



СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-65-72>**Формирование синтетических структур и текстур горных пород при их моделировании в среде COMSOL Multiphysics**А. С. Вознесенский  , Л. К. Кидима Мбомби

НИТУ «МИСИС», г. Москва, Россия

 al48@mail.ru**Аннотация**

Текстура и структура горных пород играют существенную роль в формировании их физических свойств, а также несут информацию о генезисе. В статье рассматривается моделирование методом конечных элементов (МКЭ) геометрических форм различных структур и текстур горных пород. Оно осуществляется путем программной детализации свойств элементов и их пространственного расположения в моделируемом объекте. При программировании структур возможно также задание физических свойств различных частей модели, сеток, начальных и граничных условий, которые могут изменяться в соответствии со сценариями проведения численных экспериментов. В работе на основе МКЭ реализуется моделирование в COMSOL Multiphysics в связке с Matlab различных структур и текстур горных пород с включениями и нарушениями. Такие структуры используются для проведения компьютерных экспериментов по определению физических свойств геоматериалов и исследованию влияния на них воздействий различной физической природы. Рассмотрены построения нескольких моделей: образца горной породы с включениями в форме эллипсов равных размеров с различной ориентацией; образца песчаника, содержащего включения с высоким модулем упругости в цементирующей матрице при его деформировании; образца известняка при определении его удельного электрического сопротивления с трещинами, заполненными нефтью и минерализованной водой. В качестве примера анализа трещиноватой структуры рассмотрено влияние заполнителя на электросопротивление образца известняка, содержащего систему тонких эллиптических трещин с преимущественно горизонтальным расположением. Наглядно показано изменение линий протекания тока при разных соотношениях между проводимостью матрицы и заполнителем трещин и их влияние на эффективную (усредненную) проводимость образца породы. Меньшая проводимость заполнителя трещин приводит к увеличению длины и уменьшению сечения линий протекания тока, что в свою очередь приводит к существенному снижению проводимости трещиноватого образца породы. Большая проводимость заполнителя имеет своим результатом незначительное увеличение проводимости трещиноватого образца по сравнению с однородным изотропным образцом. Полученные структуры могут быть использованы для проведения численных экспериментов по исследованию физических свойств пород.

Ключевые слова

горные породы, геоматериалы, физические свойства, трещины, включения, численное моделирование, синтетические структуры, текстура, акустические свойства, электрические свойства

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 20-05-00341)

Для цитирования

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>

MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research article

Formation of synthetic structures and textures of rocks when simulating in COMSOL MultiphysicsA. S. Voznesensky  , L. K. Kidima-Mbombi

NUST "MISIS", Moscow, Russian Federation

 al48@mail.ru**Abstract**

Rock texture and structure play an important role in the formation of the rock physical properties, and also carry information about their genesis. The paper deals with the simulation of geometric shapes of various structures and textures of rocks by the finite-element method (FEM). It is carried out by programmed detailing



of the element properties and their spatial location in the simulated object. When programming structures, it is also possible to set the physical properties of various parts of the model, grids, initial and boundary conditions, which can be changed in accordance with the scenarios for numerical experiments. In this study, on the basis of FEM, simulation of various structures and textures of rocks with inclusions and disruptions was implemented in COMSOL Multiphysics in conjunction with Matlab. Such structures are used to conduct computer generated simulations to determine physical properties of geomaterials and study the effect on them of agents of various physical nature. The building of several models was considered: a rock specimen with inclusions in the form of ellipses of equal dimensions with different orientations; a sandstone specimen containing inclusions with high modulus of elasticity in cement matrix when deforming; a limestone specimen with fractures filled with oil and saline water when determining its specific electrical resistance. As an example of a fractured structure analysis, the influence of the filler on the electrical resistance of the limestone specimen containing a system of thin elliptical predominantly horizontal fractures was considered. The change in the lines of current flow at different ratios between the matrix and the fracture filler conductivities and their effect on the effective (averaged) conductivity of the rock specimen was clearly demonstrated. The lower conductivity of the fracture filler leads to increasing the length and decreasing the cross-section of the current flow lines that, in turn, leads to significant decrease in the conductivity of the fractured rock specimen. The higher filler conductivity results in a slight increase in the conductivity of the fractured specimen compared to that of the homogeneous isotropic specimen. The resulting structures can be used for numerical experiments to study physical properties of rocks.

Key words

rocks, geomaterials, physical properties, fractures, inclusions, numerical simulation, synthetic structures, texture, acoustic properties, electrical properties

Acknowledgments

The study was carried out with financial support of the Russian Foundation of Fundamental Research (RFFR) (scientific project No 20-05-00341).

For citation

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>

Введение

Текстура и структура горных пород играют существенную роль в формировании их физических свойств, а также несут информацию о генезисе. Поэтому понятен интерес ученых разных направлений, изучающих эти характеристики горных пород.

