

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **033836**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента  
**2019.12.02**

(51) Int. Cl. *E21B 43/26* (2006.01)

(21) Номер заявки  
**201691784**

(22) Дата подачи заявки  
**2014.07.03**

---

(54) **СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОНАХОЖДЕНИЯ И ПОСТРОЕНИЯ  
ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРОППАНТА В ИСКУССТВЕННЫХ ТРЕЩИНАХ**

---

(31) **61/948,169**

(56) WO-A1-2014004815  
US-A1-20130138408  
US-A1-20120181020  
US-A1-20100250207

(32) **2014.03.05**

(33) **US**

(43) **2016.12.30**

(86) **PCT/US2014/045427**

(87) **WO 2015/134054 2015.09.11**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:  
**КАРБО КЕРАМИКС, ИНК.; САНДИА  
КОРПОРЕЙШН (US)**

(72) Изобретатель:  
**Олдридж Дэвид Ф., Бартель Льюис С.  
(US)**

(74) Представитель:  
**Лыу Т.Н., Угрюмов В.М., Гизатуллина  
Е.М., Глухарёва А.О., Дементьев  
В.Н., Карпенко О.Ю., Клюкин В.А.,  
Строкова О.В., Христофоров А.А.  
(RU)**

---

(57) В изобретении представлены системы и способы рассеянной инверсии Борна (BSI). Система BSI может быть включена в систему скважины для оценки ресурсов природного газа, нефти и геотермальных ресурсов в геологической формации под землей. Систему BSI можно использовать для построения трехмерного изображения заполненных проппантом искусственных трещин, которые образовались в результате гидравлического разрыва геологической формации. Система BSI может включать вычислительное оборудование и датчики для измерения электромагнитных полей вблизи трещин до и после образования трещин, настройки параметров модели первого приближения Борна для рассеянной компоненты электромагнитных полей на поверхности с использованием измеренных электромагнитных полей и построение изображения заполненных проппантом трещин с использованием настраиваемых параметров.

---

**033836 B1**

**033836 B1**

### **Заявление о государственном интересе**

Правительство Соединенных Штатов Америки обладает правами на настоящее изобретение согласно договору № DE-AC04-94AL85000 между Министерством энергетики США и компанией Sandia на работу национальных лабораторий в г. Сандия.

### **Ссылка на родственные заявки**

Согласно настоящей заявке испрашивается приоритет в соответствии с предварительной заявкой на патент США № 61/948169, поданной 5 марта 2014 г., которая полностью включена в настоящий документ посредством ссылки.

### **Уровень техники**

Поскольку численность населения в мире увеличивается, постоянно продолжаются поиски эффективных способов получения источников энергии, включая природный газ, нефть и геотермальные ресурсы. Одна типичная технология получения доступа к природному газу, нефти и геотермальным ресурсам - это гидравлический разрыв пласта (ГРП или гидроразрыв). Гидравлический разрыв пласта - это процесс инициирования и последующего распространения трещин в геологической формации путем использования жидкости гидроразрыва. Чтобы создать трещины в геологической формации, используют буровой инструмент, которым создают ствол скважины, достигающий глубины в несколько тысяч футов (до нужной толщи горных пород). В ствол скважины помещают обсадные трубы. Обсадные трубы обычно изготовлены из стали. Обсадные трубы в скважине цементируют для крепления обсадных труб в земле. Гидравлический разрыв как правило используют с целью повышения проницаемости сланцевых геологических формаций потоку углеводородов (нефти и/или природного газа) и выработки геотермальной энергии. После цементации обсадных труб в ствол скважины и через перфорации в обсадных трубах закачивают под давлением жидкость гидроразрыва, это давление превышает градиент давления гидравлического разрыва геологической формации. Такое давление вызывает растрескивание (образование трещин) геологической формации. Закачку жидкости гидроразрыва в ствол скважины продолжают с тем, чтобы трещины распространялись дальше в эту формацию. По мере распространения трещин к жидкости гидроразрыва добавляют проппант и закачивают по стволу скважины и в трещины, тем самым расклинивая трещины, которые в результате остаются открытыми и после прекращения закачки жидкости гидроразрыва. В результате геологическая формация становится проницаемой за счет трещин, что позволяет добывать из этой геологической формации природный газ или нефть. Для образования трещин гидроразрыва могут быть использованы вертикальные, горизонтальные и/или наклонные скважины. Обычно этот процесс называют гидравлическим разрывом пласта (ГРП или гидроразрывом).

Поскольку трещины обычно образуются на глубине в тысячи футов под поверхностью земли и поскольку трещины могут распространяться в разных направлениях от ствола скважины и иметь разную ориентацию, определять местоположение трещин в геологической формации сложно. Были разработаны методы моделирования, в которых до начала выполнения гидравлического разрыва пласта рассчитывают электромагнитные поля на поверхности земли, образующиеся в результате приложения электрического тока к разным предполагаемым трещинам, проходящим через ствол скважины. После выполнения гидравлического разрыва пласта измеренное на поверхности земли электромагнитное поле используют для выбора разных предполагаемых трещин. Несмотря на то, что эти методы моделирования были успешными и способствовали определению местоположения искусственных трещин, они ограничены количеством и точностью предполагаемых трещин, которые используют при расчете прогнозных полей.

В отличие от подобных подходов моделирования путем решения прямой задачи уже долгое время было востребовано моделирование путем решения обратной задачи (или обратное моделирование), при котором местоположение и ориентацию трещин прогнозируют, а не просто выбирают из группы предполагаемых трещин. Однако для прогнозирования местоположения трещин, их ориентации, геометрии и пр. по данным измерения электромагнитных полей при помощи традиционных методов электромагнитные поля необходимо много раз рассчитывать и сопоставлять с измеренным полем. Поскольку время вычислений для расчета модели может быть продолжительным, с экономической и практической точки зрения было недопустимо ждать вычисления обратной модели этого типа после проведения гидравлического разрыва пласта прежде, чем добывать природный газ, нефть и геотермальные ресурсы. В силу этих обстоятельств не было предложено решений задачи обратного моделирования, которые были бы экономически целесообразными и пригодными с точки зрения вычислений.

Поэтому было бы желательно обеспечить улучшенные системы и способы оценки гидравлического разрыва пласта и методов заканчивания скважин, полезные при добыче природного газа, нефти и геотермальных ресурсов из геологических формаций.

### **Сущность изобретения**

Ниже представлено краткое изложение сущности изобретения, которое далее в настоящем документе описано более подробно. Настоящее краткое изложение не предназначено ограничивать объем настоящего изобретения.

