численный метод

Методология построения геометрии и задания свойств и граничных условий модели при использовании этого метода изложена в [39]. Особенностью такого подхода являлось построение геометрии, свойств, граничных условий модели с помощью программных скриптов. Изменение параметров трещин в каждой конкретной модели достигалось с помощью изменения значений переменных, используемых для задания длины, положения, угла наклона эллипсов, моделировавших трещины. Эти параметры менялись в заданных пределах с использованием генератора случайных чисел с равномерным распределением.

Моделирование осуществлялось в среде COMSOL Multiphysics в связке с Matlab, в котором записывался скрипт и в который вносились изменения в соответствии с необходимыми параметрами трещин. На рис. 1 для примера показан чертеж одной из моделей. Моделирование осуществлялось в безразмерных относительных единицах. Поскольку результаты для электрической проводимости и сопротивления удобнее всего представлять в относительных величинах, при моделировании использовалась следующая методика. Образец породы выбирался в виде квадрата со стороной 1 м, с удельной проводимостью 1 См/м.

На две противоположные стороны подавалось напряжение 1 В. При отсутствии трещин ток в образце составлял 1 А. При добавлении трещин ток становился менее 1 А. В силу закона Ома он численно совпадал как с проводимостью, так и с удельной проводимостью трещиноватой породы.

Всего было использовано 40 моделей при изменении полудлин трещин от 0,01 до 0,4 м. Еще одна модель была без трещин и соответствовала случаю $a/2 = 0$. Малая полуось трещин 0,01 м, большая полуось в соответствии с равномерным распределением менялась в пределах от 0,01 м до величины, назначаемой в серии опытов в пределах от 0,01 до 0,4 м. Наклоны трещин менялись в пределах $\pm 20^\circ$. Количество трещин в образце было равно 25. Максимальные смещения центров эллипсов от регулярной сетки по горизонтали и вертикали при равномерном их распределении составляли $\pm 0,2DX$ и $\pm 0,5DY$, где DX, DY – средние расстояния между центрами трещин по осям X и Y соответственно. При некоторых сочетаниях размеров и смещений трещин относительно их центров они могли частично или полностью выйти за пределы контура образца, при этом их общее количество было меньше указанного значения. Кроме того, слияние трещин приводило к уменьшению их эквивалентного числа, когда несколько соединенных между собой трещин приводили к действию, эквивалентному действию одной трещины большей длины. Удельная проводимость минеральной матрицы 1 См/м, материала трещин 10^{-4} См/м. Граничные условия: на верхней грани задан потенциал $V_0 = 1$ В, на нижней грани $V_0 = 0$ В, «земля». На боковых гранях задана нулевая проводимость $\sigma = 0$ См/м, изоляция.

Для решения в системе COMSOL Multiphysics при моделировании использовался статический решатель, позволяющий получить распределения токов и напряжений в установленном режиме.

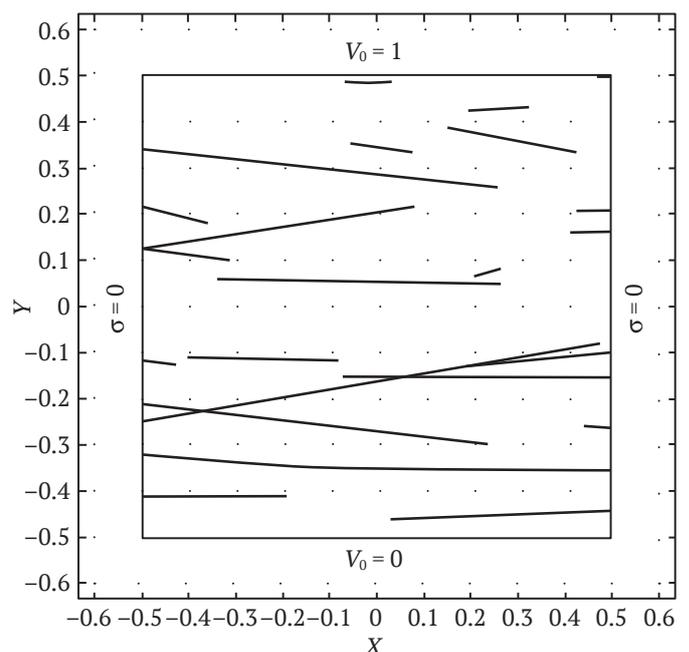


Рис. 1. Пример схемы 2D-модели для численного эксперимента

3. Результаты

На рис. 2 представлены примеры результатов моделирования протекания тока через образец без трещин (а), с эллиптическими трещинами полудлиной от 0,01 до 0,1 м (б), от 0,01 до 0,2 м (в), от 0,01 до 0,5 м (г). Линии тока красного цвета наглядно демонстрируют действие трещин, представляющих собой «запруды» для протекающего тока.

