(19) Евразийское патентное ведомство

(21) 202092519 (13) A1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки
2021.04.07

(22) Дата подачи заявки
2019.06.20

(51) Int. Cl. ***G06T 7/00*** (2017.01)
G06T 7/62 (2017.01)

(54) СИСТЕМЫ И СПОСОБЫ ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ МЕЖЗЕРЕННОГО КОНТАКТА

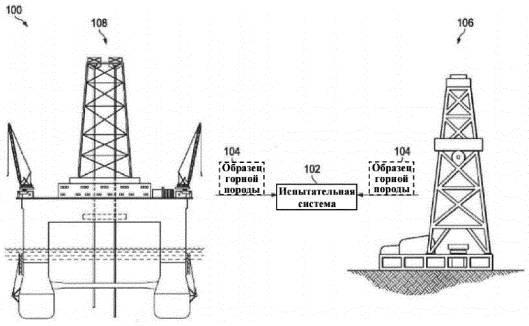
(31) **62/688,912**
(32) **2018.06.22**
(33) **US**
(86) **PCT/US2019/038094**
(87) **WO 2019/246319 2019.12.26**

(71) Заявитель:
БИПИ КОРПОРЕЙШН НОРТ АМЕРИКА ИНК. (US)

(72) Изобретатель:
Кук Дженни, Керимов Абдулла, Лейн Натан (US)

(74) Представитель:
Гизатуллина Е.М., Угрюмов В.М., Строкова О.В., Христофоров А.А., Гизатуллин Ш.Ф., Костюшенкова М.Ю., Лебедев В.В., Парамонова К.В. (RU)

(57) Настоящим изобретением предложен способ анализа образца горной породы для определения механических свойств этого образца горной породы, причем этот способ предусматривает (a) сегментирование цифрового объема изображения, соответствующего изображению образца горной породы. Кроме того, этот способ предусматривает (b) разбиение цифрового объема изображения для соотнесения множества вокселов в цифровом объеме изображения с множеством зерен образца горной породы. Вдобавок этот способ предусматривает (c) определение вокселов из числа множества вокселов, которые примыкают друг к другу, для идентификации множества контактных сопряжений между зернами. Более того, этот способ предусматривает (d) определение площади контакта каждого из контактных сопряжений с использованием соседних вокселов на соответствующей поверхности раздела между зернами. Этот способ также предусматривает (e) определение количества контактных сопряжений, которое каждое зерно из множества зерен имеет с каждым соседним зерном. Более того, этот способ предусматривает (f) определение одного или нескольких механических свойств образца горной породы на основании количества контактных сопряжений каждого из множества зерен и площади контакта каждого из контактных сопряжений.



202092519 A1

202092519 A1

СИСТЕМЫ И СПОСОБЫ ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ МЕЖЗЕРЕННОГО КОНТАКТА

ОПИСАНИЕ

Ссылка на родственную заявку

[0001] Данная заявка испрашивает приоритет согласно предварительной заявке на патент США № 62/688,912 под названием «Системы и способы оценки механических свойств горных пород с использованием моделей межзеренного контакта», поданной 22 июня 2018 года, содержание которой включено в настоящий документ посредством ссылки, как если бы она была полностью приведена в настоящем описании.

Предшествующий уровень техники настоящего изобретения

[0002] В сфере добычи углеводородов получение точных данных о петрофизических свойствах подповерхностных горных пород имеет большое значение для оценки объемов углеводородов, содержащихся в пластах горных пород, и для формулирования стратегии извлечения углеводородов из породной формации. Образцы горной породы, например, из керновых проб или выбуренных пород, обычно подвергаются физическим лабораторным испытаниям для измерения их петрофизических свойств, таких как проницаемость, пористость, пластовый коэффициент, модули упругости и прочие свойства подобного рода. Некоторые из этих измерений требуют длительных периодов времени, и в некоторых случаях затягиваются более чем на несколько месяцев, что зависит от характера самой горной породы. Оборудование, используемое для проведения таких измерений, также может быть довольно дорогим.

[0003] С учетом денежных затрат и времени на выполнение прямого измерения петрофизических свойств с целью эффективной оценки таких физических свойств, как пористость, абсолютная проницаемость, относительная проницаемость, пластовый коэффициент, модули упругости и прочие свойства подобного рода образцов горных пород, включая образцы горных пород различных типов, таких как газонасыщенные песчаные коллекторы и карбонатные породы, может применяться метод «прямого численного моделирования». Согласно этому подходу формируется трехмерное томографическое изображение образца горной породы, например, путем его компьютерного томографического (КТ) сканирования. Вокселы в объеме трехмерного томографического

изображения «сегментируются» (например, путем бинаризации или порогового представления значений их яркости или иным способом) для выделения скелета горной породы из свободного порового объема. Затем проводится прямое численное моделирование потока флюида или иных динамических физических характеристик, таких как упругость или электропроводность, по результатам которого может быть выведена пористость, проницаемость (абсолютная и/или относительная), упругие свойства, электрические свойства и прочие свойства подобного рода. Для решения или аппроксимации физических уравнений, моделирующих соответствующие динамические характеристики, могут применяться самые разные численные методы. Эти методы включают в себя метод решёточных уравнений Больцмана, метод конечных элементов, метод конечных разностей, численный метод конечных объёмов и прочие методы подобного рода.

Краткое раскрытие настоящего изобретения

[0004] В настоящем документе описаны варианты осуществления способов анализа образца зернистой горной породы для определения одного или нескольких механических свойств этого образца горной породы. В одном из вариантов своего осуществления этот способ предусматривает сегментирование цифрового объема изображения, соответствующего изображению образца горной породы. Кроме того, этот способ предусматривает разбиение цифрового объема изображения для соотнесения множества вокселов в цифровом объеме изображения с множеством зерен образца горной породы. Вдобавок этот способ предусматривает определение вокселов из числа множества вокселов, которые примыкают друг к другу, для идентификации множества контактных сопряжений между зернами. Более того, этот способ предусматривает определение площади контакта каждого из контактных сопряжений с использованием соседних вокселов на соответствующей поверхности раздела между зернами. Этот способ также предусматривает определение количества контактных сопряжений, которое каждое зерно из множества зерен имеет с каждым соседним зерном. Более того, этот способ предусматривает определение одного или нескольких механических свойств образца горной породы на основании количества контактных сопряжений каждого из множества зерен и площади контакта каждого из контактных сопряжений.

[0005] В настоящем документе описаны варианты осуществления систем для анализа образца горной породы с целью определения одного или нескольких механических свойств образца горной породы. В одном из вариантов своего осуществления эта система включает

в себя устройство формирования изображений, выполненное с возможностью генерирования цифрового объема изображения, отображающего образец горной породы. Кроме того, эта система содержит вычислительное устройство, соединенное с устройством формирования изображений. Вычислительное устройство включает в себя один или несколько процессоров и одно или несколько запоминающих устройств, соединенных с одним или несколькими процессорами. Одно или несколько запоминающих устройств выполнены с возможностью хранения команд, которые при их исполнении одним или несколькими процессорами конфигурируют один или несколько процессоров на выполнение следующих операций: сегментирования цифрового объема изображения, соответствующего одному или нескольким изображениям образца горной породы, для соотнесения вокселов в цифровом объеме изображения с зернами образца горной породы; разбиения цифрового объема изображения для соотнесения множества вокселов в цифровом объеме изображения с множеством зерен образца горной породы; определения вокселов из числа множества вокселов, которые примыкают друг к другу, для идентификации множества контактных сопряжений между зернами; определения площади контакта каждого из контактных сопряжений с использованием соседних вокселов на соответствующем контактном сопряжении; определения количества контактных сопряжений, которое каждое зерно из множества зерен имеет с каждым соседним зерном; и определения одного или нескольких механических свойств образца горной породы на основании количества контактных сопряжений каждого из множества зерен и площади контакта каждого из контактных сопряжений.

[0006] В настоящем документе описаны варианты осуществления энергонезависимого машиночитаемого носителя данных. В одном из вариантов осуществления в этом энергонезависимом машиночитаемом носителе данных закодированы команды, которые при их исполнении инициируют выполнение одним или несколькими процессорами следующих операций: сегментирования цифрового объема изображения, соответствующего одному или нескольким изображениям образца горной породы, для соотнесения вокселов в цифровом объеме изображения с зернами образца горной породы; разбиения цифрового объема изображения для соотнесения множества вокселов в цифровом объеме изображения с множеством зерен образца горной породы; определения вокселов из числа множества вокселов, которые примыкают друг к другу, для идентификации множества контактных сопряжений между зернами; определения площади контакта каждого из контактных сопряжений с использованием соседних вокселов на соответствующем контактном сопряжении; определения количества контактных сопряжений, которое каждое зерно из множества зерен имеет с каждым соседним зерном; и

определения одного или нескольких механических свойств образца горной породы на основании количества контактных сопряжений каждого из множества зерен и площади контакта каждого из контактных сопряжений.

[0007] Варианты осуществления заявленного изобретения, раскрытые в настоящем документе, обладают сочетанием признаков и характеристик, служащих для устранения различных недостатков, связанных с определенными устройствами, системами и способами предшествующего уровня техники. Признаки и технические характеристики раскрытых вариантов осуществления настоящего изобретения были обозначены выше лишь в общих чертах с тем, чтобы можно было лучше понять подробное описание, представленное ниже. Различные описанные и прочие характеристики и признаки станут очевидными для специалистов в данной области техники после ознакомления с последующих подробным описанием в привязке к прилагаемым чертежам. Следует отметить, что концепция и конкретные варианты осуществления заявленного изобретения, раскрытые в настоящем документе, могут быть безо всяких сложностей использованы в качестве основы для модификации или проектирования иных структур, служащих тем же целям, что и описанные варианты осуществления. Следует также понимать, что такие эквивалентные конструкции не выходят за пределы сущности и объема принципов заявленного изобретения, раскрытых в настоящем документе.