В настоящем изобретении раскрыта система для определения местонахождения и построения изображения проппанта в трещине, включающая

обсадную трубу, размещаемую в стволе скважины, проходящей от поверхности земли до подземной

геологической формации;

проппант и проводящий материал, размещенные внутри искусственной трещины, распространяющейся, по меньшей мере, практически перпендикулярно от обсадной трубы в геологическую формацию;

источник электрического тока, который электрически связан, по меньшей мере, с частью обсадной трубы, по меньшей мере, частью проводящего материала и множеством датчиков в наборе местоположений датчиков;

базу данных, в которой хранят

геофизическую модель объема земли, включающую геологическую формацию и ствол скважины,

набор местоположений в этом объеме,

электромагнитную модель,

набор местоположений датчиков;

процессор, рассчитанный на

прогнозирование значений электромагнитного поля в наборе местоположений датчиков с использованием электромагнитной модели и геофизической модели путем

вычисления значений первичного электрического поля в наборе местоположений в объеме и

вычисления значений вторичного электрического поля в наборе местоположений датчиков с использованием значений первичного электрического поля в наборе местоположений в объеме,

получение данных измерения электромагнитного поля, собранных в наборе местоположений датчиков,

настройку значений прогнозного электромагнитного поля на основании данных измерения электромагнитного поля,

определение местоположения проппанта в трещине геологической формации с использованием настроенных значений прогнозного электромагнитного поля и

построение изображения проппанта с использованием настроенных значений прогнозного электромагнитного поля.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения множество датчиков включает первое множество датчиков, рассчитанных на регистрацию электрических полей, и второе множество датчиков, рассчитанных на регистрацию магнитных полей.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения по меньшей мере одно из множеств датчиков расположено в стволе скважины.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения электромагнитная модель включает модель первого приближения Борна со множеством борновских рассеивателей, которые находятся в наборе местоположений в объеме.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения вычисление значений вторичного электрического поля включает подстановку эффективных объемных источников, включающих вектор плотности тока, вектор магнитной индукции, вектор электрической индукции или их комбинации, в систему дифференциальных уравнений электромагнитных волн в частных производных, которую решают в явном виде конечно-разностным методом во временной области.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения модель первого приближения Борна включает множество настраиваемых параметров, каждый из которых соответствует электромагнитному свойству материала в одном из наборов местоположений в этом объеме.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения процессор рассчитан на настройку прогнозных значений электромагнитного поля путем настройки множества настраиваемых параметров.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения система дополнительно включает множество датчиков в наборе местоположений датчиков, причем процессор рассчитан на получение данных измерения электромагнитного поля от множества датчиков.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения данные измерения электромагнитного поля включают данные измерения электромагнитного поля, собранные до и после выполнения гидравлического разрыва в геологической формации с использованием ствола скважины.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения процессор рассчитан на настройку множества настраиваемых параметров таким образом, что значения вторичного электрического поля в наборе местоположений датчиков соответствуют разности между данными электромагнитного поля в пределах заранее заданного диапазона, причем данные собраны до и после выполнения гидравлического разрыва пласта.

Также заявлена система для определения местонахождения и построения изображения проппанта в трещине, включающая

пачку электропроводящего проппанта, расположенную внутри искусственной трещины, распространяющейся, по меньшей мере, практически перпендикулярно от ствола скважины в геологическую формацию;

источник электрического тока, который электрически связан, по меньшей мере, с частью пачки электропроводящего проппанта и множеством датчиков в наборе местоположений датчиков;

базу данных, в которой хранят

геофизическую модель объема земли, включающую геологическую формацию и ствол скважины, набор местоположений в этом объеме, электромагнитную модель и набор местоположений датчиков; и процессор, рассчитанный на прогнозирование значений электромагнитного поля в наборе местоположений датчиков с использованием электромагнитной модели и геофизической модели путем вычисления значений первичного электрического поля в наборе местоположений в объеме и вычисления значений вторичного электрического поля в наборе местоположений датчиков с использованием значений первичного электрического поля в наборе местоположений в объеме, получение данных измерения электромагнитного поля, собранных в наборе местоположений датчиков, настройку значений прогнозного электромагнитного поля на основании данных измерения электромагнитного поля, определение местоположения пачки электропроводящего проппанта с использованием настроенных значений прогнозного электромагнитного поля и построение изображения пачки электропроводящего проппанта с использованием настроенных значений прогнозного электромагнитного поля.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения множество датчиков включает первое множество датчиков, рассчитанных на регистрацию электрических полей, и второе множество датчиков, рассчитанных на регистрацию магнитных полей.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения по меньшей мере одно из множеств датчиков расположено в стволе скважины.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения электромагнитная модель включает модель первого приближения Борна со множеством борновских рассеивателей, которые находятся в наборе местоположений в объеме.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения модель первого приближения Борна включает множество настраиваемых параметров, каждый из которых соответствует электромагнитному свойству материала в одном из наборов местоположений в этом объеме, и причем процессор рассчитан на настройку прогнозных значений электромагнитного поля путем настройки множества настраиваемых параметров и

получение данных измерения электромагнитного поля от множества датчиков.

Также заявлена система для определения местонахождения и построения изображения проппанта в трещине, включающая

обсадную трубу, размещенную в стволе скважины, проходящей от поверхности земли до подземной геологической формации;

проппант и проводящий материал, размещенные внутри искусственной трещины, распространяющейся, по меньшей мере, практически перпендикулярно от обсадной трубы в геологическую формацию;

источник электрического тока, который электрически связан по меньшей мере с частью обсадной трубы, по меньшей мере частью проводящего материала и множеством датчиков в наборе местоположений датчиков;

базу данных, в которой хранят

геофизическую модель объема земли, включающую геологическую формацию и ствол скважины,

набор местоположений в этом объеме,

электромагнитную модель и

набор местоположений датчиков; и

процессор, рассчитанный на

прогнозирование значений электромагнитного поля в наборе местоположений датчиков с использованием электромагнитной модели и геофизической модели путем

вычисления значений первичного электрического и/или магнитного полей в наборе местоположений в объеме и

вычисления значений вторичного электрического и/или магнитного полей в наборе местоположений датчиков с использованием значений первичного электрического и/или магнитного полей в наборе местоположений в объеме,

получение данных измерения электромагнитного поля, собранных в наборе местоположений датчиков,

настройку значений прогнозного электромагнитного поля на основании данных измерения электромагнитного поля,

определение местоположения проппанта с использованием настроенных значений прогнозного электромагнитного поля и