На графике на рис. 3 в виде отдельных точек представлены зависимости проводимости образца, полученные с помощью расчетов методом конечных элементов. Для аппроксимации полученных результатов использована формула (6).

Внешне обращает на себя удовлетворительная сходимость теоретической и экспериментальной зависимостей друг с другом. Ниже приведены количественные оценки такой сходимости.

4. Обсуждение результатов

При отсутствии в образце трещин линии тока на рис. 2, а равномерно распределены по пространству образца вдоль горизонтальной оси, а электрический потенциал имеет равномерное изменение вдоль вертикальной оси. Этот случай на графике рис. 3 соответствует значению полудлины трещин $a/2 = 0$. Присутствие трещин горизонтального направления на рис. 2, б увеличивает длину линий тока. Это является причиной уменьшения проводимости при увеличении $a/2$. При значительном увеличении длины трещин вплоть до полного пересечения образца на рис. 2, г длина линий тока увеличивается в значительной степени, существенно меняя свою конфигурацию по сравнению с ненарушенным образцом на рис. 2, а. При этом электрический потенциал имеет скачкообразное изменение в местах трещин. Поскольку чис-

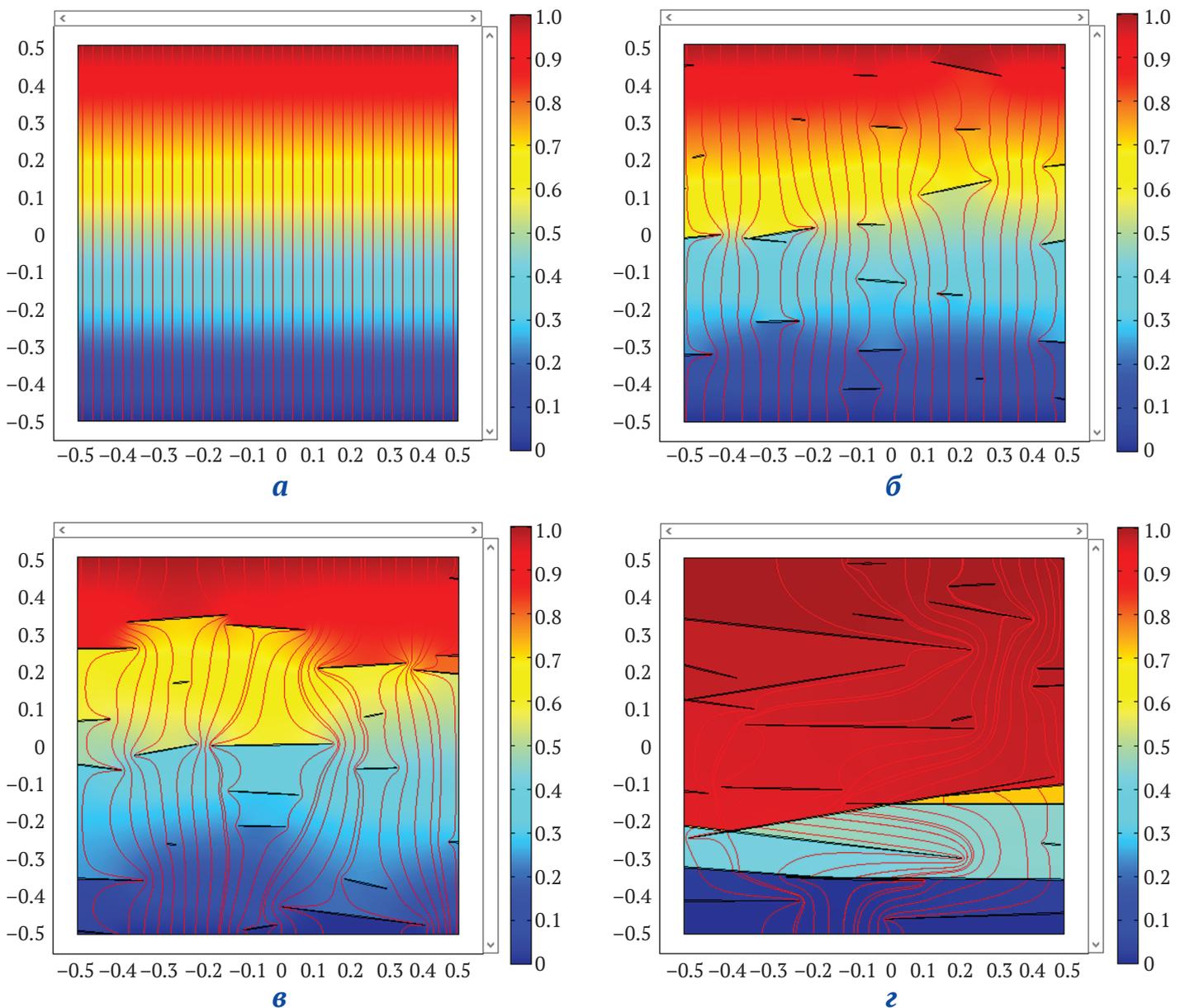


Рис. 2. Линии тока (красные линии) и распределение электрического потенциала относительно нижней границы в соответствии со шкалами справа

ленная модель включает вероятностное распределение параметров трещин, экспериментальные точки на рис. 3 имеют случайные отклонения от аналитической кривой. При этом до величины $a/2 = 0,15$ (м) точки расположены ближе к аналитической кривой, чем при больших значениях $a/2$. Это связано с тем, что здесь начинает сказываться выход высокоомных трещин за границы образца, а также их слияние (перколяция), приводящее к значительным искривлениям линий тока.

Экспериментальные точки хорошо описываются зависимостью (6), параметр A которой подобран с помощью пакета Statistica по критерию наименьших квадратов

$$y = \exp(-21,23x^2),$$