История эволюции текстурного анализа (ТА) показана в фундаментальном труде [1]. Приведены примеры моделирования упругих свойств текстурированных материалов вплоть до многофазных образцов, содержащих поры и трещины. Петрографический анализ для определения структуры, текстуры, состава и присутствия минералов в образцах пляжной породы с островов Японии и Индонезии описан в [2]. Для оптимизации параметров гидроразрыва пласта на двух- и трехмерных численных моделях учитывались структура матрицы, неоднородности минералов со сложной геометрией межзеренных контактов между ними [3]. Важность исследования текстуры как одного из ключевых элементов, определяющих морфологические особенности разрушения, отмечается в [4]. Исследования мелкомасштабных вариаций минералогического состава и текстуры, связанных с разломами пород в глубинной обсерватории Сан-Андреас, описаны в [5]. Кристаллографические текстуры образцов гранулита, амфиболита, сланца и гнейса измерены, классифицированы и сопоставлены с аналогичными текстурами мономинеральных пород в [6]. Анализ кристаллической структуры, текстуры и химического состава синкинематических филлосиликатов в зонах разломов использовался в [7] для определения меха-

низмов и стадий деформации и условий активности разломов. Заменить модели со сложной текстурой большинства зернистых осадочных пород на модели гранулированной эффективной среды, основанные на физике случайной упаковки сфер, предложено в [8]. Физические свойства пород-коллекторов, содержащих нефть, газ или воду, зависят от минерального состава и текстуры породы, отмечается в [9]. Текстура и остаточные напряжения в геологических образцах исследованы в работе [10]. Теория и моделирование образования новых структур в результате контраста реологических свойств между слоями разных текстур рассматриваются в [11].

Ряд работ посвящен количественной оценке текстур с помощью коэффициентов, а также установлению их связи с физическими и технологическими свойствами горных пород.

Коэффициент текстуры предложен двумя австралийскими исследователями, Ховартом и Роулэндсом в 1986 г. [12, 13] для количественной оценки текстуры, учитывающей форму, размеры и расположение минеральных зерен, составляющих горные породы, отмечается в [14]. Связь между инженерными свойствами и текстурой горных пород была исследована на карбонатных породах [15]. Форма зерен, удлинение, ориентация, округлость, плотность упаковки, пористость и содержание матрицы оценивались коэффициентом текстуры. Образцы карбонатов мелового периода, включая размер и процентное содержание зерна, тип матрицы, процент доломитизации и процент карбоната, во взаимосвязи с прочностью при сжатии и мо-



дулем Юнга исследовались в [16]. Количественные петрографические исследования влияния распределения минералов и их размеров на прочность и другие геотехнические свойства низкопористых вулканических пород обсуждались в [17]. Взаимосвязь между коэффициентом текстуры и извилистостью скелета породы, содержащей поры, с одной стороны, и модулем Юнга, пределом прочности, пределом текучести и модулем сдвига при одноосном сжатии, с другой, устанавливалась в [18]. Экспериментальное численное моделирование методом дискретных элементов и лабораторные испытания образцов гранита при одноосном сжатии, а также растяжении по бразильской схеме были выполнены в [19] для изучения влияния размера и распределения минеральных зерен на прочность и характер микротрещин в гранитных породах. На блочной модели дискретных элементов изучалось влияние ранее существовавшей текстуры естественных трещин на форму коллектора при его гидрорасчленении [20]. Влияние минерального состава и текстуры породы на индекс эрозиоустойчивости (Slake Durability, SDI), а также зависимость между SDI некоторых горных пород и их инженерными свойствами исследованы в [21]. Взаимосвязь между текстурными и механическими свойствами различных горных пород исследована в [22]. Особенности текстуры породы были оценены количественно с помощью коэффициента текстуры. Разработанная модель была применена для определения рейтинга неповрежденного горного материала в классификации горных массивов (RMR).

Особое место занимают методы обработки изображений и синтез структур для установления взаимосвязей с физическими свойствами горных пород.

Автоматической идентификации горных пород в шлифах с использованием текстурного анализа посвящена работа [23]. Созданию петрографических изображений из шлифов и количественному определению пространственного расположения выбранных компонентов горных пород с помощью двумерного (2D) преобразования Фурье посвящена публикация [24]. Обсуждается, что алгоритм текстурной сегментации цифровых изображений стенок скважины, основанный на показателе «энергии текстуры», позволяет автоматически разделять записанную последовательность на напластования [25]. Использование статистической модели текстуры, предложенной С. Д. Ма и А. Гагаловичем, для создания синтетического изображения, сопоставимого с исходным, описывается в [26]. Автоматической идентификации горных пород в шлифах с использованием текстурного анализа посвящена работа [27]. Кривые напряжение–деформация и процессы эволюции повреждений в горных породах на основе синтетических цифровых моделей при одноосном сжатии, позволяющих моделировать различные структурные детали и неоднородное разнообразие изучаемых пород, исследуются в [28]. Модель поровой сети используется в [29] для имитации диагенетического цикла осадочных пород-коллекторов. Пример использования двух расширенных критериев разрушения – «нелокального критерия Кулона–Мора

с размягчением» и «многослойного» для моделирования подземных сооружений и образцов горных пород в слоистом слюдяном сланце с перекрывающимися породами сложной текстуры, приводится в [30]. Текстуры трех различных фаций изменения диабазы были изучены с помощью микроскопии и рентгеновской микротомографии для расчета проницаемости пород путем численного моделирования [31].