построение изображения проппанта с использованием настроенных значений прогнозного электромагнитного поля.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения множество датчиков включает первое множество датчиков, рассчитанных на регистрацию электрических полей, и второе множество датчиков, рассчитанных на регистрацию магнитных полей.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения для вычисления значений первичного электрического и/или магнитного полей в наборе местоположений в объеме используют методологию численного моделирования, выбранную из группы, состоящей из метода конечных разностей, метода конечных элементов, разрывного метода Галеркина, функции Грина и метода пропагаторов слоистой среды и любой их комбинации.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения электромагнитная модель включает модель приближения Борна со множеством борновских рассеивателей, которые находятся в наборе местоположений в объеме.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения вычисление значений вторичного электрического поля включает подстановку эффективных объемных источников, включающих вектор плотности тока, вектор магнитной индукции, вектор электрической индукции или их комбинации, в систему дифференциальных уравнений электромагнитных волн в частных производных, которую решают методом конечных элементов.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения модель приближения Борна включает множество настраиваемых параметров, каждый из которых соответствует электромагнитному свойству материала в одном из наборов местоположений в этом объеме.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения электромагнитная модель включает множество настраиваемых параметров, каждый из которых соответствует электромагнитному свойству материала в одном из наборов местоположений в этом объеме, и процессор рассчитан на настройку прогнозных значений электромагнитного поля путем настройки множества настраиваемых параметров.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения система дополнительно включает множество датчиков в наборе местоположений датчиков, и причем процессор рассчитан на получение данных измерения электромагнитного поля от множества датчиков.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения данные измерения электромагнитного поля включают данные электромагнитного поля, полученные до и после выполнения гидравлического разрыва в геологической формации с использованием ствола скважины.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения процессор рассчитан на настройку множества настраиваемых параметров таким образом, что значения вторичного электрического поля в наборе местоположений датчиков соответствуют разности между данными электромагнитного поля в пределах заранее заданного диапазона, причем данные собраны до и после выполнения гидравлического разрыва пласта.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения система дополнительно включает второе множество датчиков во втором множестве местоположений датчиков, рассчитанных на получение множества значений измерения электромагнитного поля.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения изображение включает трехмерное изображение трещины.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения проппант содержит непроводящий проппант, и проводящий материал содержит проводящий проппант.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения геофизическая модель описывает поверхность земли, ствол скважины, обсадную трубу в их соответствующих трехмерных формах.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения в электромагнитной модели используется метод конечных элементов.

Также заявлена система для определения местонахождения и построения изображения проппанта в трещине, включающая

пачку электропроводящего проппанта, расположенную внутри искусственной трещины;  
источник электрического тока, который электрически связан по меньшей мере с частью пачки электропроводящего проппанта и множеством датчиков в наборе местоположений датчиков;

базу данных, в которой хранят геофизическую модель объема земли, включающую геологическую формацию и ствол скважины, набор местоположений в этом объеме,

электромагнитную модель и набор местоположений датчиков; и процессор, рассчитанный на

прогнозирование значений электромагнитного поля в наборе местоположений датчиков с использованием электромагнитной модели и геофизической модели путем

вычисления значений первичного электрического и/или магнитного полей в наборе местоположений в объеме и

вычисления значений вторичного электрического и/или магнитного полей в наборе местоположений датчиков с использованием значений первичного электрического и/или магнитного полей в наборе

местоположений в объеме,

получение данных измерения электромагнитного поля, собранных в наборе местоположений датчиков,

настройку значений прогнозного электромагнитного поля на основании данных измерения электромагнитного поля,

определение местоположения пачки электропроводящего проппанта с использованием настроенных значений прогнозного электромагнитного поля и

построение изображения пачки электропроводящего проппанта с использованием настроенных значений прогнозного электромагнитного поля.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения множество датчиков включает первое множество датчиков, рассчитанных на регистрацию электрических полей, и второе множество датчиков, рассчитанных на регистрацию магнитных полей.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения для вычисления значений первичного электрического и/или магнитного полей в наборе местоположений в объеме используют методологию численного моделирования, выбранную из группы, состоящей из метода конечных разностей, метода конечных элементов, разрывного метода Галеркина, функции Грина и метода пропагаторов слоистой среды и любой их комбинации.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения электромагнитная модель включает модель приближения Борна со множеством борновских рассеивателей, которые находятся в наборе местоположений в объеме.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения модель приближения Борна включает множество настраиваемых параметров, каждый из которых соответствует электромагнитному свойству материала в одном из наборов местоположений в этом объеме, и причем процессор рассчитан на

настройку прогнозных значений электромагнитного поля путем настройки множества настраиваемых параметров и

получение данных измерения электромагнитного поля от множества датчиков.

Согласно одному из вариантов выполнения изобретения пачка электропроводящего проппанта включает непроводящий проппант.

Также заявлена система для определения местонахождения и построения изображения проппанта в трещине, включающая

обсадную трубу, размещенную в стволе скважины, проходящей от поверхности земли до подземной геологической формации;

пачку проппанта, включающую непроводящий проппант и проводящий материал, размещенную внутри искусственной трещины, распространяющейся, по меньшей мере, практически перпендикулярно от обсадной трубы в геологическую формацию;

источник электрического тока, который электрически связан по меньшей мере с частью обсадной трубы, по меньшей мере частью проводящего материала и множеством датчиков в наборе местоположений датчиков;

базу данных, в которой хранят

геофизическую модель объема земли, включающую поверхность земли,

обсадную трубу, геологическую формацию и ствол скважины,

набор местоположений в этом объеме,

модель конечных элементов,

набор местоположений датчиков;

процессор, рассчитанный на

прогнозирование значений электромагнитного поля в наборе местоположений датчиков с использованием модели конечных элементов и геофизической модели путем

вычисления значений первичного электрического и/или магнитного полей в наборе местоположений в объеме и

вычисления значений вторичного электрического и/или магнитного полей в наборе местоположений датчиков с использованием значений первичного электрического и/или магнитного полей в наборе местоположений в объеме,

получение данных измерения электромагнитного поля, собранных в наборе местоположений датчиков,

настройку значений прогнозного электромагнитного поля на основании данных измерения электромагнитного поля,

определение местоположения пачки проппанта с использованием настроенных значений прогнозного электромагнитного поля и

построение трехмерного изображения пачки проппанта с использованием настроенных значений прогнозного электромагнитного поля.

Другие аспекты будут очевидны специалистам в данной области техники после прочтения и рассмотрения приложенных фигур и их описания.

### Краткое описание чертежей

На фиг. 1 в соответствии с одним вариантом осуществления представлена типичная схема системы скважины, рассчитанной на добычу природного газа или нефти из геологической формации, которая находится под поверхностью земли.

На фиг. 2 в соответствии с одним вариантом осуществления представлена типичная схема части системы скважины, изображенной на фиг. 1, которая демонстрирует местоположения борновских рассеивателей в геологической формации и вокруг нее до гидравлического разрыва пласта.

На фиг. 3 в соответствии с одним вариантом осуществления представлена типичная схема части системы скважины, изображенной на фиг. 1; эта схема демонстрирует местоположения тех же борновских рассеивателей (что и на фиг. 2) в геологической формации и вокруг нее после гидравлического разрыва пласта.

На фиг. 4 в соответствии с одним вариантом осуществления представлена типичная схема набора борновских рассеивателей, которые организованы в трехмерную сетку.

На фиг. 5 в соответствии с одним вариантом осуществления представлена типичная функциональная блок-схема системы, которая облегчает вычисление местоположения и изображение проппанта в трещинах геологической формации под поверхностью земли; показано как в этой системе могут быть переданы и рассчитаны данные.

На фиг. 6 в соответствии с одним вариантом осуществления представлена блок-схема, которая иллюстрирует типичную процедуру вычисления местоположения, длины, ориентации и/или изображения проппанта в трещинах геологической формации под поверхностью земли.

На фиг. 7 в соответствии с одним вариантом осуществления представлена блок-схема, которая более подробно иллюстрирует типичную процедуру, изображенную на фиг. 6.