где $x = a/2$ – максимальная величина большой полуоси эллиптической трещины, она менялась от 0,01 до 0,4; $y = \sigma/\sigma_0$ – относительная проводимость образца; σ_0 – проводимость образца без трещин. В данном случае параметр $A = 21,33$, что соответствует эквивалентному числу трещин $N_{\text{экв}} = 3A/\pi = 20,4$. Это число заметно меньше 25 – истинного количества трещин в образце. Это объясняется тем, что при немалых размерах трещин часть из них сливается друг с другом или попадает на границы образца. Коэффициент детерминации результатов численного моделирования при аппроксимации $R^2 = 0,977$, среднеквадратическое отклонение СКО = 0,0494 См/м, что отражает случайный характер параметров трещин и меньше 10% среднего значения проводимости 0,5 См/м) в эксперименте. Для начального участка кривой, где не сказывается влияние краевых эффектов и слияния трещин, эта величина значительно меньше.

В соответствии с этим для более детального анализа весь диапазон значений полуудлин трещин a был разбит на два участка: $0 \leq a < 0,15$ м (участок 1) и $0,15 \leq a \leq 0,40$ м (участок 2), для которых отдельно были проведены статистические оценки.

Интересно сравнить полученные результаты с экспериментальными. В [40] рассмотрены результаты исследования проводимости образцов пород-коллекторов Чаяндинского месторождения. Зависимость изменения удельной электропроводности от доли трещинной пористости аппроксимировалась экспонентой

$$y = a_0 \exp(-a_1 x), \tag{8}$$

где a_0, a_1 – параметры экспоненциальной зависимости. График зависимости по формуле (8) в сравнении с результатами численного эксперимента приведен на рис. 4. При этом $a_0 = 1,179$; $a_2 = 5,251$.

Как следует из сравнения рис. 4 с рис. 3, визуально аппроксимация зависимостью (8) хуже, чем зависимостью (6). Если кривая экспериментальных данных на первом участке выгнута вверх, то зависимость (8) выгнута вниз. На втором участке кривая (8) проходит выше экспериментальных точек, хотя на этом участке кривизна хода обеих кривых совпадает.

В табл. 1 приведены результаты аппроксимации полученных результатов по формулам (6) и (8). Для формулы (6) приведены также значения параметра A

и расчетные значения эквивалентного количества трещин $N_{\text{экв}}$. Следует отметить, что расчеты по формуле (7) дали результаты, близкие к результатам формулы (6), поэтому в табл. 1 они отдельно не приведены. Для формулы (8) значения параметра A не рассчитывались, т. к. эта модель отличалась от модели (6) по своей сути.