Краткое описание фигур

[0008] Подробное описание примеров осуществления настоящего изобретения приведено в привязке к прилагаемым чертежам, которые не обязательно вычерчены в масштабе, и где:

[0009] На фиг. 1A представлено схематическое изображение одного из примеров реализации береговых и морских источников образцов горных пород для их анализа с использованием вариантов осуществления испытательной системы и способов согласно принципам, раскрытым в настоящем документе;

[0010] На фиг. 1B представлено схематическое изображение одного из вариантов осуществления испытательной системы для анализа образцов горной породы согласно принципам, раскрытым в настоящем документе;

[0011] На фиг. 1C представлено схематическое изображение одного из вариантов осуществления вычислительного устройства, пригодного для использования в испытательной системе, показанной на фиг. 1B;

[0012] На фиг. 2 представлен один из вариантов осуществления способа анализа образца горной породы согласно принципам, раскрытым в настоящем документе;

[0013] На фиг. 3A представлен сегментированный двухмерный (2D) срез трехмерного (3D) изображения образца горной породы;

[0014] На фиг. 3B представлен сегментированный двухмерный (2D) срез изображения, показанного на фиг. 3A, после разбиения;

[0015] На фиг. 3C представлен сегментированный и разделенный двухмерный (2D) срез изображения, показанного на фиг. 3B, после идентификации контактов зерен;

[0016] На фиг. 4 показан график, иллюстрирующий модуль объемной упругости образца горной породы, измеренный в лаборатории, и расчетный модуль объемной упругости образца горной породы, установленный вариантами осуществления заявленного изобретения, описанными в настоящем документе (как нормализованный, так и представленный в зависимости от пористости); и

[0017] На фиг. 5 показан график, иллюстрирующий модуль сдвига образца горной породы, измеренный в лаборатории, и расчетный модуль сдвига для образца горной породы, установленный вариантами осуществления заявленного изобретения, описанными в настоящем документе (как нормализованный, так и представленный в зависимости от пористости).

Терминология и система представления численных значений

[0018] В последующем описании и прилагаемой формуле изобретения термины «включающий в себя» и «содержащий» используются в качестве неограничивающих терминов, и поэтому они должны трактоваться как «включающий в себя, помимо прочего, …». Любое использование в какой-либо форме терминов «соединяет», «входит в зацепление», «связывает», «прикрепляется» и других терминов подобного рода, описывающих взаимодействие между элементами, не предполагает его ограничение прямым взаимодействием между элементами, а также может включать непрямое взаимодействие между описанными элементами. Термин «программное обеспечение» включает в себя любую исполняемую программу, выполненную с возможностью ее прогона процессором вне зависимости от носителя, используемого для хранения программного обеспечения. Таким образом, программа, хранящаяся в памяти (например, в энергонезависимой памяти), которая иногда называется «встроенной микропрограммой», включена в определение программного обеспечения. Предполагается, что фраза «на основании» означает «на основании, по меньшей мере, частично». Следовательно, если

величина *X* основана на величине *Y*, то величина *X* может быть основана на величине *Y* и любом количестве дополнительных факторов. В контексте настоящего документа термины «приблизительно», «около», «по существу» и прочие термины подобного рода означают колебание указанного значения в пределах 10% (т.е. плюс или минус 10%). Таким образом, например, указанный угол «около 80 градусов» относится к углу, который варьируется в пределах от 72 градусов до 88 градусов.

Подробное раскрытие настоящего изобретения

[0019] Последующее описание относится к различным примерам осуществления настоящего изобретения. Однако специалисту в данной области техники понятно, что примеры, раскрытые в настоящем документе, имеют широкое применение, и что описание любого варианта осуществления настоящего изобретения носит исключительно иллюстративный характер и не предполагает, что объем заявленного изобретения, включая его формулу, ограничен этим вариантом осуществления.

[0020] Определенные термины используются по всему последующему описанию и в формуле изобретения для обозначения конкретных признаков или компонентов. Любому специалисту в данной области техники понятно, что разные люди могут называть один и тот же признак или компонент разными именами. В настоящем документе не проводится различие между компонентами или признаками, отличающимися по названию, но не по функциям. Фигуры не обязательно вычерчены в масштабе. Определенные признаки и компоненты в настоящем документе могут быть увеличены в масштабе или представлены до определенной степени в схематическом виде, а некоторые детали стандартных элементов могут быть не показаны для упрощения и краткости представления.

[0021] Если из контекста явным образом не вытекает иное, то все диапазоны, указанные в настоящем документе, должны толковаться как включающие свои предельные значения, а неограниченные диапазоны должны толковаться как включающие только практически применимые значения. Аналогичным образом все перечни значений должны рассматриваться как содержащие промежуточные значения включительно, если контекст не указывает иное.

[0022] На чертежах и в последующем описании одни и те же элементы обычно обозначены по всему тексту и на чертежах одними и теми же номерами позиций. Фигуры не обязательно вычерчены в масштабе. Определенные признаки вариантов осуществления настоящего изобретения могут быть увеличены в масштабе или представлены до определенной степени в схематическом виде, а некоторые детали стандартных элементов

могут быть не показаны для упрощения и краткости представления. Настоящее изобретение представлено различными вариантами своего осуществления. Конкретные варианты осуществления настоящего изобретения подробно описаны и проиллюстрированы на чертежах с пониманием того, что представленное раскрытие должно рассматриваться в качестве иллюстративного примера реализации принципов настоящего изобретения, и не предполагает его ограничение описанием, проиллюстрированным и представленным в настоящем документе. Следует четко понимать, что разные идеи и компоненты вариантов осуществления настоящего изобретения, описанные ниже, могут применяться по отдельности или в любой подходящей комбинации для получения требуемых результатов.

[0023] В общем, модуль объемной упругости какой-либо субстанции (например, горной породы) является показателем способности этой субстанции противодействовать сжатию (например, нагрузкам, прикладываемым перпендикулярно наружным поверхностям субстанции), тогда как модуль сдвига какой-либо субстанции (например, горной породы) описывает способность этой субстанции противодействовать сдвигающим усилиям (например, нагрузкам, прикладываемым параллельно наружным поверхностям субстанции). Модуль объемной упругости и модуль сдвига горной породы в пласте служат вводными данными для различных видов расчетов и численного моделирования, используемых для выведения различных статических упругих механических свойств горной породы, включая модуль продольной упругости, коэффициент поперечной деформации, модуль P_{wave}, константу Ламе и – наряду с плотностью материала – также скорость P_{wave} и скорость S_{wave}. Модуль объемной упругости и модуль сдвига горных пород часто измеряются в ходе геомеханических лабораторных испытаний. Без данных лабораторных испытаний модуль объемной упругости и модуль сдвига могут оцениваться с использованием различных моделей/подходов к изучению петрофизических свойств пласта, таких как модель Герца-Миндлина. Эти подходы требуют наличия таких данных, как среднее число контактов между отдельными зернами горной породы и размеры (площадь) этих контактов, которые должны использоваться в качестве вводных данных для расчета эффективных модулей объемной упругости и сдвига горных пород. Количество и размеры контактов оцениваются, исходя из упрощенной геометрии горной породы, например, сферической формы зерен, а также идеального или случайного расположения зерен. Однако эти упрощения приводят к снижению точности результатов измерений свойств горной породы.

[0024] Варианты осуществления заявленного изобретения, описанные в настоящем документе, относятся к системам и способам определения количества и размеров контактов между отдельными зернами горной породы, которые используются в последующих расчетах для определения модулей объемной упругости и сдвига горной породы, которые –

в свою очередь – могут быть использованы для выведения других упругих механических свойств горной породы. В частности, варианты осуществления заявленного изобретения, описанные в настоящем документе, предусматривают получение трехмерного (3D) цифрового объема изображения горной породы (т.е. цифровой горной породы), сегментирование цифрового 3D-изображения на зерна компонентов и поровое пространство, разбиение сегментированного цифрового 3D-изображения для идентификации контактов между зернами компонентов горной породы и последующее определение количества и размеров (площади) каждого из контактов между зернами компонентов по разделенному сегментированному цифровому 3D-изображению. Количество и размеры каждого из контактов между зернами компонентов могут быть затем использованы для расчета модулей объемной упругости и сдвига горной породы.

[0025] На фиг. 1A проиллюстрировано – на высоком уровне – получение образцов горной породы и анализ образцов горной породы в соответствии с принципами, описанными в настоящем документе. Варианты осуществления заявленного изобретения могут быть особенно эффективными при анализе образцов горных пород из погребенных формаций, играющих важную роль в сфере нефте- и газодобычи. В этой связи на фиг. 1A показана среда 100, из которой могут быть извлечены образцы 104 горных пород для их анализа с помощью испытательной системы 102 согласно различным вариантам практической реализации. На этих проиллюстрированных примерах образцы 104 горных пород могут быть получены с помощью системы 106 наземного бурения или системы 108 для морского бурения (установленной в океане, на море, на озере и пр.), каждая из которых используется для извлечения ресурсов, таких как углеводороды (нефть, природный газ и пр.), вода и прочие ресурсы подобного рода. Оптимизация операций по нефте- и газодобыче, как одного из основополагающих факторов в данной области техники, в значительной степени зависит от структуры и физических свойств пластов горных пород, которые пробуриваются или пробуривались в прошлом с помощью системы 106 наземного бурения или системы 108 для морского бурения.

[0026] Способы получения образцов 104 горных пород и физическая форма этих образцов могут варьироваться в широком диапазоне. Примеры 104 горных пород, пригодные для использования в контексте вариантов осуществления заявленного изобретения, описанных в настоящем документе, включают в себя образцы полноразмерного керна; образцы керна, отбираемого из стенки ствола скважины; пробы пород из обнажений; и создаваемые в лабораторных условиях синтетические образцы горных пород, такие как песчаные и сцементированные пробки.