На фиг. 8 в соответствии с одним вариантом осуществления более подробно представлена типичная процедура, изображенная на фиг. 7.

На фиг. 9 в соответствии с одним вариантом осуществления представлена типичная вычислительная система.

### Подробное описание изобретения

В настоящем документе описаны разные методы, которые относятся к моделированию свойств трещин в геологической формации. Свойства включают размеры и геометрию трещин. Эти свойства определяют или прогнозируют на основании установленных свойств проппанта и/или трещин. Трещины могут быть использованы для добычи из геологической формации природного газа, нефти или геотермических ресурсов.

В раскрываемой методологии и связанном с ней моделировании используют электромагнитную энергию, которая рассеивается от изучаемых подземных геологических, геофизических или искусственных особенностей, для получения высокоразрешенных трехмерных (3D) изображений этих особенностей. Этот способ включает получение изображения или представления трещин гидроразрыва, вызванных в подземной геологической формации после того, как в трещины закачивают расклинивающий материал ("проппант") с подходящими электромагнитными свойствами.

В разных вариантах осуществления в ходе экономически целесообразного и пригодного с точки зрения вычислений обратного моделирования можно определять такие свойства, как размеры, форма, местоположение, ориентация и/или дальность распространения пачки проппанта и трещин. Для построения трехмерного изображения материала проппанта в трещинах может быть использовано моделирование. В настоящем документе термины "материал проппанта" и "проппант" обозначают материал, который включает много (например, тысячи, миллионы и больше) отдельных частиц проппанта. В соответствии с настоящим изобретением раскрывается модель, которая оценивает или рассчитывает значения электромагнитного поля в местоположениях одного или более датчиков на или вблизи поверхности земли, а затем настраивает рассчитанные значения электромагнитного поля в объеме модели земных недр на основании данных измерения электромагнитного поля, которые получают при помощи датчиков до и после выполнения гидравлического разрыва пласта. Эта модель включает геофизическую модель, которую можно называть "моделью геологической среды", причем объем этой модели включает, по меньшей мере, часть геологической формации и ствол скважины. Эта геофизическая модель является трехмерным представлением свойств электромагнитной среды изучаемого объема и включает (но не ограничивается) геологическую формацию, ствол скважины и обсадные трубы, верхнюю часть разреза и поверхность земли.

Эта модель включает в качестве компоненты модель первого приближения Борна (FBA), которое здесь может называться процедурой моделирования, вычислением или выполнением первого приближения Борна. Модель FBA включает вычисления с использованием измеренных электромагнитных полей, причем эти измерения выполняют до и после выполнения гидравлического разрыва пласта для корректировки параметров в модели FBA. Этот способ может называться выполнением рассеянной инверсии Борна (BSI).

FBA - это математическая аппроксимация уравнения Максвелла (основного уравнения электромагнетизма), которое устанавливает линейную связь между напряженностью волнового электромагнитного

поля, рассеянного локализованным перепадом свойств материала (например, заполненной пропантом трещиной в геологической формации), напряженностью падающего волнового электромагнитного поля и величиной этого перепада. Этот перепад может быть описан в разных местоположениях при помощи набора параметров, настраиваемых в модели FBA.

Моделирование FBA включает два последовательных выполнения алгоритма моделирования электромагнитного поля. При первом выполнении в одном или нескольких заранее заданных местоположениях в объеме геологической среды рассчитывают падающие электромагнитные поля, которые могут называться первичными электромагнитными полями. При втором выполнении каждое из заранее заданных местоположений рассматривают как источник волнового электромагнитного поля (в настоящем документе он иногда называется борновским рассеивателем или борновским рассеивающим источником), который активируют падающим электромагнитным полем с предварительно рассчитанной формой волны. При втором выполнении в местоположениях датчиков на поверхности земли рассчитывают рассеянные электромагнитные поля борновских рассеивателей, которые могут называться вторичными электромагнитными полями.

Настраиваемые параметры модели FBA - это пересчетные значения, которые определяют соотношение между напряженностью падающего волнового электромагнитного поля и рассеянного электромагнитного поля. Эти пересчетные значения соответствуют амплитудам рассеяния множества борновских рассеивателей. Рассеянные электромагнитные поля рассчитывают с использованием начальных значений, таких как единичные значения настраиваемых параметров или прогнозное значение электромагнитного параметра.

Данные электромагнитного поля измеряют или получают до и после гидроразрыва и закачки пропанта. Разность между данными поля до, во время и/или после выполнения гидравлического разрыва пласта эквивалентна рассеянному электромагнитному полю, которое в основном вызвано изменениями электромагнитных свойств в некоторых местоположениях в объеме геологической среды. Изменение электромагнитных свойств в некоторых из этих местоположений может быть результатом того, что в трещинах находится пропант. Поэтому для определения местоположения пропанта или пачки пропанта разность между данными измерения поля до и после гидравлического разрыва пласта может быть сопоставлена с рассчитанными рассеянными электромагнитными полями от борновских рассеивателей.

Затем данные о поле используют для настройки параметров модели FBA с тем, чтобы рассчитанные рассеянные электромагнитные поля соответствовали измеренным электромагнитным полям в пределах заранее заданного или определенного диапазона. В некоторых вариантах осуществления скорректированные значения регулируемых параметров определяют по данным измерения поля. В некоторых вариантах осуществления настройка параметров может включать линейную инверсию, что позволяет напрямую найти решение для настроечных параметров. В другом варианте осуществления настройка этих параметров может быть выполнена при помощи другого метода или операции, которые настраивают мощность этих параметров при помощи, например, но не ограничиваясь, электромагнитной миграции, методов полноволновой инверсии и Монте-Карло. Настроенные параметры в каждом местоположении могут показывать есть ли пропант в этом местоположении, поскольку изменение электромагнитных свойств в местоположениях борновских рассеивателей связаны с наличием (или отсутствием) материала пропанта в этих местоположениях.

В одном иллюстративном примере настроенный параметр, равный нулю для борновского рассеивателя, может указывать на то, что этот борновский рассеиватель не расположен в заполненной пропантом трещине или что трещины не существует. Настроенный параметр, отличный от нуля для другого борновского рассеивателя, может указывать на то, что этот борновский рассеиватель расположен в заполненной пропантом трещине. Поэтому значения настроенных параметров могут быть использованы для определения местоположения, формы, размеров, протяженности и/или ориентации пропанта в трещинах. В процессе моделирования с использованием трехмерного распределения борновских рассеивателей значения скорректированных параметров могут быть использованы для формирования трехмерного изображения пропанта в трещинах или других местах в системе скважин.

В соответствии с одним вариантом осуществления предлагается система, которая включает базу данных и процессор, рассчитывающий значения электромагнитного поля и выполняющий корректировку рассчитанных значений электромагнитного поля на основе измеренных данных электромагнитного поля. База данных и процессор могут включать одну или более баз данных и/или процессоров.