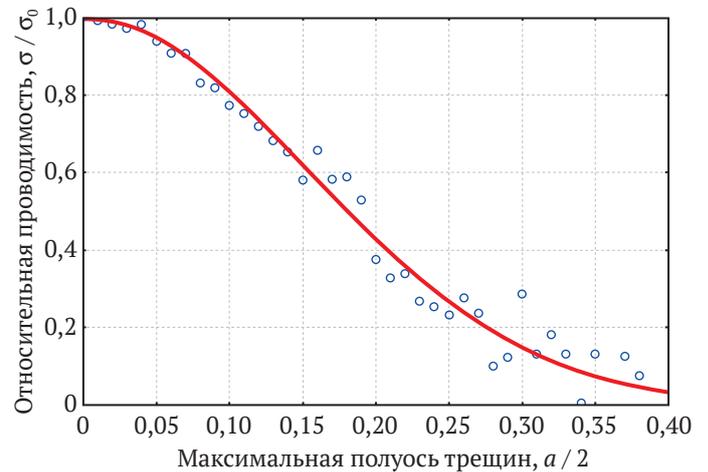


Рис. 3. Зависимости проводимости образца от длины трещин, полученные численным методом (полые кружки) и аппроксимацией по формуле (6) (сплошная линия)

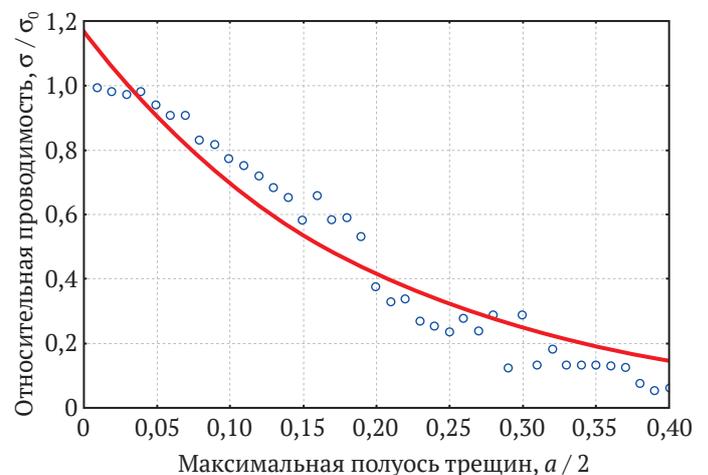


Рис. 4. Аппроксимация экспериментальных точек зависимостью (8)

Таблица 1

Показатели аппроксимации результатов численного моделирования по формулам (6) и (8)

Номер формулы	Участки	R^2	СКО	A	$N_{\text{экв}}$
(6)	1+2	0,979	0,014	20,34	21,30
	1	0,987	0,00014	23,32	24,42
	2	0,901	0,016	19,96	20,90
(8)	1+2	0,935	0,044	–	–
	1	0,932	0,0036	–	–
	2	0,922	0,012	–	–



Как следует из табл. 1, формула (8) дает худшие результаты по сравнению с формулой (6). Так, для полной кривой (8) и для ее первого участка коэффициент детерминации R^2 ниже, а СКО выше, чем для кривой (6). Для второго участка, где начинают сказываться перекрытия трещин и их выход за пределы образца, это различие меньше, но все равно значительно.

В упомянутой статье [40] автор поясняет, что зависимость вида (8) использована для аппроксимации трещин в реальных образцах. Такие образцы имеют достаточно развитую систему трещин, которые в значительной части перекрываются между собой, а также имеют выход за пределы образца. Этот фактор является преобладающим при описании рассматриваемых зависимостей, и зависимость (8) для этого случая является приемлемой.

Таким образом, можно сделать вывод о приемлемости формулы (6) для описания зависимости между размерами трещин и проводимостью образца горной породы в случае «сухих» или заполненных низкопроводящей жидкостью трещин при их малой концентрации до проявления перколяционных явлений.