[0027] Как показано на фиг. 1А, среда 100 включает в себя испытательную систему 102, выполненную с возможностью анализа изображений 128 (см. фиг. 1В) образцов 104 горных пород с целью определения физических свойств соответствующей подповерхностной породы, причем эти свойства включают в себя петрофизические свойства в контексте нефтегазопоисковых работ и нефтегазодобычи.

[0028] На фиг. 1В показаны в общем виде составные элементы испытательной системы 102, которая анализирует изображения 128. В широком смысле испытательная система 102 включает в себя устройство 122 формирования изображений для получения двухмерных (2D) или трехмерных (3D) изображений, а также других форм представления образцов 104 горных пород, причем такие изображения и формы представления включают в себя детали внутренней структуры образцов 104 горных пород. Одним из примеров реализации устройства 122 формирования изображений служит сканер рентгеновской компьютерной томографии (КТ-сканер), который – как известно в данной области техники – испускает рентгеновское излучение 124, взаимодействующее с объектом, и измеряет ослабление рентгеновского излучения 124 объекта для генерирования изображения его внутренней структуры и структурных элементов. Конкретный тип, конструкция или прочие признаки КТ-сканера 122 могут соответствовать аналогичным признакам рентгеновского устройства любого типа, такого как микро-КТ-сканер, выполненный с возможностью формирования изображения, отображающего внутреннюю структуру образца 104 горной породы. Устройство 122 формирования изображений генерирует одно или несколько изображений 128 образца 104 горной породы, и передает эти изображения 128 на вычислительное устройство 120.

[0029] Изображения 128, генерируемые устройством 122 формирования изображений, могут быть представлены в виде трехмерного (3D) цифрового объема изображения (т.е. цифрового изображения), состоящего или сгенерированного из множества двухмерных (2D) сегментов образца 104 горной породы. В этом случае объем изображения разбивается на регулярно повторяющиеся 3D-элементы, называемые объемными элементами или чаще всего «вокселами». В общем, каждый воксел представляет собой куб со сторонами одинаковой длины в направлениях X, Y и Z. С другой стороны, сам цифровой объем 128 изображения может содержать разное количество вокселов в направлениях X, Y и Z. Каждый воксел в пределах цифрового объема характеризуется соотнесенным числовым значением или амплитудой, которая отображает соответствующие свойства материала изображенного образца в том месте среды, которая отображается цифровым объемом. Диапазон этих численных значений, более известный как шкала серого, зависит от типа цифрового объема, гранулярности значений (например, 8-

битные или 16-битные значения) и прочих параметров подобного рода. Например, 16-битные значения данных позволяют вокселам в объеме рентгеновского томографического изображения иметь амплитуду, варьирующуюся в пределах 0-65,536 с гранулярностью 1.

[0030] Как было указано выше, устройство 122 формирования изображений передает изображения 128 на вычислительное устройство 120, которым может служить, как в примере, приведенном на фиг. 1B, вычислительное устройство любого типа, например, настольный компьютер или рабочая станция, ноутбук, сервер, планшет или иное устройство подобного рода. Соответственно, вычислительное устройство 120 будет включать в себя аппаратные и программные компоненты, обычно входящие в состав вычислительного устройства стандартного типа. Как показано на фиг. 1B, эти аппаратные и программные компоненты вычислительного устройства 120 включают в себя инструмент 130 тестирования, который выполнен с возможностью анализа изображений 128 для определения петрофизических свойств образца 104 горной породы в одном или нескольких смоделированных условиях насыщения флюидом, включая условия насыщения флюидом, с которыми могут сталкиваться пласты горных пород в приповерхностной зоне. В этой связи инструмент 130 тестирования может быть реализован в виде программных средств, аппаратных средств или комбинации аппаратных и программных средств, включая все необходимые и полезные логические схемы, команды, подпрограммы и алгоритмы для выполнения функций и процессов, более подробно описанных ниже. В общем смысле инструмент 130 тестирования выполнен с возможностью анализа объема 128 изображения образца 104 горной породы для выполнения прямого численного моделирования петрофизических свойств в условиях насыщения флюидом, отображающих состояние пластов горных пород в подповерхностной зоне, включая разную степень насыщения множеством флюидов.

[0031] На фиг. 1C схематически показана архитектура вычислительного устройства 120 в составе испытательной системы 102 согласно различным вариантам осуществления настоящего изобретения. В этом примере реализации архитектуры вычислительное устройство 120 включает в себя один или несколько процессоров 902, которые могут характеризоваться разной конфигурацией процессорного ядра и тактовыми частотами, используемыми в данной области техники. Ресурсы памяти вычислительного устройства 120, предназначенные для хранения данных и/или программных команд, исполняемых одним или несколькими процессорами 902, включают в себя одно или несколько устройств 904 памяти, служащих оперативной памятью во время работы вычислительного устройства 120, и одного или нескольких накопителей 910, например, реализованных в виде одного или нескольких энергонезависимых твердотельных накопителей, накопителей на магнитных

или оптических дисках или оперативного запоминающего устройства. Для подключения соответствующих периферийных устройств, таких как дисплеи, клавиатуры, мыши, сенсорные панели, сенсорные экраны, принтеры и прочие устройства подобного рода, предусмотрен один или несколько интерфейсов 906 периферии. Сетевые интерфейсы 908, которые могут быть представлены в виде Ethernet-адаптеров, беспроводных приемопередатчиков, последовательных сетевых компонентов и прочих устройств, призваны облегчить взаимодействие между вычислительным устройством 120 и одной или несколькими сетями, такими как Ethernet, беспроводная сеть Ethernet, глобальная система мобильной связи (GSM), сеть EDGE (развитие стандарта GSM с увеличенной скоростью передачи данных), универсальная система мобильной связи (UMTS), система связи глобальной совместимости для микроволнового доступа (WiMAX), система стандарта «Долгосрочное развитие сетей связи» (LTE) и т.п. В этом примере реализации архитектуры показано, что процессоры 902 связаны с компонентами 904, 906, 908 и 910 посредством единой шины; но, разумеется, в вычислительном устройстве 120 может быть реализована иная архитектура взаимодействия, например, в виде множества специализированных шин и пр.

[0032] Хотя вычислительное устройство 120 представлено в виде отдельного вычислительного устройства, оно может включать в себя несколько вычислительных устройств, взаимодействующих друг с другом для реализации функциональных возможностей вычислительного устройства. Аналогичным образом, хотя вычислительное устройство 120 представлено в виде физического устройства, вычислительное устройство 120 может также представлять собой абстрактное вычислительное устройство, такое как виртуальная машина и «облачное» вычислительное устройство.

[0033] Как показано в примере осуществления, который проиллюстрирован на фиг. 1C, вычислительное устройство 120 включает в себя программные продукты 912, содержащие одну или несколько операционных систем, одну или несколько прикладных программ и тому подобное. Согласно вариантам осуществления настоящего изобретения программные продукты 912 содержат программные команды, соответствующие инструменту 130 тестирования (см. фиг. 1B), реализованному в виде автономной прикладной программы; в виде программного модуля, являющегося частью другого приложения или программы; в виде соответствующих плагинов или иных программных компонентов для получения доступа к программному обеспечению инструмента тестирования на удаленном компьютере, соединенного по сети с вычислительным устройством 120 через сетевые интерфейсы 908; или в иных формах и их сочетаниях.

[0034] Программная память, в которой хранятся исполняемые команды программных продуктов 912, соответствующих функциям инструмента 130 тестирования, может физически располагаться в вычислительном устройстве 120 или на других вычислительных ресурсах, доступных для вычислительного устройства 120, т.е. в ресурсах локальной памяти устройств 904 и накопителей 910; или же она может находиться на сервере или иных ресурсах памяти с доступом через сеть; или же она может быть рассредоточена по множеству локаций. В любом случае эта программная память составляет энергонезависимый машиночитаемый носитель данных, в котором хранятся исполняемые команды компьютерной программы, в соответствии с которыми операции, описанные в настоящем документе, выполняются вычислительным устройством 120 или сервером или иным вычислительным устройством, соединенным с вычислительным устройством 120 через сетевые интерфейсы 908 (например, по типу интерактивного приложения для входных данных, поступающих с вычислительного устройства 120, с целью их отображения или выдачи периферийными устройствами, соединенными с вычислительным устройством 120). Исполняемые компьютером программные команды, соответствующие программным продуктам 912, которые соотносятся с инструментом 130 тестирования, могут изначально храниться на съемном или ином энергонезависимом машиночитаемом носителе данных (например, на DVD-диске, во флеш-памяти или на ином устройстве подобного рода) или загружаться в виде кодированной информации на несущем электромагнитном сигнале в виде пакета программ, из которого исполняемые компьютером программные команды инсталлируются вычислительным устройством 120 обычным способом, который используется для инсталляции программного обеспечения. Предполагается, что специалисты в данной области техники способны без труда реализовать хранение и извлечение необходимых данных, программных команд и прочей информации, полезной применительно к этому варианту осуществления настоящего изобретения, подходящим для каждого конкретного применения способом, не прибегая к ненужным экспериментам.

[0035] Конкретные машинные команды, составляющие программные продукты 912, соотнесенные с инструментом 130 тестирования, могут быть реализованы в виде одной или нескольких исполняемых программ, или в виде исходного кода или кода более высокого уровня, на основании которого выводится, ассемблируется, интерпретируется или компилируется одна или несколько исполняемых программ. При этом может быть использован любой из множества машинных языков или протоколов, что зависит от того, каким образом должны выполняться требуемые операции. Например, эти машинные команды для создания модели согласно вариантам осуществления настоящего изобретения могут быть записаны на стандартном языке высокого уровня, таком как PYTHON, JAVA,

FORTRAN или C++, или в виде обычной компьютерной программы линейного программирования, или для исполнения объектно-ориентированным способом. Эти команды могут быть также встроены в приложение более высокого уровня. В любом случае предполагается, что специалисты в данной области техники после ознакомления с представленным описанием будут способны без труда реализовать различные варианты осуществления любым подходящим для инсталляции способом, не прибегая к ненужным экспериментам.