В соответствии с одним вариантом осуществления в базе данных хранят геофизическую модель объема геологической среды, который включает геологическую формацию и ствол скважины, набор местоположений борновских рассеивателей в этом объеме, электромагнитную модель для моделирования или расчета электромагнитных данных и набор местоположений датчиков. Процессор рассчитывает значения электромагнитного поля в наборе местоположений датчиков, используя электромагнитную модель и геофизическую модель, он получает данные электромагнитного поля, измеренные в наборе местоположений датчиков с тем, чтобы настроить электромагнитные параметры. Электромагнитная модель включает модель первого приближения Борна, которая рассчитывает величины множества борновских рассеивателей в наборе заранее заданных местоположений в этом объеме.



В соответствии с другим вариантом осуществления процессор рассчитывает значения электромагнитного поля в наборе местоположений датчиков путем расчета значений первичного электрического поля в наборе заранее заданных местоположений борновских рассеивателей в этом объеме и расчета значений вторичного электрического поля в наборе местоположений датчиков с использованием значений первичного электрического поля в наборе местоположений борновских рассеивателей в этом объеме. В соответствии с одним вариантом осуществления предлагается способ, который включает определение множества значений рассеянного электромагнитного поля с использованием модели с настраиваемыми параметрами, выполнение гидравлического разрыва пласта для создания трещин в геологической формации, закачку в трещины проппанта с подходящими электромагнитными свойствами, получение до начала гидравлического разрыва пласта множества значений измеренного электромагнитного поля в первом множестве местоположений датчиков, получение дополнительного множества значений измеренного электромагнитного поля во втором множестве местоположений датчиков в присутствии проппанта с подходящими электромагнитными свойствами в трещинах, определение разности между множеством значений измеренного электромагнитного поля и дополнительным множеством значений измеренного электромагнитного поля, изменение, по меньшей мере, некоторых настраиваемых параметров на основе сопоставления разности между множествами значений рассеянного электромагнитного поля, полученных до и после гидравлического разрыва пласта. Эта модель включает часть модели первого приближения Борна. В соответствии с одним вариантом осуществления первое множество местоположений датчиков совпадает со вторым множеством местоположений датчиков. В соответствии с другим вариантом осуществления первое множество местоположений датчиков отличается от второго множества местоположений датчиков.

В соответствии с одним вариантом осуществления предлагается система, которая включает проводящие обсадные трубы в стволе скважины, которая пробурена с поверхности земли до геологической формации в земле, источник электропитания, который электрически связан с обсадными трубами в скважине, проппант в трещинах геологической формации, электрически связанный с обсадными трубами скважины, множество датчиков в соответствующем множестве местоположений датчиков, причем эти датчики рассчитаны на получение данных об электромагнитном поле, которое образуется при подаче тока на проводящие обсадные трубы в скважине при помощи источника электропитания, и вычислительное оборудование, включающее запоминающее устройство, в котором хранят множество значений электромагнитного поля во множестве местоположений датчиков на основе модели первого приближения Борна, которая включает множество настраиваемых поправочных коэффициентов, и процессор, рассчитанный на получение данных электромагнитного поля от множества датчиков, настройку регулируемых поправочных коэффициентов по данным электромагнитного поля и построение изображения проппанта при помощи скорректированных настраиваемых поправочных коэффициентов.

В соответствии с одним вариантом осуществления предлагаемого изобретения раскрываются система и способ изображения трещин, которые включают полевую регистрацию электромагнитных данных, закачку в трещины подходящего материала проппанта, компьютерную обработку и моделирование зарегистрированных данных и, в итоге, построение трехмерного изображения. Регистрируют два набора данных электромагнитных полей: до и после выполнения гидравлического разрыва пласта. Зарегистрированные электромагнитные данные состоят из временных последовательностей компонент электрического вектора  $e(x, t)$ , магнитного вектора  $h(x, t)$  или обоих векторов, наблюдаемых в наборе местоположений приемников  $x$ .

В соответствии с одним вариантом осуществления предлагаемого изобретения метод регистрации полевых данных включает условие, что источники электромагнитной энергии и датчики в обеих съемках занимают одно и то же или похожее положение. Другие условия регистрации двух наборов данных (например, величины электромагнитной энергии, формы волны, направления источников; чувствительность и ориентация электромагнитных датчиков, фильтры и характеристики дискретизации системы регистрации и пр.) сохраняются идентичными или максимально близкими. Следует свести к минимуму посторонние источники электромагнитной энергии, уровни окружающего шума в повторных съемках должны быть примерно одинаковыми. Предполагают, что разница в электромагнитных данных, зарегистрированных в ходе разных съемок, связана только с появлением заполненных проппантом трещин. Этот метод не ограничен никакой конкретной конфигурацией для регистрации полевых данных. Напротив, источники электромагнитной энергии и приемники могут быть развернуты на поверхности земли или в скважинах (вертикальных, горизонтальных, наклонных) под землей. Могут быть использованы профильные, площадные или даже объемные расстановки (например, в нескольких скважинах) электромагнитных источников и приемников. Однако близость источников и приемников к изучаемому объекту повышает уровень регистрируемого электромагнитного сигнала и обеспечит лучше ограниченные результаты инверсии.

В соответствии с другим вариантом осуществления предлагаемого изобретения источники электромагнитной энергии и/или датчики, которые используют до и после гидравлического разрыва пласта и закачки проппанта, не располагают в тех же местах, а для определения разности электромагнитных сигналов в тех же геофизических местоположениях выполняют интерполяцию данных.

После того как вызвано образование трещин, в них закачивают материал проппанта с характеристиками, которые отличаются от окружающей геологической формации. Основными электромагнитными свойствами являются электрическая проводимость ( $\sigma$ ), диэлектрическая постоянная ( $\epsilon$ ) и магнитная проницаемость ( $\mu$ ). По сравнению с окружающей средой у проппанта может быть повышено значение одного из этих свойств или любого их сочетания (в том числе одновременно всех трех). Чем сильнее перепад электромагнитного свойства материала проппанта и геологической формации, тем мощнее будет рассеянное электромагнитное волновое поле, зарегистрированное при съемке после гидравлического разрыва пласта.

Основные данные, которые используют для изображения заполненных проппантом трещин, включают разность электромагнитных данных, зарегистрированных при съемках до и после гидравлического разрыва пласта. Эти разностные данные напрямую моделируют при помощи численного алгоритма, который основан на применении первого приближения Борна (FBA) к распространению/диффузии волнового электромагнитного поля. FBA устанавливает линейную связь между напряженностью волнового электромагнитного поля, рассеянного локализованным перепадом свойств материала (например, заполненной проппантом трещиной), напряженностью падающего волнового электромагнитного поля и величиной перепада этого свойства. Методология FBA включает два последовательных выполнения алгоритма электромагнитного моделирования. В первом запуске волновое электромагнитное волновое поле, падающее на изучаемый трехмерный объект, регистрируют конечным набором многокомпонентных электромагнитных приемников, которые распределены в объеме, занимаемом этим объектом. В том случае, когда гидравлический разрыв пласта вызывают в известной точке скважины, легко выполняют реальную оценку местоположения и протяженности этого объема. Во втором запуске моделирования FBA приемники считают источниками волнового электромагнитного поля, которые активированы падающими электромагнитными волнами. Величины источников пропорциональны перепаду электромагнитных свойств (электрической проводимости, диэлектрической постоянной и магнитной проницаемости), связанных с материалом изучаемого объекта (проппантом в трещинах). Волновое электромагнитное поле, исходящее из этих источников (часто их называют борновскими рассеивающими источниками), регистрируют датчиками, расположенными в точках регистрации полевых данных. Важное соображение для обоих запусков моделирования FBA состоит в том, что доступна хорошая оценка 3D электромагнитной модели недр, поддерживающей распространение электромагнитных волн. Для расчета электромагнитных данных можно использовать любую предпочтительную методологию численного моделирования (т.е. метод конечных разностей, метод конечных элементов, разрывный метод Галеркина, функции Грина, метод пропагаторов слоистой среды и пр.). Описанный в настоящем документе подход к изображению трещин не зависит от конкретного численного метода.