Заключение

1. Предложен аналитический метод оценки зависимости удельной электрической проводимости среды с включениями в виде эллиптических тонких трещин от их полудлины. Показано, что данная зависимость имеет вид экспоненты, зависящей от квадрата длины максимальной полуоси в качестве аргумента. Метод моделирования основан на допущении эллиптической формы трещины при устремлении к нулю длины малой полуоси эллипсов. Анализ публикаций и результаты, изложенные в статье, показали,

что такой метод нахождения удельной проводимости среды с тонкими трещинами один из наилучших в плане соответствия экспериментальным данным. Его предсказания близки к предсказаниям метода эффективной среды (ЕМА), но он отличается простотой формул и их физической наглядностью, что существенно для использования при интерпретации данных физического эксперимента.

2. В двумерной постановке проведено численное моделирование в среде COMSOL Multiphysics удельной электрической проводимости образца среды размером 1×1 м с эллиптическими трещинами меньшей, чем у матрицы, проводимости. Показано соответствие результатов численной и аналитической моделей как визуальное, так и подтвержденное с помощью статистических оценок. Отмечено, что при изменении размера трещин до значения максимальной полуоси $a = 0,15$ м преобладает влияние одиночных трещин, не выходящих за границы образца. Выше этого значения начинает сказываться влияние слияния трещин и их выхода на границы и за пределы образца.

3. Сравнение предложенной теоретической модели электрической проводимости, зависящей от квадрата длины максимальной полуоси эллиптической трещины, с похожей моделью в виде экспоненты с линейной зависимостью от полудлины трещины показало лучшее соответствие предложенной модели на стадии отсутствия слияния трещин и их выхода на границы образца при $a < 0,15$ м. При $a > 0,15$ м предложенная модель имеет меньший коэффициент детерминации по сравнению с полным диапазоном, включающим оба участка, но более высокий, чем у модели с линейной зависимостью в аргументе экспоненты, что говорит об универсальном характере предложенной модели.

Список литературы / References

1. Feng P., Zhao J., Dai F. et al. Mechanical behaviors of conjugate-flawed rocks subjected to coupled static-dynamic compression. *Acta Geotechnica*. 2022;17(5):1765–1784. <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01322-6>
2. Feng P., Dai F., Shuai K. et al. Dynamic mechanical behaviors of pre-fractured sandstone with noncoplanar and unparallel flaws. *Mechanics of Materials*. 2022;166:104219. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2022.104219>
3. Yan Z., Dai F., Liu Y. et al. Experimental investigation of pre-flawed rocks under combined static-dynamic loading: Mechanical responses and fracturing characteristics. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021;211:106755. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106755>
4. Qi C., Xia C., Dyskin A. et al. Effect of crack interaction and friction on the dynamic strength of rock-like materials with many cracks. *Engineering Fracture Mechanics*. 2021;257:108006. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.108006>
5. Gao M., Xie J., Gao Y. et al. Mechanical behavior of coal under different mining rates: A case study from laboratory experiments to field testing. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2021;31(5):825–841. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2021.06.007>
6. Lu J., Jiang C., Jin Z. et al. 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;150:400–415. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.04.029>
7. Li T., Chen G., Li Y. et al. Study on Progressive Instability Characteristics of Coal-Rock Composite Structure with the Different Height Ratios. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2022;40(3):1135–1148. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01947-0>
8. Serdyukov S., Patutin A., Rybalkin S.L. et al. Directional hydraulic fracturing based on tensile loading. In: *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management – SGEM. International Multidisciplinary Scientific Geoconference*. 2017;17(13):269–274. <https://doi.org/10.5593/sgem2017/13/S03.034>