[0036] Ниже описаны конкретные функции инструмента 130 тестирования, включая те их них, которые реализуются с помощью программных продуктов 912, для анализа образцов горной породы в различных условиях насыщения согласно вариантам осуществления настоящего изобретения, которые раскрыты в привязке к фиг. 2 в сочетании с фиг. 1A-1C.

[0037] Обратимся теперь к фиг. 2, где показан один из вариантов осуществления способа 200 анализа образцов горной породы для определения количества и размеров контактов между зернами компонентов в образцах горной породы. Хотя для удобства показано последовательное выполнение стадий, по меньшей мере, некоторые из проиллюстрированных стадий могут выполняться в ином порядке и/или выполняться параллельно. Кроме того, в некоторых вариантах осуществления настоящего изобретения предусмотрено выполнение лишь части показанных стадий. В некоторых вариантах осуществления настоящего изобретения, по меньшей мере, некоторые из операций в рамках способа 200, а также другие операции, описанные в настоящем документе, могут быть реализованы в виде команд, хранящихся в машиночитаемом носителе и исполняемых одним или несколькими процессорами 902.

[0038] На стадии 202 испытательная система 102 получает образец 104 горной породы, подлежащий анализу, например, из подповерхностной горной породы с использованием системы 106 наземного бурения или системы 108 для морского бурения или из других источников. Конкретный образец 104 горной породы может быть получен из подповерхностной горной породы большего объема, например, путем выбуривания или вырезания из горной породы, представляющей интерес, части большого объема, причем габариты, размер и конфигурация образца должны быть такими, чтобы их можно было визуализировать с помощью устройства 122 формирования изображений (например, КТ-сканера).

[0039] На стадии 204 устройство 122 формирования изображений во взаимодействии с вычислительным устройством 120 испытательной системы 102 генерирует цифровой объем 128 изображения, отображающий образец 104 горной породы, включая его

внутреннюю структуру. Например, если устройством 122 формирования изображений служит КТ-сканер, то формируется рентгеновское изображение образца 104 горной породы (т.е. с испусканием излучения на образец 104 горной породы и измерением ослабления этого излучения) для генерирования объемов 128 изображения по изображениям 2D срезов или из изображений 2D срезов. Конкретные стандартные методы получения и обработки трехмерных цифровых объемов 128 изображения образца 104 горной породы на стадии 204 включают в себя, помимо прочего, рентгеновскую томографию, рентгеновскую микротомографию, рентгеновскую нанотомографию, сканирующую электронную микроскопию с фокусированным ионным пучком и метод ядерного магнитного резонанса. В некоторых вариантах осуществления настоящего изобретения цифровой объем 128 изображения может быть получен вычислительными средствами, а не путем сканирования физического образца. В вариантах осуществления, в которых цифровой объем 128 изображения создается путем сканирования образца горной породы, образец горной породы может представлять собой горную породу природного происхождения или искусственный пористый материал (например, синтетическую породу).

[0040] Данные об изображении на этой стадии могут быть выражены в виде значений серого, отображающих ослабление рентгеновского излучения компонентами образца 104 горной породы. Как будет описано в следующем абзаце, фиг. 3А иллюстрирует изображение 300 одного 2D среза через цифровой объем 128 изображения, при этом следует понимать, что трехмерный цифровой объем 128 изображения образца 104 горной породы состоит из множества изображений 2D срезов в дискретных положениях вдоль одной оси образца 104 горной породы, которые все вместе формируют 3D изображение образца 104 горной породы. В общем, объединение изображений 2D срезов в трехмерный цифровой объем 128 изображения может быть выполнено вычислительными ресурсами самого устройства 122 формирования изображений или вычислительным устройством 120 по ряду изображений 2D срезов, полученных устройством 122 формирования изображений, что зависит от конкретной архитектуры испытательной системы 102.

[0041] Обратимся теперь к фиг. 3А, где приведен один из примеров изображения 300 одного сегментированного 2D-среза цифрового объема 128 изображения образца 104 горной породы. Изображение 300 сегментированного 2D среза иллюстрирует поперечный срез структурных элементов образца 104 горной породы, включая признаки сплошного материала 302, такие как отдельные зерна породы (выделены белым цветом на фиг. 3А) и поровое пространство или поровый объем 304 (выделен черным цветом на фиг. 3А). На стадии 206 испытательная система 102 выполняет сегментирование или реализует иной метод повышения качества изображения в отношении цифрового объема 128 изображения

образца 104 горной породы для различения и маркирования разных компонентов или фаз объема 128 изображения по значениям серого в изображении. Сегментированный цифровой объем 128 изображения может содержать изображение 300 двухмерного (2D) среза, отображающее образец 104 горной породы. В частности, вычислительное устройство 120 выполняет это сегментирование для идентификации таких компонентов, как поровое пространство и минералы (например, глины и кварц). В некоторых вариантах осуществления настоящего изобретения инструмент 130 тестирования выполнен с возможностью сегментирования объема 128 изображения на более чем две значимые фазы, отображающие такие структурные составляющие материала, как поровое пространство, глинистая фракция, фракция кварца и типы различных других минералов.

[0042] Вычислительное устройство 120 может использовать алгоритмы сегментирования любого типа. Один из подходов к сегментированию состоит в применении процесса бинаризации к объему 128 изображения, в ходе которого вычислительное устройство 120 выбирает пороговое значение в пределах диапазона амплитуд вокселов. При этом тем вокселам, амплитуда которых ниже порогового значения, присваивается одно конкретное числовое значение, которое отображает поровое пространство, тогда как другим вокселам, амплитуда которых выше порогового значения, присваивается другое числовое значение, которое отображает матричное пространство (т.е. сплошной материал). В этом подходе бинаризация преобразует объем изображения в оттенках серого в сегментированный объем вокселов, имеющих одно из двух возможных численных значений, обычно выбираемых между 0 и 1. На фиг. 4А приведен один из примеров сегментирования, выполненного в отношении изображения 300 двухмерного среза цифрового объема 128 изображения методом бинаризации. Как можно видеть, сегментирование позволяет различать элементы структуры образца горной породы, причем в этом примере сплошной материал 302 окрашен разными цветами (различными оттенками серого в полутоновом изображении, показанном на фиг. 3А), отображающими разные материалы в объеме 128, а поры или поровый объем 304 окрашен черным цветом. В дальнейшем сегментирование может быть применено один или несколько раз к различным отличительным признакам в изображении. Если используется простая бинаризация, то множественные пороговые значения могут провести различие между разными материалами, демонстрирующими разные характеристики ослабления рентгеновского излучения, такими как глина, кварц, полевой шпат и пр.

[0043] В альтернативном варианте вычислительное устройство 120 может использовать другие алгоритмы сегментирования. Один из примеров такого альтернативного алгоритма известен в данной области техники как метод Оцу, в котором

метод бинаризации на основе гистограммы выбирает пороговое значение для минимизации совокупной дисперсии диаграмм бимодального распределения значений серого (т.е. «внутриклассовой дисперсии»). Метод Оцу может быть без труда автоматизирован, а также может быть расширен для повторной многократной бинаризации изображения с целью проведения различия между дополнительными компонентами материалов, таких как кварц, глина и полевой шпат. Другие примеры алгоритмов автоматизированного сегментирования различной степени сложности могут быть альтернативно или дополнительно использованы вычислительным устройством 120 для проведения различия между разными признаками в объеме изображения, причем такие алгоритмы включают в себя индикаторный кригинг, метод схождение активных контуров, водораздел и прочие алгоритмы подобного рода.

[0044] Вычислительное устройство 120 может также использовать другие методы повышения качества изображения для улучшения или повышения качества структуры, выявленной в объеме 128 изображения, с целью проведения дополнительных различий в структуре, уменьшения эффектов шумов и тому подобного. Аналогичным образом предполагается, что хотя сегментирование или иные методы повышения качества изображения могут выполняться вычислительным устройством 120, в альтернативном варианте повысить качество изображения полностью или частично могут другие компоненты испытательной системы 102, например, само устройство 122 формирования изображений.

[0045] Сегментирование соотносит вокселы в цифровом объеме изображения с конкретным материалом (или поровым пространством, в зависимости от обстоятельств) в соответствующем месте в образце 104 горной породы. Каждый воксел из числа некоторых или всех вокселов привязывается к одному или нескольким свойствам материала, соответствующим конкретной структурной составляющей материала, закрепленной за этим вокселом. Такие структурные составляющие включают в себя поровое пространство, матричный материал, глинистую фракцию, отдельные зерна, контакты зерен, типы минералов и тому подобное.

[0046] На стадии 208 вычислительное устройство 120 разбивает идентифицированные фазы сегментированного цифрового объема 128 изображения с целью идентификации отдельных контактов или контактных сопряжений между зернами компонентов. Разбивка на стадии 208 может быть выполнена с помощью программного обеспечения для обработки изображений от сторонней организации, такого как программа Avizo™ от компании ThermoFisher Scientific™, г. Хиллсборо, штат Орегон, США. Во время разбивки зерно каждого компонента может быть идентифицировано по вокселам (например, по вокселам 303, 305 и 307, показанным на фиг. 3B) в изображении 300

двухмерного среза. Иначе говоря, каждый воксел или группа вокселов задает или отображает отдельное зерно, а вокселы каждого зерна могут отображаться окрашенным иным цветом (или цветовыми шаблонами, оттенками серого) вокселом или группой вокселов, как это показано на фиг. 3B. На фиг. 3B проиллюстрирован один из примеров разделенного изображения 300 двухмерного среза трехмерного изображения (например, цифрового объема 128 изображения) образца горной породы, где показан поперечный срез структурных элементов этого образца горной породы. Размеры (например, площадь, объем, радиус (R) и пр.) каждого зерна могут определяться с помощью программного обеспечения для обработки изображений. После разбивки на стадии 208 контакты между зернами (например, сопряжения 309 и 311, показанные на фиг. 3C) идентифицируются как область, где воксел, относящийся к зерну X (например, воксел 303), примыкает к вокселу, относящемуся к зерну Y (например, вокселу 305).