FBA непосредственно моделирует разность между электромагнитными данными, зарегистрированными в результате двух съемок. Конечно, вначале точного совпадения между рассчитанными и наблюдаемыми не ожидают, для этого имеется две причины: 1) численная 3D модель недр, поддерживающая распространение электромагнитных волн, отличается (следует надеяться, что незначительно) от истинной 3D модели недр; 2) интенсивность борновских рассеивающих источников, расположенных в изучаемом объеме, известна недостаточно точно. На этой стадии процесса изображения трещин интенсивность этих источников настраивают до тех пор, пока рассчитанные и наблюдаемые электромагнитные данные не будут совпадать в пределах заданного допустимого отклонения. Обычной мерой несоответствия данных является взвешенный наименьший квадрат разности между наблюдаемыми временными последовательностями электромагнитных данных и аналогичными данными, смоделированными при помощи подхода FBA. Напомним, что в настоящем описании слово "данные" относится к разнице во временных последовательностях данных, которые были зарегистрированы в ходе съемок до и после гидравлического разрыва пласта. Описанная процедура представляет собой обратную задачу геофизики, при помощи которой количественный прогноз интенсивности борновских рассеивающих источников получают путем минимизации невязки данных. На самом деле это линейная обратная задача, которую решают относительно простыми методами линейной алгебры. Размер или "масштаб" обратной задачи определяют по количеству борновских рассеивающих источников (которое равно количеству многокомпонентных электромагнитных приемников, распределенных в изучаемом объеме); их может быть до нескольких тысяч.

После определения интенсивности множества борновских рассеивающих источников изображение заполненных проппантом трещин получают путем визуализации (при помощи любой предпочтительной программы визуализации) 3D распределения этих борновских рассеивателей. Визуальное изображение (карту или рисунок) калибруют по амплитудам для того, чтобы различать изменяющиеся в пространстве интенсивности рассеяния. Визуальное изображение может быть откалибровано по амплитуде при помощи цветной шкалы. Эти интенсивности пропорциональны перепаду электромагнитных свойств (электрической проводимости, диэлектрической постоянной и магнитной проницаемости) между закачанным проппантом и окружающей геологической средой. В сущности, трещины определяют по 3D распределению откалиброванных по амплитуде борновских рассеивающих источников. Если свойства проппанта недостаточно контрастны или если он не достиг удаленных частей трещин гидравлического разрыва,

тогда этот метод не даст изображения проппанта. Раскрываемую процедуру можно использовать для прогнозирования пространственной протяженности заполнения трещин проппантом.

Ниже следует описание разных методов, касающихся моделирования трещин в геологической формации, со ссылками на чертежи, на которых одинаковые позиции обозначают одинаковые элементы. Кроме того, для пояснения приведены и описаны некоторые функциональные блок-схемы типичных систем; однако следует понимать, что функции, которые описаны как выполняемые отдельными компонентами систем, могут быть выполнены несколькими компонентами. Аналогичным образом, компонента может быть рассчитана на выполнение функции, которая описана как выполняемая несколькими компонентами. Кроме того, термин "типичный" в настоящем документе означает "служащий для иллюстрации или примера" и не указывает на предпочтение. Термин "компонента" относится в настоящем документе к хранилищу пригодных для ввода в компьютер данных, которое настроено при помощи исполняемых компьютером команд, причем при выполнении их процессором эти команды реализуют конкретные функции. Исполняемые компьютером команды могут включать процедуры, функции и подобные им конструкции. Следует также понимать, что компонента или система может быть локализована на одном устройстве или распределена по нескольким устройствам. В соответствии с одним вариантом осуществления раскрываемого изобретения на фиг. 1 представлена система 100 добычи (система). Система 100 добычи рассчитана на добычу природного газа, нефти или геотермальных ресурсов через искусственные трещины 117. Система 100 включает ствол 102 скважины, который проходит от поверхности 104 земли до подземной геологической формации 106 (формации), которая содержит в себе нефть, природный газ или геотермальные ресурсы. Хотя показано, что ствол 102 скважины вертикальный, следует понимать, что ствол 102 скважины и/или формация могут быть вертикальными, горизонтальными, наклонными, диагональными или иметь любое сочетание этих характеристик. Как известно, ствол скважины может проходить в основном вертикально до подземной формации, а затем становиться горизонтальным и проходить через толщу по горизонтали или по латерали. В такой конфигурации искусственные трещины 117 могут распространяться вертикально или горизонтально вовне от ствола 102 скважины. В типичном варианте осуществления формация 106 может находиться в нескольких тысячах футов ниже поверхности 104 земли. Формация 106 может состоять, например, из сланцевых пород. Обсадная труба 108 может быть помещена в ствол 102 скважины и проходить от поверхности 104 до формации 106 или через нее. Обсадная труба 108 может быть установлена в стволе 102 скважины с использованием любого подходящего способа. Обсадная труба 108 обычно изготовлена из стали. Для стабилизации обсадной трубы 108 в стволе 102 скважины может быть создан цементный стабилизатор 110. При закачке в формацию 106 жидкости гидроразрыва и/или проппанта (возможно, под высоким давлением) цементный стабилизатор 110 придает обсадной трубе 108 устойчивость. Цементный стабилизатор 110 может также придавать устойчивость обсадной трубе 108 во время добычи природного газа, нефти или термальных жидкостей из геологической формации 106 через ствол 102 скважины.