9. Ingles J., Lamouroux C., Soula J.C. et al. Nucleation of ductile shear zones in a granodiorite under greenschist facies conditions, Neouvielle massif, Pyrenees, France. *Journal of Structural Geology*. 1999;21(5):555–576. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(99\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(99)00042-5)
10. Economides M.J., Mikhailov D.N., Nikolaevskiy V.N. On the problem of fluid leakoff during hydraulic fracturing. *Transport in Porous Media*. 2007;67(3):487–499. <https://doi.org/10.1007/s11242-006-9038-7>
11. Khramchenkov M.G., Korolev E.A. Dynamics of fractures growth in oil saturated carbonate beds of the Republic of Tatarstan. *Neftyanoe Khozyaistvo*. 2017;(4):54–57. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-4-54-57>
12. Petrov V.A., Lespinasse M., Poluektov V.V. et al. Rescaling of fluid-conducting fault structures. *Doklady Earth Sciences*. 2017;472(2):130–133. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17020027>
13. Matray J.M., Savoye S., Cabrera J. Desaturation and structure relationships around drifts excavated in the well-compacted Tournemire's argillite (Aveyron, France). *Engineering Geology*. 2007;90(1–2):1–16. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.09.021>
14. 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;(5):71–76.
15. Kononenko M., Khomenko O., Savchenko M. et al. Method for calculation of drilling-and-blasting operations parameters for emulsion explosives. *Mining of Mineral Deposits*. 2019;13(3):22–30. <https://doi.org/10.33271/mining13.03.022>
16. Krstic S., Ljubojev M., Ljubojev V. et al. Monitoring the stability of the rock mass excavating of underground premises in the ore body t1, jama bor. In: *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management – SGEM. International Multidisciplinary Scientific Geoconference*. 2014;2(1):613–619. <https://doi.org/10.5593/sgem2014/b12/s2.078>
17. Sudarikov A.E., Merkulova V.A. Specifics of calculating the stability of mine workings when applying drilling and blasting. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017;12(21):6192–6196. URL: https://arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2017/jeas_1117_6471.pdf
18. Abaturova I., Savintsev I., Korchak S. Assessment of risk of development of contingency situations on railway tracks. In: *Engineering and Mining Geophysics 2018 – 14th Conference and Exhibition. European Association of Geoscientists and Engineers*. 2018. P. 137600. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201800545>
19. Nurpeisova M.B., Kirgizbayeva D.M., Kopzhasaruly K. Innovative methods of the rock massif fractures survey and treatment of its results. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2016;(2):11–18.
20. Levytskyi V., Sobolevskiy R., Zawieska D. et al. The accuracy of determination of natural stone cracks parameters based on terrestrial laser scanning and dense image matching data. In: *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. 2017;17(23):255–262. <https://doi.org/10.5593/sgem2017/23/S10.031>
21. Golik V., Stas G., Morkun V. et al. Study of rock structure properties during combined stopping and development headings. In: *The International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2020)*. 2020;166:03006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016603006>
22. Tian W.L., Yang S.Q., Dong J.P. et al. An experimental study on triaxial failure mechanical behavior of jointed specimens with different JRC. *Geomechanics and Engineering*. 2022;28(2):181–195. <https://doi.org/10.12989/gae.2022.28.2.181>
23. Fan X., Yu H., Deng Z. et al. Cracking and deformation of cuboidal sandstone with a single non-penetrating flaw under uniaxial compression. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2022;119:103284. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103284>
24. Ren S., Han T., Fu L. et al. Pressure effects on the anisotropic velocities of rocks with aligned fractures. *Acta Geophysica Sinica*. 2021;64(7):2504–2514. (In Chinese) <https://doi.org/10.6038/cjg202100318>
25. Anderson I., Ma J., Wu X. et al. Determining reservoir intervals in the Bowland Shale using petrophysics and rock physics models. *Geophysical Journal International*. 2022;228(1):39–65. <https://doi.org/10.1093/gji/ggab334>
26. Wu J., Goto T., Koike K. Estimating fractured rock effective permeability using discrete fracture networks constrained by electrical resistivity data. *Engineering Geology*. 2021;289:166–178. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106178>
27. Attya M., Hachay O., Khachay O. New method of defining the geotechnical parameters from CSEM (controlled source electromagnetic method) monitoring data at the 15th May City, Egypt. *Methods and Applications in Petroleum and Mineral Exploration and Engineering Geology*. 2021;371–388. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-85617-1.00022-9>
28. Grib N.N., Uzbekov A.N., Imaev V.S. et al. Variations in the geoelectric properties of the rock masses as a result of the seismic effects of industrial explosions. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. World Multidisciplinary Earth Sciences Symposium (WMESS 2019)*. 9–13 September 2019, Prague, Czech Republic. 2019;362(1):012120. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/362/1/012120>
29. Sizin P.E., Shkuratnik V.L. Theoretical estimation of microcracks influence on rocks conductivity with maxwell approximation. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;(3):212–218.



30. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Теоретическая физика: В 10 ч. Т. VIII. Электродинамика сплошных сред*. М.: Физматлит; 2005. 656 с.
Landau L.D., Lifshits E.M. *Theoretical physics: At 10 parts. T. VIII. Electrodynamics of continuous media*. Moscow: Fizmatlit; 2005. 656 p. (In Russ.)
31. Bruggeman D.A.G. Berechnung verschiedener physikalischer Konstanten von heterogenen Substanzen. I. Dielektrizitätskonstanten und Leitfähigkeiten der Mischkörper aus isotropen Substanzen. *Annalen der Physik*. 1935;416(8):665–679. (In German) <https://doi.org/10.1002/andp.19354160802>
32. Landauer R. Conductivity of cold-worked metals. *Physical Review*. 1951;82(4):520–521. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.82.520>
33. Landauer R. High-field magnetoresistance of point defects. *Journal of Physics F: Metal Physics*. 1978;8(11):L245–L250. <https://doi.org/10.1088/0305-4608/8/11/001>
34. Балагуров Б.Я. *Электрофизические свойства композитов: Макроскопическая теория*. М.: ЛЕНАНД; 2015. 752 с.
Balagurov B.Ya. *Electrophysical properties of composites: Macroscopic theory*. Moscow: LENAND; 2015. 752 p. (In Russ.)
35. Касахара К. *Механика землетрясений*. М.: Мир; 1985. 264 с.
Kasakhara K. *Earthquake Mechanics*. Moscow: Mir; 1985. 264 p. (In Russ.)
36. Shklovskii B.I., Éfros A.L. Percolation theory and conductivity of strongly inhomogeneous media. *Soviet Physics Uspekhi*. 1975;18(11):845–862. <https://doi.org/10.1070/PU1975v018n11ABEH005233>
37. Pride S.R., Berryman J.G., Commer M. et al. Changes in geophysical properties caused by fluid injection into porous rocks: analytical models. *Geophysical Prospecting*. 2017;65(3):766–790. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12435>
38. Tan X., Konietzky H. Numerical simulation of permeability evolution during progressive failure of Aue granite at the grain scale level. *Computers and Geotechnics*. 2019;112:185–196. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.04.016>
39. 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;6(2):65–72. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-65-72>
40. Жуков В.С. Влияние межзерновой и трещинной пористости на электросопротивление коллекторов Чаяндинского месторождения (Восточная Сибирь). *Геофизические исследования*. 2022;23(2):5–17. <https://doi.org/10.21455/gr2022.2-1>
Zhukov V.S. Influence of intergranular and fractured porosity on the electrical resistivity of reservoirs of the Chayandinsky field (Eastern Siberia). *Geophysical Research*. 2022;23(2):5–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.21455/gr2022.2-1>

Информация об авторах

Павел Евгеньевич Сизин – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-8156-4972](https://orcid.org/0000-0001-8156-4972), Scopus ID [6506196727](https://scopus.com/authorid/6506196727); e-mail sizin.pe@misis.ru

Александр Сергеевич Вознесенский – доктор технических наук, профессор кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0003-0926-1808](https://orcid.org/0000-0003-0926-1808), Scopus ID [57210211383](https://scopus.com/authorid/57210211383), ResearcherID [C-3863-2015](https://orcid.org/C-3863-2015), SPIN 5976-3030; e-mail al48@mail.ru

Лемюэль Кетюра Кидима-Мбомби – аспирантка кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; Scopus ID [57226447408](https://scopus.com/authorid/57226447408)

Information about the authors

Pavel E. Sizin – Cand. Sci. (Phis. and Math.), Associate Professor of the Department of Mathematics, University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0001-8156-4972](https://orcid.org/0000-0001-8156-4972), Scopus ID [6506196727](https://scopus.com/authorid/6506196727); e-mail sizin.pe@misis.ru

Alexander S. Voznesenskii – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Physical Processes of Mining and Geocontrol, University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0003-0926-1808](https://orcid.org/0000-0003-0926-1808), Scopus ID [57210211383](https://scopus.com/authorid/57210211383), ResearcherID [C-3863-2015](https://orcid.org/C-3863-2015), SPIN 5976-3030; e-mail al48@mail.ru

Lemuel Ketura Kidima-Mbombi – PhD student, Department of Physical Processes of Mining and of Geocontrol, University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; Scopus ID [57226447408](https://scopus.com/authorid/57226447408)

Поступила в редакцию	12.07.2022	Received	12.07.2022
Поступила после рецензирования	08.08.2022	Revised	08.08.2022
Принята к публикации	15.12.2022	Accepted	15.12.2022