[0047] На стадии 210, следующей за стадией разбивки, вычислительное устройство 120 идентифицирует контактные сопряжения между зернами (например, сопряжения 309 и 311, показанные на фиг. 3C), а затем определяет (например, вычисляет) площадь контакта (также именуемую просто «площадью»). Контактные сопряжения идентифицируются по вокселам соседних зерен. Например, контактное сопряжение между двумя зернами может быть определено группой или кустом примыкающих друг к другу вокселов между двумя соседними зернами. Таким образом, за счет идентификации групп вокселов между примыкающими друг к другу зернами могут быть идентифицированы контактные сопряжения между зернами. После идентификации контактных сопряжений между зернами становятся известными границы этих контактных сопряжений, и они могут быть использованы для определения (например, вычисления) площади контакта каждого контактного сопряжения. Площадью контакта между двумя вокселами является площадь одной из сторон воксела на границе раздела (например, воксел представляет собой куб). Например, если зерно X и зерно Y содержат 100 примыкающих друг к другу вокселов, а площадь одной из сторон воксела составляет 4 микрона^2, то общая площадь контакта составляет 400 микрон^2.

[0048] На стадии 210 площадь контакта каждого контактного сопряжения используется для определения (например, вычисления) радиуса a контактной поверхности каждого контактного сопряжения. В частности, следует иметь в виду, что каждое зерно может характеризоваться уникальной и/или геометрически неправильной трехмерной конфигурацией, в результате чего геометрия или форма контактного сопряжения между каждой парой контактирующих зерен также может быть уникальной и/или неправильной (например, некруглой). Для упрощения вычислений и численного моделирования

(например, чтобы можно было использовать уравнения 1-4, показанные ниже) неправильная форма каждого контактного сопряжения преобразуется в окружность с такой же площадью контакта, после чего определяется радиус *a* каждой такой окружности. Таким образом, форма и площадь контакта каждого контактного сопряжения эффективно преобразуется в окружность такой же площади с радиусом *a* (также именуемым радиусом площади контакта).

[0049] После определения радиуса *a* контактной поверхности каждого контактного сопряжения вычисляется контактная жесткость при сдвиге и нормальная контактная жесткость каждого контактного сопряжения. Один из способов вычисления этих жесткостей реализован в уравнениях 1 и 2:

$$S\tau = \frac{8a\mu}{2 - v}$$

Уравнение (1)

, где величина $S\tau$ обозначает контактную жесткость при сдвиге для случая бесконечного контактного трения; величина μ обозначает модуль сдвига зернистого материала; величина v обозначает коэффициент поперечной деформации зернистого материала; а величина a обозначает радиус контактной поверхности. Контактная жесткость при сдвиге, обозначенная величиной $S\tau$, равна нулю в случае нулевого контактного трения.

$$Sn = \frac{4\mu a}{1 - v}$$

Уравнение (2)

, где величина Sn обозначает нормальную контактную жесткость; величина μ обозначает модуль сдвига зернистого материала; величина v обозначает коэффициент поперечной деформации зернистого материала; а величина a обозначает радиус контактной поверхности.

[0050] После вычисления контактной жесткости $S\tau$ при сдвиге и нормальной контактной жесткости Sn каждого контактного сопряжения с помощью уравнений 1 и 2 вычисляется средняя контактная жесткость при сдвиге и средняя нормальная контактная жесткость в расчете на зерно и среднее количество контактов в расчете на зерно. После этого вычисляются эффективные модули объемной упругости и сдвига по уравнениям 3 и 4:

$$Keff = \frac{C(1 - \emptyset)}{12\pi R} Sn$$

Уравнение (3)

, где величина K*eff* обозначает эффективный модуль объемной упругости; величина *C* обозначает количество контактных сопряжений в расчете на зерно (также именуемое координационным числом в расчете на зерно); величина *Ø* обозначает пористость; величина *R* обозначает радиус зерна; а величина *Sn* обозначает нормальную контактную жесткость.

$$\mu eff = \frac{C(1-\phi)}{20\pi R(Sn + 1.5S\tau)}$$

Уравнение (4)

, где величина *μeff* обозначает эффективный модуль сдвига; величина *C* обозначает количество контактных сопряжений в расчете на зерно; величина *Ø* обозначает пористость; величина *R* обозначает радиус зерна; величина *Sn* обозначает нормальную контактную жесткость; а величина *Sτ* обозначает контактную жесткость при сдвиге.

[0051] Модули объемной упругости и сдвига, установленные с использованием способов и уравнений, описанных выше, могут быть использованы для выведения множества механических свойств зерен и горной породы, таких как модуль продольной упругости, константа Ламе, коэффициент поперечной деформации, модуль P_{wave}, скорость P_{wave} и скорость S_{wave}, с помощью методов, известных в данной области техники. Следует иметь в виду, что распределения, максимумы, минимумы и средние значения свойств, определенные выше (например, количество контактных сопряжений в расчете на зерно, площадь контакта каждого контактного сопряжения, контактная жесткость при сдвиге, нормальная контактная жесткость, модуль объемной упругости, модуль сдвига и пр.) по всем зернам, могут быть установлены и использованы в последующих расчетах для определения свойств всех зерен, отображающих свойства горной породы в целом. В сравнении с упрощенными моделями определения свойств горных пород варианты осуществления заявленного изобретения, описанные в настоящем документе, обеспечивают потенциальные возможности для повышения точности вычислений таких свойств применительно к зернистым материалам. Варианты осуществления, раскрытые в настоящем документе, потенциально могут повысить выходную скорость, обеспечивая при этом, в общем, приемлемую точность. Например, на фиг. 4 показан модуль объемной упругости образца горной породы, измеренный в лаборатории («Лабораторные измерения»), в сравнении с модулем объемной упругости ($K_{effective}$) этого же образца горной породы, установленного с использованием вариантов осуществления методов, описанных в настоящем документе («Расчеты»). Оба модуля из числа модуля объемной упругости, измеренного в лаборатории, и вычисленного модуля объемной упругости нормализуются модулем минералов ($K_{mineral}$), который известен в данной области техники под названием

модуль объемной упругости зернистого материала, такого как кварц, и который показан на фиг. 4 как функция пористости. В качестве другого примера на фиг. 5 показан модуль сдвига ($\mu_{effective}$) образца горной породы, измеренный в лаборатории («Лабораторные измерения»), в сравнении с модулем сдвига этого же образца горной породы, установленного с использованием вариантов осуществления методов, описанных в настоящем документе («Расчеты»), для случая нулевого трения («Расчеты $\mu=0$») и бесконечного трения («Расчеты $\mu=\infty$»). Модуль сдвига, измеренный в лаборатории, и вычисленные модули сдвига нормализуются модулем сдвига зернистого материала ($\mu_{mineral}$), который известен в данной области техники как модуль сдвига зернистого материала, и который показан на фиг. 5 как функция пористости. Как показано на фиг. 5, модули сдвига, измеренные в лаборатории, обычно лежат в пределах между расчетными модулями сдвига для случаев нулевого и бесконечного трения.

[0052] Хотя в настоящем документе были описаны и проиллюстрированы предпочтительные варианты осуществления заявленного изобретения, специалист в данной области техники может внести в него различные модификации без отступления от объема или идей настоящего изобретения. Раскрытые варианты осуществления заявленного изобретения носят исключительно иллюстративный, а не ограничительный характер. В системы, устройства и процессы, описанные в настоящем документе, может быть внесено множество изменений и модификаций, входящих в объем заявленного изобретения. Например, могут быть изменены относительные размеры различных частей, материалы, из которых изготовлены различные части, и прочие параметры. Соответственно, объем правовой охраны не ограничен вариантами осуществления заявленного изобретения, описанными в настоящем документе, а ограничен лишь последующей формулой изобретения, объем которой должен включать в себя все эквиваленты предмета формулы изобретения. Если прямо не указано иное, то стадии в пунктах формулы изобретения на способ могут выполняться в любом порядке. Перечисление идентификаторов, таких как (a), (b), (c) или (1), (2), (3) перед описанием стадий в пунктах формулы изобретения на способ не предполагает указание и не указывает на конкретный порядок выполнения этих стадий, а используется лишь для упрощения последующего обращения к таким стадиям.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ анализа образца горной породы для определения одного или нескольких механических свойств образца горной породы, причем этот способ предусматривает:

(a) сегментирование цифрового объема изображения, соответствующего изображению образца горной породы;

(b) разбиение цифрового объема изображения для соотнесения множества вокселов в цифровом объеме изображения с множеством зерен образца горной породы;

(c) определение вокселов из числа множества вокселов, которые примыкают друг к другу, для идентификации множества контактных сопряжений между зернами;

(d) определение площади контакта каждого из контактных сопряжений с использованием соседних вокселов на соответствующей поверхности раздела между зернами;

(e) определение количества контактных сопряжений, которое каждое зерно из множества зерен имеет с каждым соседним зерном; и

(f) определение одного или нескольких механических свойств образца горной породы на основании количества контактных сопряжений каждого из множества зерен и площади контакта каждого из контактных сопряжений.

2. Способ по п. 1, дополнительно предусматривающий определение для каждого контактного сопряжения радиуса окружности, площадь которой равна площади контакта соответствующего контактного сопряжения; и

при этом стадия (f) предусматривает определение одного или нескольких механических свойств образца горной породы на основании количества контактных сопряжений каждого из множества зерен и радиуса окружности, соответствующей каждому из контактных сопряжений.

3. Способ по п. 1, в котором, по меньшей мере, некоторые из множества контактных сопряжений представляют собой контактные сопряжения некруглой формы, и в котором стадия (d) предусматривает определение площади контакта каждого из контактных сопряжений некруглой формы с использованием соседних вокселов в месте соответствующего контактного сопряжения некруглой формы.

4. Способ по п. 1, в котором стадия (f) предусматривает определение модуля объемной упругости и модуля сдвига образца горной породы.