Путем использования жидкости гидроразрыва под высоким давлением в формации 106 вызывают образование трещин 117, которые состоят из первых сегментов 118 и вторых сегментов 120. В этом типичном варианте осуществления трещины 117 показаны в упрощенном виде как первые сегменты 118 и вторые сегменты 120, однако следует понимать, что трещины 117 могут состоять из нескольких или множества трещин, которые распространяются горизонтально, вертикально или под разными углами, отделяются или ответвляются от других искусственных трещин и их сочетаний. Трещины могут распространяться на некоторое расстояние по латерали и вертикали в любых направлениях от ствола 102 скважины. Проппant 119 закачивают в ствол 102 скважины, он заполняет или частично заполняет первые сегменты 118 трещин 117, это не позволяет первым сегментам 118 закрыться (за счет чего формация 106 становится более проницаемой для потока флюида). Проппant 119, который заполняет первые сегменты 118, можно назвать "пачкой проппанта", заполняющей первые сегменты 118 (показаны жирными линиями) трещин 117. Вторые сегменты 120 трещин 117, не заполненные проппантом 119, показаны более тонкими линиями, обычно они заполнены водой, песком, газом и/или частицами горных пород из окружающей формации 106. Источник 112 электрического тока, который обычно находится на поверхности 104 земли, соединяют с обсадной трубой 108 в точке 116 подачи (или приложения) тока (которая расположена, например, рядом с забоем ствола скважины 102 в контакте с обсадной трубой 108 вблизи геологической формации 106 и заполненного проппантом сегмента 118 трещины). В другом варианте осуществления источник 112 электрического тока может находиться на или под поверхностью (земли). В другом варианте осуществления точка 116 приложения тока может быть расположена в геологической формации 106, но не в контакте с сегментом 118 трещин, или может быть целиком расположена за пределами геологической формации 106. Электрический ток передают от источника 112 тока к точке 116 приложения тока по изолированному проводу 114, который проходит по стволу 102 скважины. В другом варианте изолированный провод 114 может быть расположен снаружи обсадной трубы 108 (т.е. между обсадной трубой 108 и цементом 110). Еще в одном варианте осуществления источник 112 электрического тока может быть расположен в стволе 102 скважины вблизи от точки 116 приложения тока. Источник 112 электрического тока может быть рассчитан на генерирование разных типов формы волны (т.е. импульсов, непрерывной волны либо повторяющихся или периодических колебаний). Соответственно об-

садная труба 108 может быть подключена к источнику электрического питания и действовать в качестве источника электрического тока, обладающего пространственной протяженностью.

Часть электрического тока, который генерирует источник 112, может проходить от обсадной трубы 108 через проппант 119, находящийся в искусственных трещинах 117 геологической формации 106. Электромагнитные поля, которые образуются под действием тока в обсадной трубе 108 и распространяются до разных местоположений в земле, после закачки проппанта 119 в трещины 117 могут претерпевать изменения из-за присутствия проппанта.

Электромагнитные свойства проппанта 119 могут быть подобраны так, чтобы он был пригоден для генерирования, распространения и/или рассеивания электромагнитных полей, которые могут быть зарегистрированы на поверхности 104 земли. Например, выбранный проппант 119 может иметь конкретную диэлектрическую постоянную, магнитную проницаемость, электрическую проводимость и/или другие электромагнитные или механические свойства, которые отличаются от соответствующих свойств окружающих горных пород формации 106. Таким образом первые сегменты 118 трещин 117, заполненные проппантом 119, будут иметь электромагнитные свойства, которые отличаются от вторых сегментов 120 трещин 117, не заполненных проппантом 119, а также от пород окружающей геологической формации 106. Например, проппант 119 может состоять из электропроводящего материала и тем самым значительно увеличивать электропроводность первых сегментов 118.

В одном варианте осуществления весь проппант, который закачан в ствол скважины и трещины, может состоять из проводящего материала проппанта. Этот пример носит только иллюстративный характер. В разных вариантах осуществления материал проппанта может включать части с разными электромагнитными свойствами в разных частях ствола скважины и/или (сегментах) трещин. Например, в некоторых случаях может быть желательно, чтобы в одной части трещин находился проводящий проппант (например, в части трещин, наиболее удаленных от ствола скважины, или в части трещин, ближайших к стволу скважины), а в другой части трещин или ствола скважины находился бы непроводящий проппант. В другом примере может быть желательно, чтобы электромагнитные свойства материала проппанта непрерывно или дискретно изменялись в зависимости от положения материала проппанта в трещинах.

Закачка в трещины проппанта с разными электромагнитными свойствами (например, непроводящего и проводящего проппанта) может включать смешивание проводящих материалов в разных концентрациях по мере закачки в ствол скважины в непрерывном режиме или с переменными интервалами времени либо может включать закачку в ствол скважины сперва проводящего проппанта, а затем закачку непроводящего проппанта (как пример). В одном варианте осуществления проппант может включать и проводящие и непроводящие материалы. Например, первые 5, 10 или 20% материала проппанта, который закачивают в ствол скважины, могут быть проводящим проппантом, а остальные 95, 90 или 80% материала проппанта, который закачивают в ствол скважины, могут быть непроводящим проппантом, так что проводящей частью материала проппанта могут быть заполнены только трещины (или только "дальняя" часть трещин). Должно быть ясно, что эти примеры носят только иллюстративный характер, и в общем случае можно закачивать любой материал проппанта с подходящими электромагнитными свойствами.

Источник 112 электрического тока, расположенный на поверхности 104 земли, генерирует электрический ток, который течет по изолированному проводу 114 к точке 116 приложения тока, находящейся вблизи геологической формации 106 и заполненных проппантом сегментов 118 трещин в ней. Поскольку точка 116 приложения тока находится в прямом физическом контакте с обсадной трубой 108 и заполненным проппантом первыми сегментами 118 трещин, электрический ток может течь от точки 116 приложения тока к проводящей обсадной трубе 108 и заполненным проводящим проппантом сегментам 118 трещин. Ток течет в обсадной трубе 108, как правило, по вертикали вверх и вниз от точки 116 приложения тока, и при этом в стороны по латерали в геологической формации 106 в пределах заполненных проппантом первых сегментов 118 трещин. Электромагнитные волны 122, образованные токами в обсадной колонне 108 и проппанте 119, распространяются к разным местоположениям в трехмерном объеме земли. В другом варианте осуществления источник 112 электрического тока может находиться на или под поверхностью (земли).

Электрические токи, связанные с электромагнитными волнами 122, в целом, текут в направлении к точке 124 заземления, которая расположена на поверхности 104 земли. В другом варианте осуществления точка 124 заземления может быть расположена на или несколько ниже поверхности земли вблизи или на удалении от ствола 102 скважины. В другом варианте осуществления точка 124 заземления может быть расположена под поверхностью 104 земли в другой скважине, которая находится относительно близко или далеко от скважины и системы 100 добычи и/или системы геологической формации 106. Эта другая скважина может быть задействована или не задействована в процессе гидравлического разрыва пласта. Точка 124 заземления связана с источником 112 электрического тока посредством изолированного провода 126. Таким образом, изолированный провод 114, устройство 116 подачи тока, обсадная труба 108, первые сегменты 118 заполненных проппантом трещин, электромагнитные волны 122, распространяющиеся в земле, устройство 124 заземления и изолированный провод 126 образуют "замкнутый контур", в котором электрический ток течет от источника 112 электрического тока и в конечном счете об-

ратно к нему. В одном варианте осуществления изолированный провод 114 может быть экранирован.

На поверхности 104 земли размещают один или более датчиков, таких как датчики 128. В другом варианте осуществления один или более датчиков 128 могут быть размещены на поверхности 104, над или под ней. Датчики 128 используют для регистрации электромагнитных полей, таких как электромагнитные волны 122, которые распространяются от обсадной трубы 108, подключенной к источнику электрического питания, и первых сегментов 118 заполненных пропантом трещин к датчикам 128. Датчики 128 включают преобразователь (не показан) для обнаружения электромагнитных волн. Датчики 128 могут включать одну или несколько антенн и электронные схемы для передачи, обработки, оцифровки или других операций с данными электромагнитного поля.