При численном моделировании методом конечных элементов в среде COMSOL Multiphysics различных структур и текстур горных пород с включениями и нарушениями полезным может оказаться функция использования этого программного обеспечения в связке с Matlab, на основе которого эта система была создана. Полученные таким образом структуры затем могут использоваться для проведения компьютерных экспериментов по определению физических свойств геоматериалов и исследованию влияния на них воздействий различной физической природы. Сложность и трудоемкость ручной отрисовки таких текстур при большом количестве элементов структуры, а также при постоянных изменениях во время проведения серий экспериментов делают эту операцию практически неосуществимой.

Целью работы являлась разработка технологии автоматизированного синтеза структур и текстур горных пород со случайными вариациями заданных параметров текстуры, характерными для природных геоматериалов, для использования в численных экспериментах по определению физических свойств в условиях различных воздействий.

1. Методы исследования

Моделирование методом конечных элементов геометрических форм различных структур и текстур горных пород осуществляется путем программной прорисовки элементов и размещения их в пределах моделируемого объекта. При таком подходе возможно также задание физических свойств различных частей модели, сеток, начальных и граничных условий, которые могут изменяться в соответствии со сценариями проведения численных экспериментов.

Как пример формирования структуры в COMSOL Multiphysics, созданной с помощью программы, написанной в кодах Matlab, рассмотрим фрагмент отрисовки образца горной породы с включениями в форме эллипсов [32]. Введение генератора случайных чисел позволяет получить уникальность каждой комбинации геометрических параметров и исследовать влияние случайных факторов на результаты экспериментов.

Фрагмент кода

clc	Начальные операции
clear all	
clear fem	
fem.shape = 2;	
fem.sshape = 2;	
AT = 0.001;	Большая полуось эллипса
BT = 0.0002;	Малая полуось эллипса
phi = 45;	Наклон эллипса
LX = 0.032;	Ширина образца

<code>LY = 0.064;</code>	Высота образца
<code>NX = 15;</code>	Количество по горизонтали
<code>NY = 18;</code>	Количество по вертикали
<code>YMIN=BT/3;</code>	Поля по Y
<code>XMIN=AT/3;</code>	Поля по X
<code>DX = (LX-2*XMIN)/(NX+1);</code>	Расстояние между включениями по X
<code>DY = (LY-2*YMIN)/(NY+1);</code>	Расстояние между включениями по Y
<code>r1 = rect2(LX,LY,'base','corner','pos',[-LX/2 -LY/2]);</code>	Формирование образца
<code>for j=1:NX</code>	
<code> display=j</code>	
<code> CX = -LX/2+XMIN+DX*(j);</code>	
<code> for i=1:NY</code>	
<code> CY = -LY/2+YMIN+DY*(i);</code>	
<code> k = (i-1)*NX+j;</code>	
<code> A=pi/2*random('Uniform',-1,1,1,1)</code>	Угол наклона эллипсов от -90° до +90°
<code> r{k} = ellip2(AT,BT,'pos',[CX CY],'rot',A);</code>	Формирование эллипсов включений
<code> r1 = r1 - r{k};</code>	Формирование структуры
<code> r1 = r1 + r{k};</code>	
<code> end;</code>	
<code>end;</code>	
<code>fem.geom = r1;</code>	Построение структуры
<code>display='femgeom'</code>	
<code>fem.mesh = meshinit(fem);</code>	Формирование сетки
<code>display='femmesh'</code>	
<code>fem.mesh = meshrefine(fem);</code>	
<code>display='meshrefine'</code>	
<code>figure, geomplot(fem)</code>	Формирование сетки
<code>fem.mesh = meshinit(fem,'report','off');</code>	
<code>fem.appl.mode = 'FIPPlaneStrain';</code>	Выбор раздела COMSOL Multiphysics
<code>fem.appl.equ.f = {0 0 1};</code>	
<code>fem.appl.equ.c = 1;</code>	
<code>fem.appl.bnd.h = 1;</code>	
<code>fem = multiphysics(fem);</code>	
<code>fem.xmesh = meshextend(fem);</code>	
<code>fem.sol = femlin(fem,'report','off');</code>	
<code>figure</code>	
<code>postplot(fem,'tridata','u')</code>	Построение сетки

Приведенный код соответствует построению структуры в пространстве 2D, аналогично могут быть осуществлены построения и в пространстве 3D.