5. Способ по п. 1, в котором стадия (f) предусматривает определение одного или нескольких из следующих механических свойств образца горной породы: модуля объемной упругости, модуля сдвига, модуля продольной упругости, коэффициента поперечной деформации, модуля P_{wave}, скорости P_{wave} и скорости S_{wave}.

6. Способ по п. 2, дополнительно предусматривающий вычисление контактной жесткости при сдвиге образца горной породы с использованием радиуса окружности, соответствующей каждому контактному сопряжению.

7. Способ по п. 2, дополнительно предусматривающий вычисление нормальной контактной жесткости образца горной породы с использованием радиуса окружности, соответствующей каждому контактному сопряжению.

8. Система анализа образца горной породы для определения одного или нескольких механических свойств образца горной породы, причем эта система включает в себя:

устройство формирования изображений, выполненное с возможностью генерирования цифрового объема изображения, отображающего образец горной породы; и

вычислительное устройство, соединенное с устройством формирования изображений и включающее в себя:

один или несколько процессоров; и

одно или несколько запоминающих устройств, соединенных с одним или несколькими процессорами и выполненных с возможностью хранения команд, которые при их исполнении одним или несколькими процессорами конфигурируют один или несколько процессоров на выполнение следующих операций:

сегментирования цифрового объема изображения, соответствующего одному или нескольким изображениям образца горной породы, для соотнесения вокселов в цифровом объеме изображения с зернами образца горной породы;

разбиения цифрового объема изображения для соотнесения множества вокселов в цифровом объеме изображения с множеством зерен образца горной породы;

определения вокселов из числа множества вокселов, которые примыкают друг к другу, для идентификации множества контактных сопряжений между зернами;

определения площади контакта каждого из контактных сопряжений с использованием соседних вокселов на соответствующем контактном сопряжении;

определения количества контактных сопряжений, которое каждое зерно из множества зерен имеет с каждым соседним зерном; и

определения одного или нескольких механических свойств образца горной породы на основании количества контактных сопряжений каждого из множества зерен и площади контакта каждого из контактных сопряжений.

9. Система по п. 8, в которой команды дополнительно конфигурируют один или несколько процессоров на выполнение следующих операций:

определения для каждого контактного сопряжения радиуса окружности, площадь которой равна площади контакта соответствующего контактного сопряжения; и

определения одного или нескольких механических свойств образца горной породы на основании количества контактных сопряжений каждого из множества зерен и радиуса окружности, соответствующей каждому из контактных сопряжений.

10. Система по п. 9, в которой, по меньшей мере, некоторые из множества контактных сопряжений представляют собой контактные сопряжения некруглой формы, и в котором команды дополнительно конфигурируют один или несколько процессоров на выполнение следующей операции: определения площади контакта каждого из контактных сопряжений некруглой формы с использованием соседних вокселов в месте соответствующего контактного сопряжения некруглой формы.

11. Система по п. 10, в которой одно или несколько механических свойств включают в себя модуль объемной упругости, модуль сдвига, модуль продольной упругости, коэффициент поперечной деформации, модуль P_{wave}, скорость P_{wave} или скорость S_{wave}.

12. Система по п. 10, в которой команды дополнительно конфигурируют один или несколько процессоров на вычисление контактной жесткости при сдвиге образца горной породы с использованием радиуса окружности, соответствующей каждому контактному сопряжению.

13. Система по п. 10, в которой команды дополнительно конфигурируют один или несколько процессоров на вычисление нормальной контактной жесткости образца горной породы с использованием радиуса окружности, соответствующей каждому контактному сопряжению.

14. Энергонезависимый машиночитаемый носитель данных, в котором закодированы команды, которые при их исполнении инициируют выполнение одним или несколькими процессорами следующих стадий:

сегментирования цифрового объема изображения, соответствующего одному или нескольким изображениям образца горной породы, для соотнесения вокселов в цифровом объеме изображения с зернами образца горной породы;

разбиения цифрового объема изображения для соотнесения множества вокселов в цифровом объеме изображения с множеством зерен образца горной породы;

определения вокселов из числа множества вокселов, которые примыкают друг к другу, для идентификации множества контактных сопряжений между зернами;

определения площади контакта каждого из контактных сопряжений с использованием соседних вокселов на соответствующем контактном сопряжении;

определения количества контактных сопряжений, которое каждое зерно из множества зерен имеет с каждым соседним зерном; и

определения одного или нескольких механических свойств образца горной породы на основании количества контактных сопряжений каждого из множества зерен и площади контакта каждого из контактных сопряжений.

15. Машиночитаемый носитель данных по п. 14, в котором команды дополнительно конфигурируют один или несколько процессоров на выполнение следующих операций:

определения для каждого контактного сопряжения радиуса окружности, площадь которой равна площади контакта соответствующего контактного сопряжения; и

определения одного или нескольких механических свойств образца горной породы на основании количества контактных сопряжений каждого из множества зерен и радиуса окружности, соответствующей каждому из контактных сопряжений.

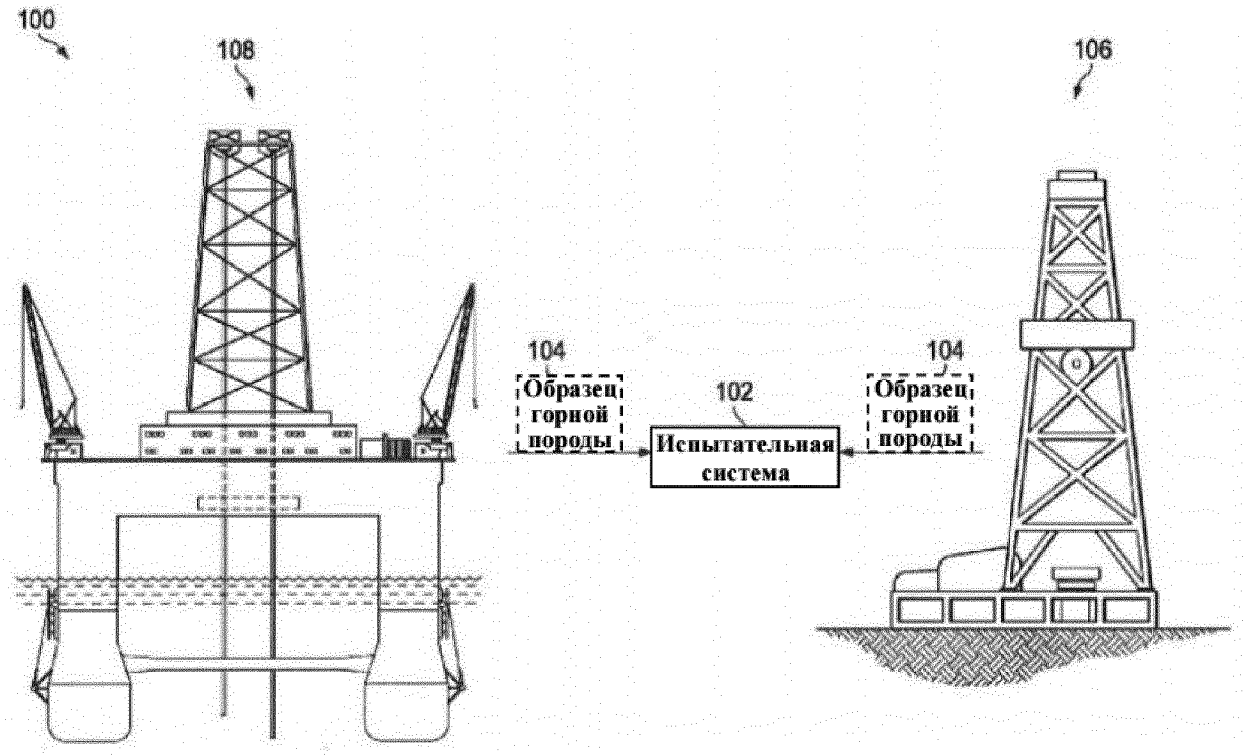
16. Машиночитаемый носитель данных по п. 15, в котором, по меньшей мере, некоторые из множества контактных сопряжений представляют собой контактные сопряжения некруглой формы, и в котором команды дополнительно конфигурируют один или несколько процессоров на выполнение следующей операции: определения площади контакта каждого из контактных сопряжений некруглой формы с использованием соседних вокселов в месте соответствующего контактного сопряжения некруглой формы.

17. Машиночитаемый носитель данных по п. 16, в котором одно или несколько механических свойств включает в себя модуль объемной упругости, модуль сдвига, модуль продольной упругости, коэффициент поперечной деформации, модуль P_{wave}, скорость P_{wave} или скорость S_{wave}.

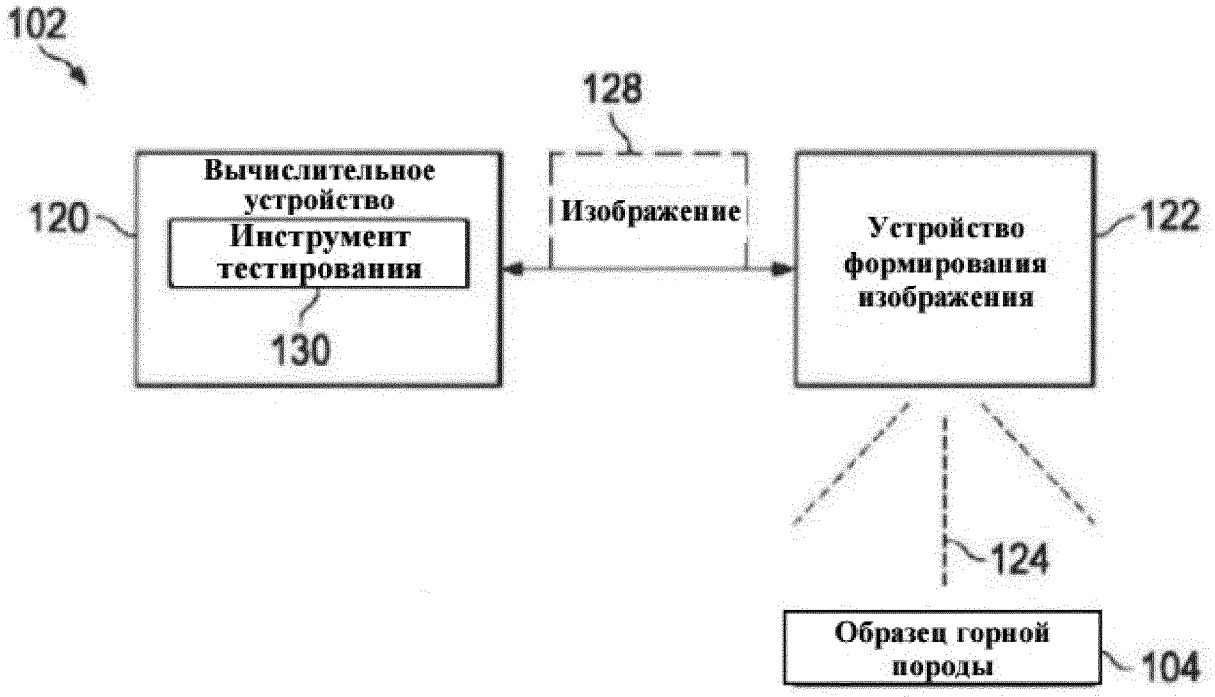
18. Машиночитаемый носитель данных по п. 16, в котором команды дополнительно конфигурируют один или несколько процессоров на вычисление контактной жесткости при сдвиге образца горной породы с использованием радиуса окружности, соответствующей каждому контактному сопряжению.

19. Машиночитаемый носитель данных по п. 16, в котором команды дополнительно конфигурируют один или несколько процессоров на вычисление нормальной контактной жесткости образца горной породы с использованием радиуса окружности, соответствующей каждому контактному сопряжению.

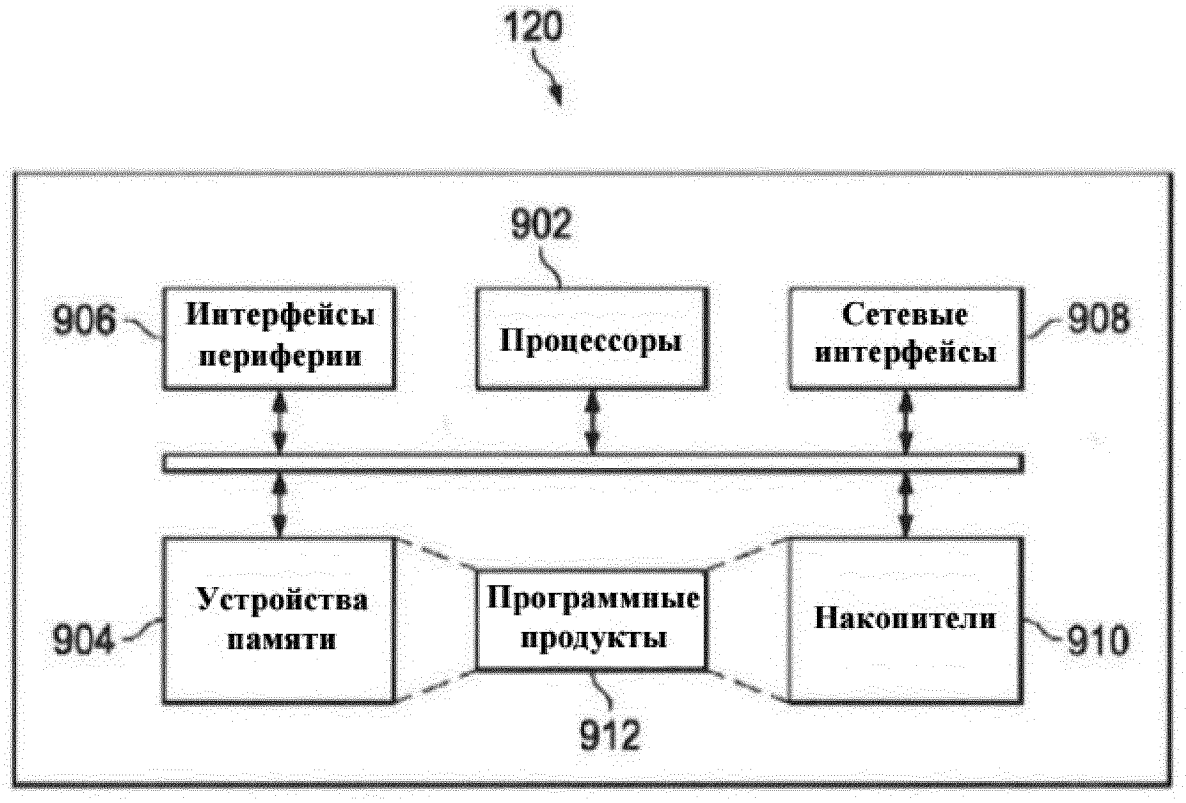
20. Машиночитаемый носитель данных по п. 16, в котором одно или несколько механических свойств включает в себя константу Ламе.


100
108
106
104
Образец горной породы
102
Испытательная система
104
Образец горной породы

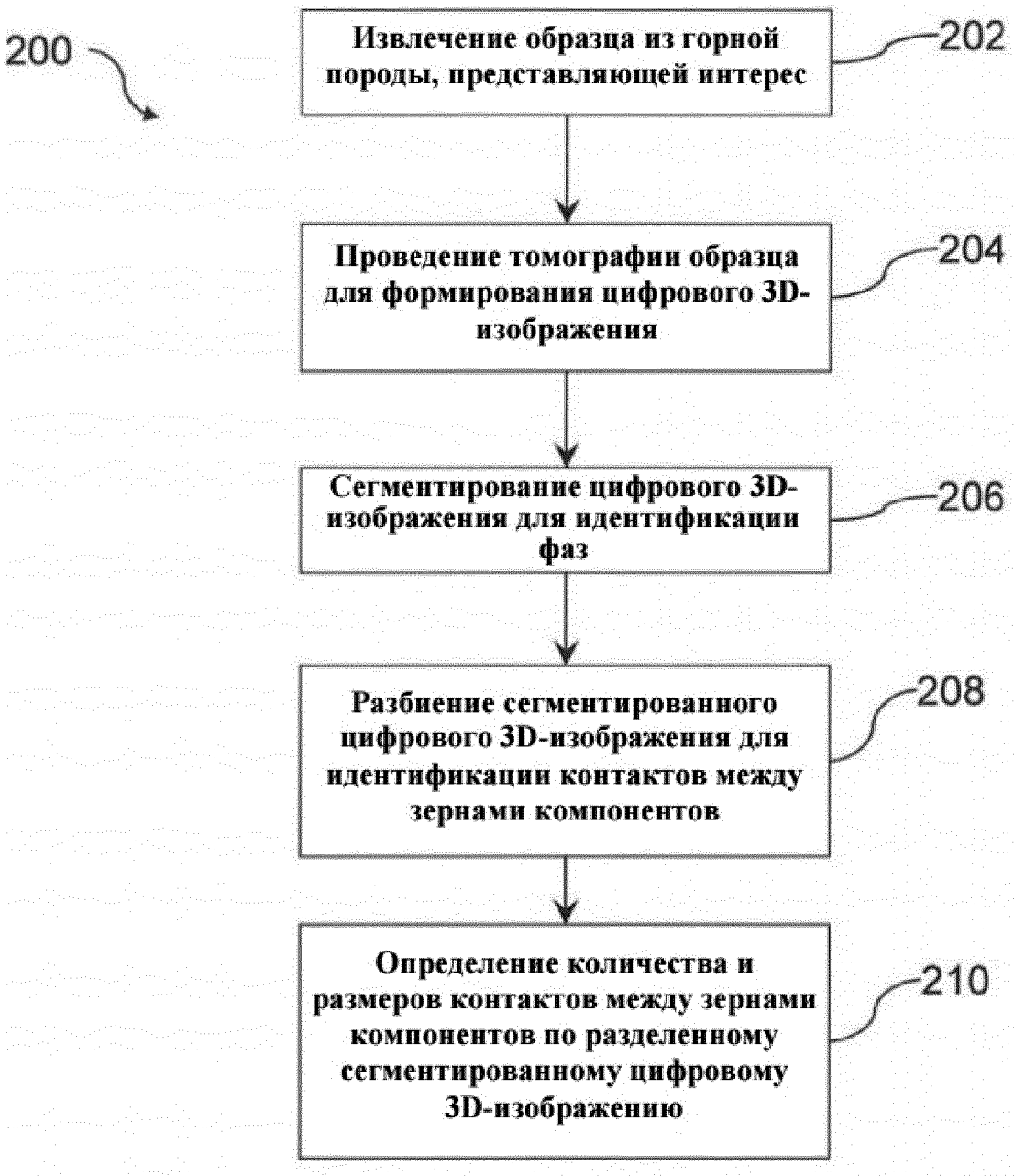
ФИГ. 1А


102
128
Вычислительное устройство
120
Инструмент тестирования
130
Изображение
Устройство формирования изображения
122
124
Образец горной породы
104

ФИГ. 1B

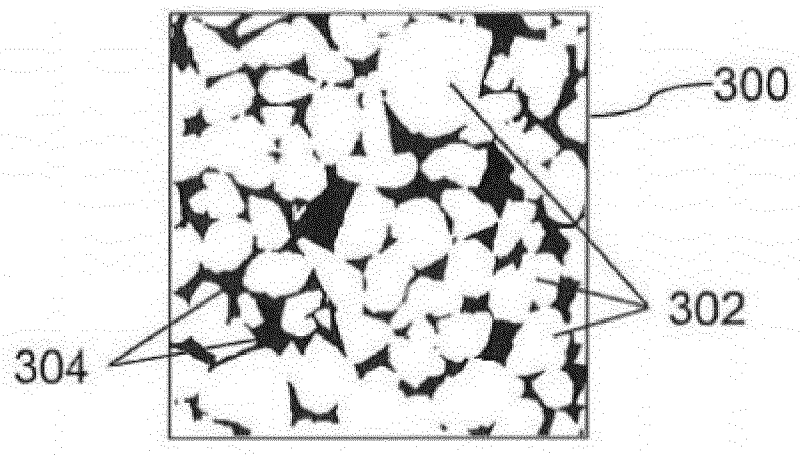

120
902
906
Интерфейсы периферии
Процессоры
Сетевые интерфейсы
908
Устройства памяти
904
Программные продукты
912
Накопители
910