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Демонстрационный пример

Результат построения структуры в соответствии с приведенным выше кодом представлен на рис. 1. В данном случае случайным образом задавались наклоны эллипсов, а их размеры и положение не менялись. Задавая различное количество эллипсов, границ

изменения их размеров, угла наклона, положения, можно получать структуры, соответствующие различным типам горных пород.

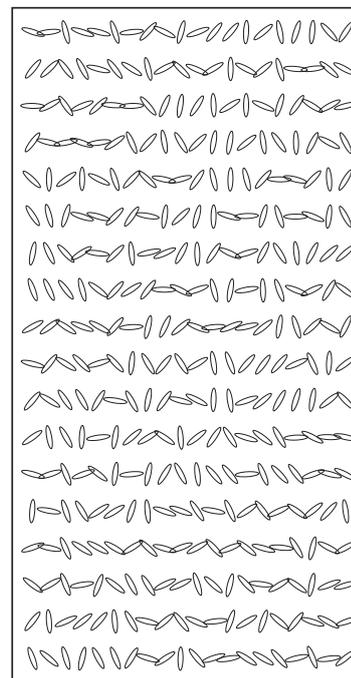


Рис. 1. Результат работы программного кода

Полученные структуры могут быть использованы для проведения численных экспериментов по исследованию физических свойств пород. Рассмотрим примеры таких исследований.

2.2. Построение структуры образца песчаника и моделирование его испытания при одноосном сжатии

Рассмотрим моделирование образца песчаника размером 32×32×64 мм в виде прямоугольной призмы с квадратным основанием. Образец включает высоко модульные зерна-включения со структурой 6×18 зерен, размещенные в цементирующей матрице. Полуоси зерен имеют размеры: большая от 1.8 до 2.9 мм и меньшая от 1.3 до 2.1 мм. Углы ориентации главной оси эллипсов ±90° от горизонтального направления. Модельные упругие свойства, модуль упругости E и коэффициент Пуассона ν , приведены в табл. 1.

Таблица 1

Упругие свойства элементов модели

Элементы структуры	E , ГПа	ν
Цемент	1	0.2
Зерна	100	0.25

При моделировании задавались граничные условия, при которых вертикальные перемещения нижнего торца были запрещены, а перемещение верхнего торца составило 0,1 мм вниз и соответствовало сжатию образца в вертикальном направлении.

Результаты расчетов напряжений в образце представлены на рис. 2, а, а на рис. 2, б представлена кри-

вая вертикальных нормальных напряжений в сечении $y = 0$. При этом принято, что напряжениям сжатия соответствуют отрицательные значения.

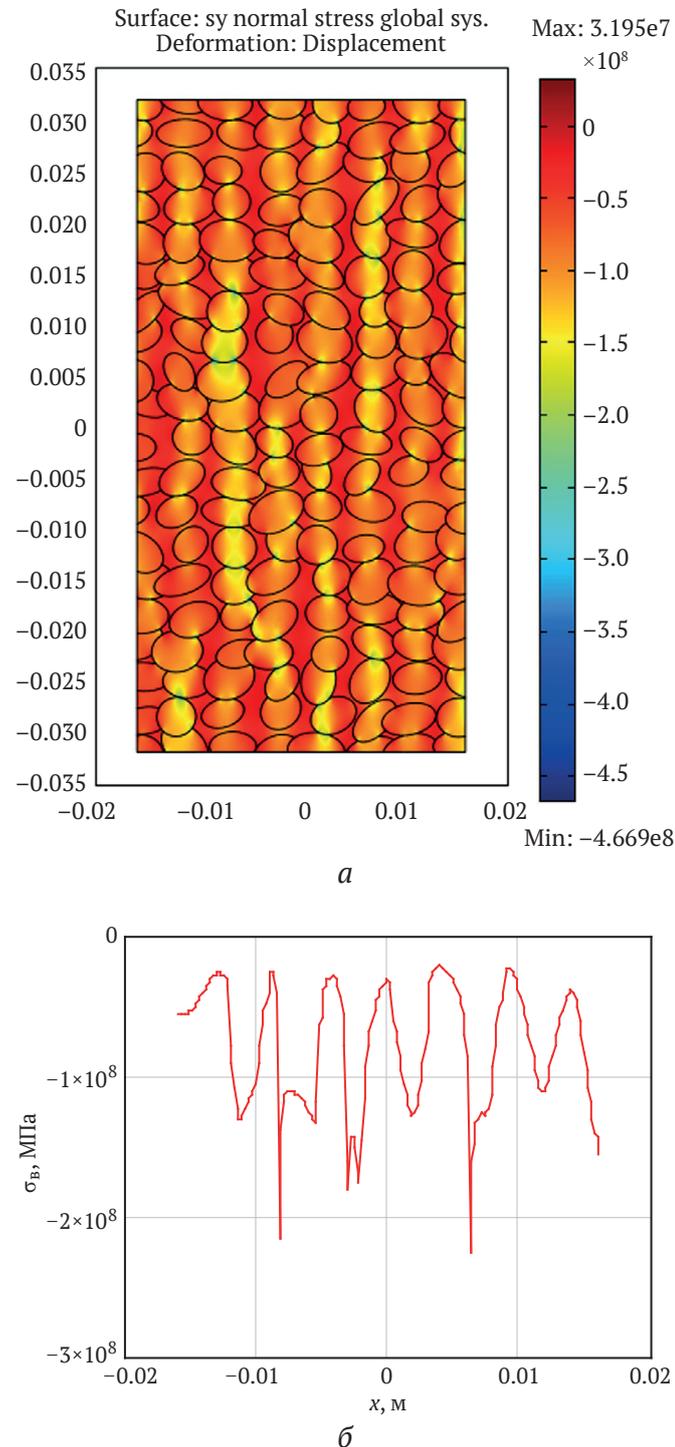


Рис. 2. Модельная структура образца песчаника и распределение вертикальных сжимающих напряжений по объему (а) и в сечении $y = 0$ (б) образца

На рис. 2, а красным цветом отмечены области с минимальными по абсолютной величине напряжениями сжатия. Желтым, зеленым и синим цветами отмечены напряжения сжатия, возникающие на контактах зерен. Желтым цветом отмечены области повышенных напряжений, образующих вертикаль-

ные цепи. Максимальное значение нормальных вертикальных напряжений в сечении $y = 0$ по абсолютной величине доходит до 223.8 МПа, а среднее напряжение в этом сечении имеет величину 77.0 МПа, отношение максимального напряжения к среднему равно 2.91. Большие значения локальных напряжений могут вызвать разрушение внутренней структуры образца. Если бы он имел однородную по модулю упругости структуру, усредненные по сечению напряжения сжатия не вызывали бы такого разрушения.

2.3. Моделирование горизонтальной трещиноватости в образце известняка

Из эллипсов может быть сформирована также и другая структура, имитирующая систему трещин горизонтальной, вертикальной или наклонной ориентации с разбросом углов в заданном диапазоне. Ниже рассмотрена система эллиптических трещин с преимущественно горизонтальным расположением в двумерной постановке задачи.

Структура содержит сетку эллиптических трещин в количестве 15 горизонтальных и 10 вертикальных рядов с наклоном $\pm 40^\circ$ относительно горизонтальной оси, большой полуосью от $6 \cdot 10^{-4}$ до $10.4 \cdot 10^{-3}$ мм и малой полуосью от $1.2 \cdot 10^{-4}$ до $2.8 \cdot 10^{-4}$ мм. Отклонения центров трещин от равномерной сетки ± 4.9 мм по горизонтали и $\pm 8 \cdot 10^{-2}$ мм по вертикали. Трещины размещены в образце породы размером $32 \times 32 \times 64$ мм. При формировании размеров, наклона и положения центров эллипсов использовался генератор случайных чисел с равномерным распределением.

Для образца меловых отложений проводимость породы взята равной проводимости известняка $\sigma_p = 10^{-4}$ См/м, проводимость воды $\sigma_v = 10$ См/м; проводимость нефти $1 \cdot 10^{-9}$ См/м. Проводимости сред и образцов приведены в табл. 2.

На верхней грани образца задавалось напряжение 100 В относительно нижней грани, граничное условие нижней грани соответствовало заземлению (Ground). В результате расчета получались распределения локального тока на верхней грани образца. Кроме того, при моделировании строились линии плотности электрического тока, а также определялась эффективная (усредненная) удельная электрическая проводимость (УЭП) образца.

При моделировании рассмотрены три случая:

- 1) однородный изотропный образец без трещин;
- 2) образец с трещинами, заполненными нефтью или воздухом с низкой проводимостью, меньшей, чем проводимость цементирующей матрицы;
- 3) образец с трещинами, заполненными минерализованной водой с высокой проводимостью, большей, чем проводимость матрицы.

Результаты расчетов представлены на рис. 3 и в табл. 2.

Исходные и полученные в результате моделирования проводимости сред и образцов приведены в табл. 2.