ФИГ. 1C

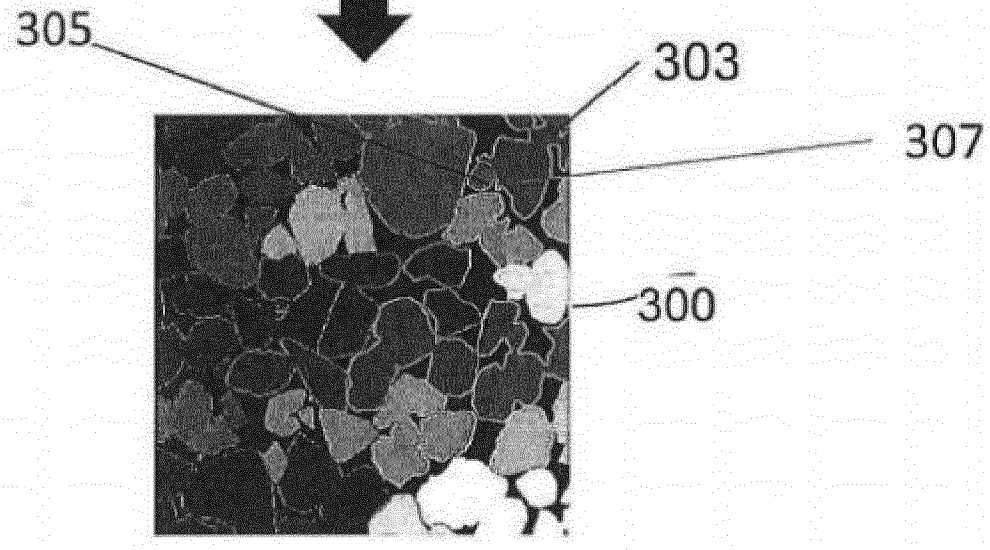

200
Извлечение образца из горной породы, представляющей интерес
202
Проведение томографии образца для формирования цифрового 3D-изображения
204
Сегментирование цифрового 3D-изображения для идентификации фаз
206
Разбиение сегментированного цифрового 3D-изображения для идентификации контактов между зернами компонентов
208
Определение количества и размеров контактов между зернами компонентов по разделенному сегментированному цифровому 3D-изображению
210

ФИГ. 2

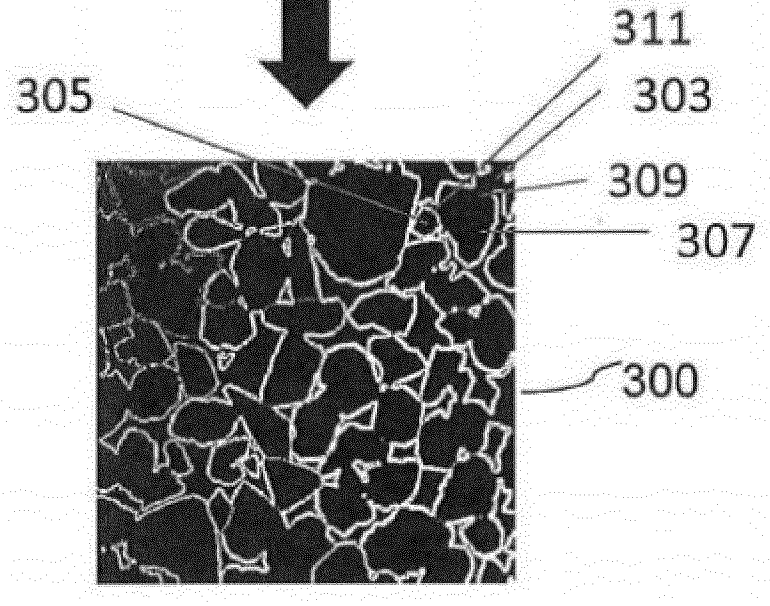
ФИГ. 3А

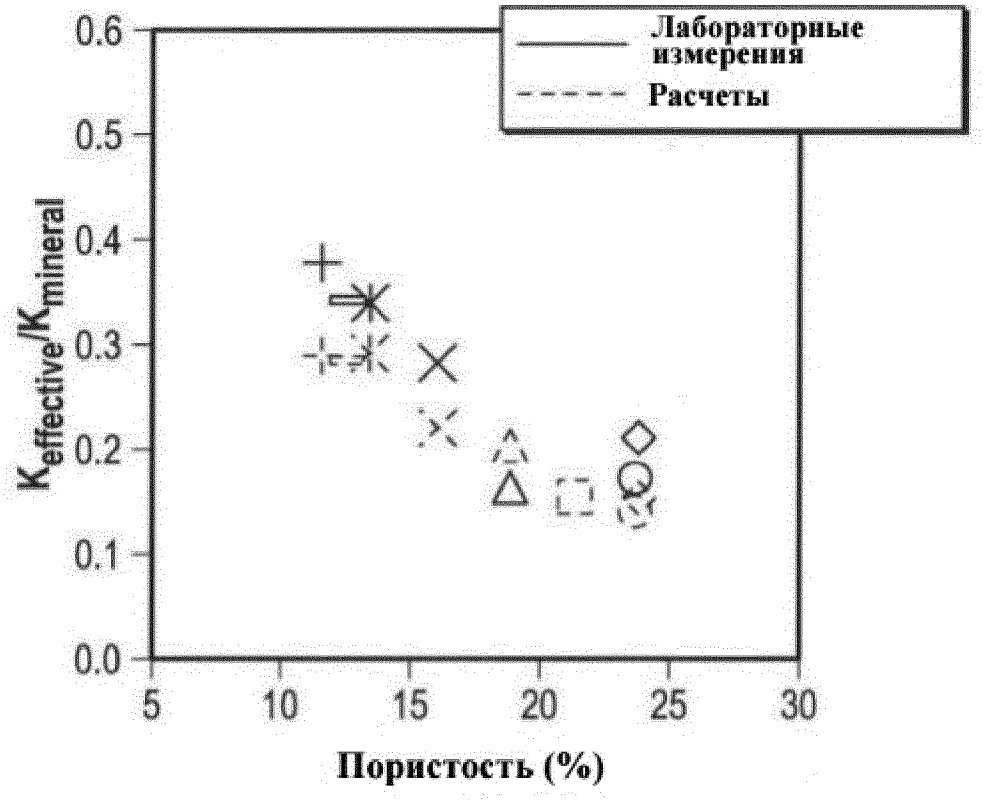


ФИГ. 3В

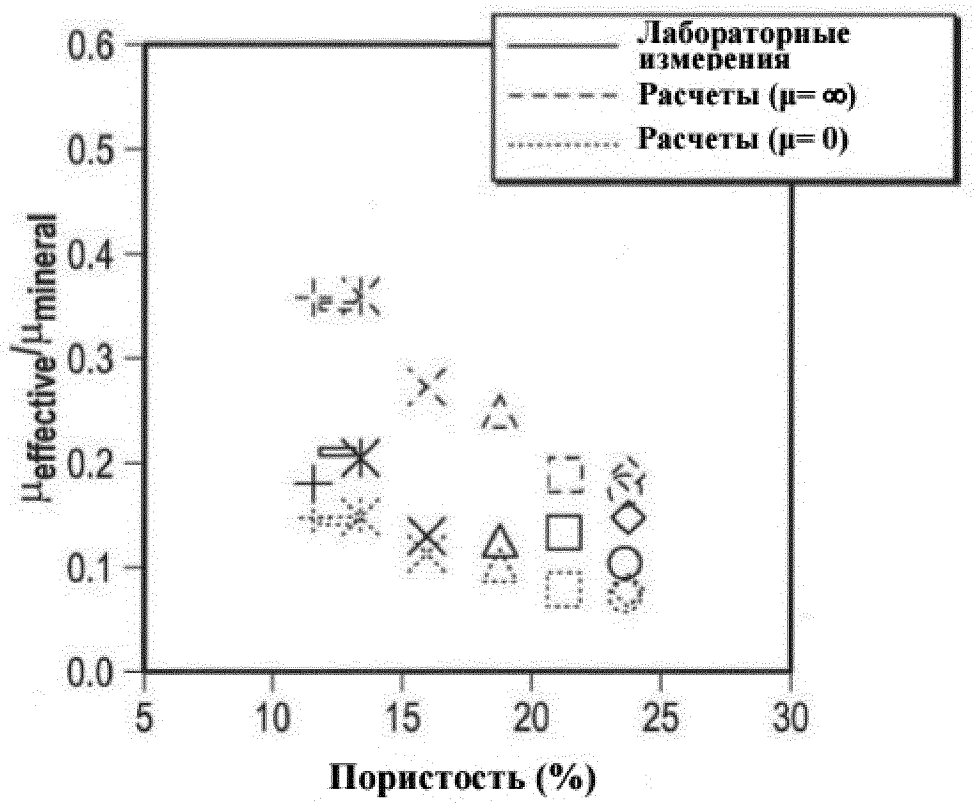


ФИГ. 3С




Лабораторные измерения
Расчеты
$K_{effective}/K_{mineral}$
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
5
10
15
20
25
30
Пористость (%)

ФИГ. 4


Лабораторные измерения
Расчеты (μ= ∞)
Расчеты (μ= 0)
$\mu_{effective}/\mu_{mineral}$
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
5
10
15
20
25
30
Пористость (%)

ФИГ. 5