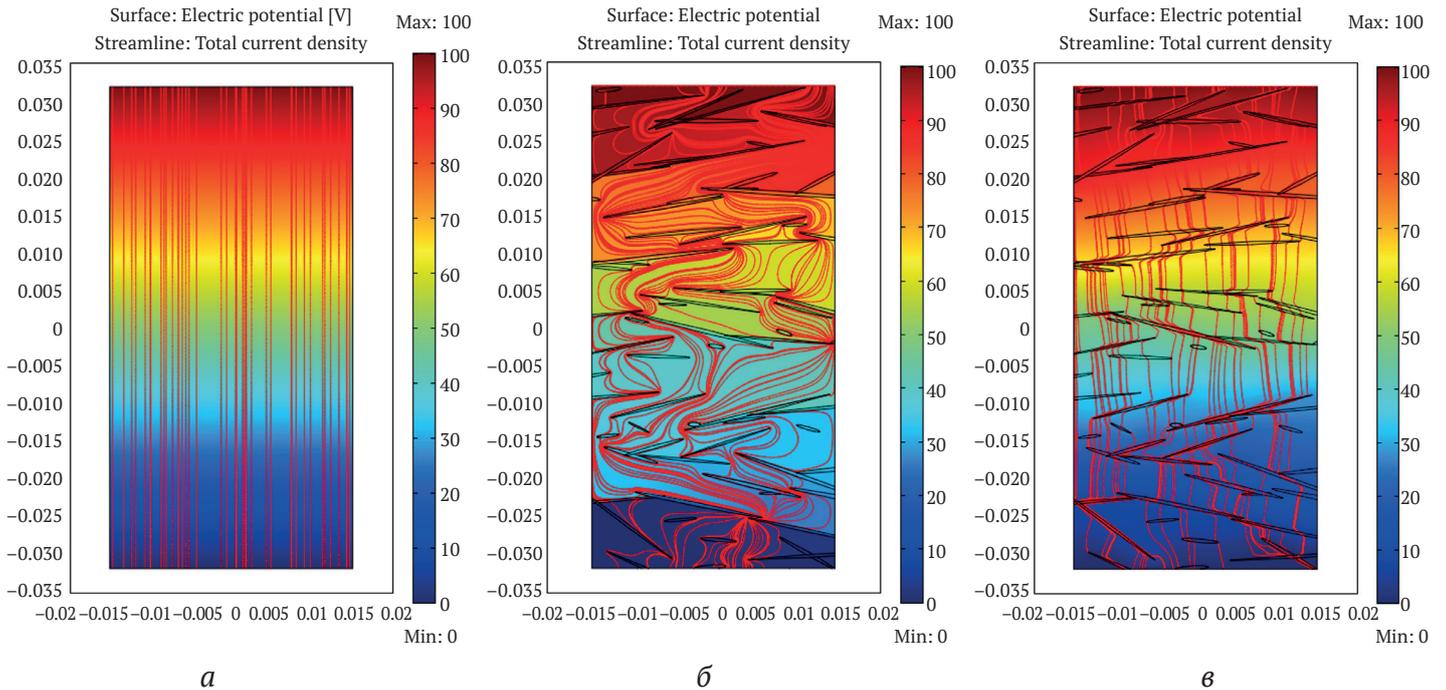


Рис. 3. Линии тока для образцов однородного изотропного (а), с трещинами, заполненными нефтью или воздухом (б) и проводящей минерализованной водой (в)

Таблица 2

Проводимости сред, входящих в модель, а также усредненные проводимости образца однородного и с трещинами, заполненными нефтью и минерализованной водой

Среда	Однородный образец	Трещины, нефть	Трещины, минерализованная вода
Известняк		$1 \cdot 10^4$	
Заполнение трещин	–	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^1$
Образец	$1 \cdot 10^{-4}$	$4.304 \cdot 10^{-6}$	$1.376 \cdot 10^{-4}$

Для однородного изотропного образца из известняка на рис. 3, а линии тока имеют линейную форму и направлены вертикально. Как следует из данных табл. 2, для этого образца получено точно такое же значение электропроводности породы, какое и закладывалось при формировании модели.

Для образца с трещинами, заполненными низкопроводящей жидкостью или воздухом, на рис. 3, б линии тока изгибаются, увеличивая путь протекания и уменьшая сечение, что приводит к уменьшению эффективной проводимости образца более чем в 10 раз.

Для образца с трещинами, заполненными проводящей минерализованной водой, проводимость возрастает почти на 40% за счет частичного протекания тока по жидкости.

Выводы

1. Подход к численному моделированию неоднородных структур, содержащих эллиптические включения, формируемые программным путем из Matlab

в связке с COMSOL Multiphysics, где производится моделирование методом конечных элементов, является достаточно эффективным.

2. Продемонстрированы возможности моделирования песчаников, содержащих высокомолекулярные зерна-включения, размещенные в цементирующей матрице. Рассмотрено решение задачи определения локальных напряжений в образце с такой структурой при его одноосном деформировании в направлении стороны наибольшего размера. Показано существенное превышение локальными напряжениями значений, усредненных по ширине сечения образца, а также наличие вытянутых областей повышенных напряжений, ориентированных вдоль направления деформирования.

3. В качестве примера трещиноватой структуры рассмотрено влияние заполнителя на электросопротивление образца известняка, содержащего систему тонких эллиптических трещин с преимущественно горизонтальным расположением. Наглядно показано изменение линий протекания тока при разных соотношениях между проводимостью матрицы и заполнителем трещин и их влияние на эффективную (усредненную) проводимость образца породы. Меньшая проводимость заполнителя трещин приводит к увеличению длины и уменьшению сечения линий протекания тока, что приводит к существенному снижению проводимости трещиноватого образца породы. Большая проводимость заполнителя имеет своим результатом незначительное увеличение проводимости трещиноватого образца по сравнению с однородным изотропным образцом.



Список литературы / References

1. Ivankina T. I., Matthies S. On the development of the quantitative texture analysis and its application in solving problems of the Earth sciences. *Physics of Particles and Nuclei*. 2015;46:366–423. <https://doi.org/10.1134/S1063779615030077>
2. Daryono L. R., Titisari A. D., Warmada I. W., Kawasaki S. Comparative characteristics of cement materials in natural and artificial beachrocks using a petrographic method. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2019;78:3943–3958. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1355-x>
3. Nachev V. A., Kazak A. V., Turuntaev S. B. 3D digital mineral-mechanical modeling of complex reservoirs rocks for understanding fracture propagation at microscale. In: *Society of Petroleum Engineers – SPE Russian Petroleum Technology Conference 2020, RPTC 2020*. Society of Petroleum Engineers; 2020. <https://doi.org/10.2118/201979-MS>
4. Sangirardi M., Malena M., de Felice G. Settlement induced crack pattern prediction through the jointed masonry model. In: Carcaterra A., Paolone A., Graziani G. (eds.) *Proceedings of XXIV AIMETA Conference 2019. AIMETA 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41057-5_158
5. Bradbury K. K., Davis C. R., Shervais J. W., Janecke S. U., Evans J. P. Composition, Alteration, and Texture of Fault-Related Rocks from Safod Core and Surface Outcrop Analogs: Evidence for Deformation Processes and Fluid-Rock Interactions. *Pure and Applied Geophysics*. 2015;172:1053–1078. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0896-6>
6. Nikitin A. N., Ivankina T. I., Ullemeyer K., Vasin R. N. Similar quartz crystallographic textures in rocks of continental earth's crust (by neutron diffraction data): II. Quartz textures in monophase rocks. *Crystallography Reports*. 2008;53:819–827. <https://doi.org/10.1134/S1063774508050167>
7. AbdElmola A., Charpentier D., Buatier M., Lanari P., Monié P. Textural-chemical changes and deformation conditions registered by phyllosilicates in a fault zone (Pic de Port Vieux thrust, Pyrenees). *Applied Clay Science*. 2017;144:88–103. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.05.008>
8. Allo F. Consolidating rock-physics classics: A practical take on granular effective medium models. *The Leading Edge*. 2019;38(5):334–40. <https://doi.org/10.1190/tle38050334.1>
9. Hu X., Huang S. Physical Properties of Reservoir Rocks. In: Hu X., Hu S., Jin F., Huang S. (eds) *Physics of Petroleum Reservoirs*. Springer Geophysics. Springer, Berlin, Heidelberg. 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-662-55026-7_2
10. Frischbutter A., Janssen C., Scheffzük C., Walther K., Ullemeyer K., Behrmann J. H., et al. Strain and texture measurements on geological samples using neutron diffraction at IBR-2, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna (Russia). *Physics of Particles and Nuclei*. 2006;37:S45–S68. <https://doi.org/10.1134/S1063779606070033>
11. Hudleston PJ, Lan L. Rheological information from geological structures. *Pure and Applied Geophysics*. 1995;145:605–620. <https://doi.org/10.1007/BF00879591>
12. Howarth D. F., Rowlands J. C. Development of an index to quantify rock texture for qualitative assessment of intact rock properties. *Geotechnical Testing Journal*. 1986;9(4):169–179. <https://doi.org/10.1520/GTJ10627J>
13. Howarth D. F., Rowlands J. C. Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 1987;20:57–85. <https://doi.org/10.1007/BF01019511>
14. Azzoni A., Bailo F., Rondena E., Zaninetti A. Assessment of texture coefficient for different rock types and correlation with uniaxial compressive strength and rock weathering. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 1996;29:39–46. <https://doi.org/10.1007/BF01019938>
15. Kamani M., Ajalloeian R. Evaluation of Engineering Properties of Some Carbonate Rocks Through Corrected Texture Coefficient. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2019 Apr 15;37:599–614. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0630-8>
16. Ajalloeian R, Mansouri H, Baradaran E. Some carbonate rock texture effects on mechanical behavior, based on Koohrang tunnel data, Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2017;76:295–307. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0861-y>
17. Ömer Ü., Florian A. Influence of micro-texture on the geo-engineering properties of low porosity volcanic rocks. In: *Engineering Geology for Society and Territory – Volume 6: Applied Geology for Major Engineering Projects*. Springer International Publishing; 2015. P. 69–72. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09060-3_12
18. Song R., Zheng L., Wang Y., Liu J. Effects of Pore Structure on Sandstone Mechanical Properties Based on Micro-CT Reconstruction Model. *Advances in Civil Engineering*. 2020;2020: 9085045. <https://doi.org/10.1155/2020/9085045>
19. Zhou J., Zhang L., Yang D., Braun A., Han Z. Investigation of the quasi-brittle failure of alashan granite viewed from laboratory experiments and grain-based discrete element modeling. *Materials (Basel)*. 2017;10(7):835. <https://doi.org/10.3390/ma10070835>



20. Zhao X., Wang T., Elsworth D., He Y., Zhou W., Zhuang L., et al. Controls of natural fractures on the texture of hydraulic fractures in rock. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018;165:616–626. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.02.047>
21. Rahimi M. R., Mohammadi S. D., Beydokhti A. T. Effects of Mineral Composition and Texture on Durability of Sulfate Rocks in Gachsaran Formation, Iran. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2020;38:2619–2637. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-01173-9>
22. Ozturk C. A., Nasuf E. Strength classification of rock material based on textural properties. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2013;37:45–54. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.03.005>
23. Wang L. Automatic identification of rocks in thin sections using texture analysis. *Mathematical Geology*. 1995;27:847–865. <https://doi.org/10.1007/BF02087099>
24. Prince C. M., Ehrlich R. Analysis of spatial order in sandstones. I. Basic principles. *Mathematical Geology*. 1990;22:333–359. <https://doi.org/10.1007/BF00889892>
25. Luthi S. M. Textural segmentation of digital rock images into bedding units using texture energy and cluster labels. *Mathematical Geology*. 1994;26(2):181–196. <https://doi.org/10.1007/BF02082762>
26. Ye S. J., Rabiller P., Keskes N. Automatic high resolution texture analysis on borehole imagery. In: *SPWLA 39th Annual Logging Symposium 1998*. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts (SPWLA); 1998.
27. Wang L. Automatic identification of rocks in thin sections using texture analysis. *Mathematical Geology*. 1995;27:847–865. <https://doi.org/10.1007/BF02087099>
28. Xiao H, He L, Li X, Zhang Q, Li W. Texture synthesis: A novel method for generating digital models with heterogeneous diversity of rock materials and its CGM verification. *Computers and Geotechnics*. 2021;130:103895. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103895>
29. Algive L, Bekri S, Lerat O, Nader F, Vizika O. Reactive pore network modeling technology to evaluate the impact of diagenesis on the petrophysical properties of a rock. In: *Society of Petroleum Engineers – International Petroleum Technology Conference 2009, IPTC 2009*. 2009, pp. 3452–3461. <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.151.iptc14049>
30. Kazerani T, Nilipour N, Garin E, Seingre G. Application of numerical modelling for large-scale underground excavation in foliated rock mass. In: *ISRM Regional Symposium, EUROCK 2015*. International Society for Rock Mechanics; 2015, pp. 931–936.
31. Coelho G., Branquet Y., Sizaret S., Arbaret L., Champallier R., Rozenbaum O. Permeability of sheeted dykes beneath oceanic ridges: Strain experiments coupled with 3D numerical modeling of the Troodos Ophiolite, Cyprus. *Tectonophysics*. 2015;644:138–150. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.01.004>

Информация об авторах

Александр Сергеевич Вознесенский – доктор технических наук, профессор, кафедра физических процессов горного производства и геоконтроля, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»), г. Москва, Российская Федерация; SPIN 5976-3030; ORCID 0000-0003-0926-1808; e-mail al48@mail.ru

Лемюэль Кетюра Кидима-Мбомби – аспирантка кафедры физических процессов горного производства и геоконтроля, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»), г. Москва, Российская Федерация. Гражданство Республика Конго

Information about the authors

Aleksandr S. Voznesensky – Doctor of Sciences (Engineering), Professor of the Department of Physical Processes of Mining and of Geocontrol, National University of Science and Technology “MISIS” (NUST “MISIS”), Moscow, Russian Federation; SPIN 5976-3030; ORCID 0000-0003-0926-1808; e-mail al48@mail.ru

Lemuel Ketura Kidima-Mbombi – PhD student, Department of Physical Processes of Mining and of Geocontrol, National University of Science and Technology “MISIS” (NUST “MISIS”), Moscow, Russian Federation

Поступила в редакцию 11.05.2021

Поступила после рецензирования 29.05.2021

Принята к публикации 15.06.2021

Received 11.05.2021

Revised 29.05.2021

Accepted 15.06.2021