Датчики 128 могут быть расположены в соответствующих местоположениях, таких как местоположения L1 и L2 датчиков. Датчики 128 могут иметь одно-, двух- и трехмерное распределение на или вблизи поверхности 104. Например, датчики 128 могут быть размещены на поверхности 104, под поверхностью 104 и/или подвешены или установлены над поверхностью 104. Кроме того, датчики 128 могут быть развернуты в разных других скважинах под землей, расположенных вблизи или на некотором расстоянии от геологической формации 106. В разных вариантах осуществления оптимальные местоположения датчиков 128 для регистрации электромагнитных полей могут быть определены при помощи численного моделирования. Датчики 128 могут включать разные типы физических преобразователей, пригодных для регистрации электрических полей и/или магнитных полей и преобразования этих физических сигналов в напряжение, которое впоследствии направляют в систему 130 регистрации данных. В частности, могут быть использованы датчики, которые обычно используют для геофизических исследований или определения геофизических параметров (например, неполяризующиеся электроды, металлические электроды, электрические/магнитные приемные катушки, антенны).

Датчики 128 соединяют с системой 130 регистрации данных. Система 130 регистрации данных способна получать, усиливать, фильтровать, оцифровывать, обрабатывать и выполнять другие операции с сигналами напряжения, которые генерируют датчики 128 в ответ на поступающие электромагнитные волны 122. Кроме того, в системе 130 регистрации данных можно хранить эти оцифрованные и обработанные сигналы на входящем в ее состав соответствующем носителе информации. В другом варианте при помощи системы 130 регистрации данных можно передавать полученные сигналы на вычислительное оборудование 132, где может быть выполнена дополнительная обработка и могут храниться данные. Вычислительное оборудование 132 может быть размещено вблизи системы 130 регистрации данных или может быть расположено в удаленном месте. Передача данных между системой 130 регистрации данных и вычислительным оборудованием 132 может быть организована по электрическим проводам или при помощи передачи радиосигналов.

В отдельных вариантах осуществления датчик 128 система 130 регистрации данных и вычислительное оборудование 132 могут быть включены в состав единого физического комплекта или блока, который может быть развернут либо на поверхности 104 земли, либо в скважине под землей. Таким образом, в одном физическом устройстве могут быть выполнены отдельные функции преобразования сигнала, усиления, фильтрации, оцифровки, обработки и пр., а также хранения.

Вычислительное оборудование 132 может быть использовано для хранения геофизической/геологической модели, которая представляет трехмерный объем земли и поддерживает распространение электромагнитных волн 122 (в состав модели входит конкретная геологическая формация 106, которая содержит в себе трещины 117). На этом оборудовании можно также хранить данные, которые относятся к известному местоположению точки 116 приложения тока, а также известную амплитуду и форму волны электрического тока, который генерирует источник 112 тока. На нем можно также хранить известную трехмерную конфигурацию ствола 102 скважины с соответствующей обсадной трубой 108 и цементом 110, а также известные местоположения электромагнитных датчиков 128. На нем можно хранить данные, которые относятся к местоположениям ряда борновских рассеивателей в объеме под землей.

На вычислительном оборудовании 132 можно также хранить численные алгоритмы, пригодные для расчета разных электромагнитных полей, включая те, что поступают на поверхностные датчики 128 (в виде электромагнитных волн 122), поступают в подземные местоположения борновских рассеивателей или рассеяны этими подземными борновскими рассеивателями. Вычислительное оборудование 132 может содержать численные алгоритмы и программы для получения данных электромагнитного поля с датчиков 128 и/или системы 130 регистрации данных, настройки параметров для модели первой аппроксимации Борна в области под землей с использованием этих полученных электромагнитных данных и определения местоположения и геометрии пропанта 119 в трещинах 117 при помощи этих настроенных параметров. Вычислительное оборудование 132 может быть использовано для построения изображения заполненных пропантом сегментов 118 трещин 117 с использованием соответствующего программного обеспечения для визуализации путем отображения в трехмерном пространстве величин борновских рассеивателей. На вычислительном оборудовании 132 можно выполнять все требуемые функции расчета, анализа, численного моделирования, обработки данных и визуализации, которые связаны с рассеянной инверсией Борна (BSI), для изображения заполненных пропантом сегментов 118 трещин 117.

Датчики 128 могут быть использованы для сбора данных электромагнитного поля до, во время и после гидравлического разрыва пласта и закачки проппанта. Вблизи от ствола 102 скважины может находиться оборудование, например оборудование 134 для бурения и добычи, которое используют для создания, укрепления, закачки, добычи или других работ по бурению и/или добыче. Местоположения вычислительного оборудования 132 следует сохранять (не изменять) во время сбора датчиками 128 данных электромагнитных полей так, чтобы электропроводящее оборудование не перемещали или не изменяли режим работы и тем самым не искажали измеряемые электромагнитные поля. Таким образом, изменения в измеряемых электромагнитных полях до и после гидравлического разрыва пласта и закачки проппанта могут быть в первую очередь или полностью отнесены за счет присутствия в трещинах пачки проппанта 119; тем самым увеличивается вероятность того, что первое приближение Борна применимо к рассеянным электромагнитным полям.

Поэтому можно показать, что при подключении обсадной трубы 108 к источнику электрического тока (посредством устройства 116 подачи тока) с тем, чтобы она действовала в качестве источника электрического тока, электрическое поле может быть возбуждено и зарегистрировано датчиками 128 на поверхности 104 земли. Данные этих измерений, выполненных до и после гидравлического разрыва и закачки проппанта, впоследствии можно использовать для настройки параметров рассеянного электромагнитного поля в модели первого приближения Борна и, таким образом, указать местоположение и геометрию заполненных проппантом сегментов 118 трещин 117 в геологической формации 106. Термин "геометрия" в настоящем описании может относиться к размерам, форме, длине, высоте, ширине, ориентации и пр. заполненных проппантом сегментов 118 трещин 117. "Ориентация" может относиться к ориентации, по меньшей мере, сегмента 118 заполненной проппантом трещины по отношению к поверхности 104 или стволу 102 скважины под землей. Термин "местоположение" может относиться к положению сегмента 118 трещины относительно поверхности 104, ствола скважины 102 и/или точки 116 приложения тока.

На фиг. 2 показана часть геологической формации до гидравлического разрыва. Как видно из фиг. 2, один или несколько борновских рассеивателей 200 могут быть определены в геофизической модели земли в разных местоположениях (например, местоположения рассеивателей L1', L2' и пр.) в объеме земли в геологической формации 106 и вокруг нее. Местоположения рассеивателей, такие как местоположения L1' и L2', могут быть выбраны на основе геологической модели геологической формации и любых априорных знаний о планируемом гидравлическом разрыве. Местоположения рассеивателей могут быть выбраны в любом подходящем количестве местоположений в геологической формации 106 и вокруг нее. Например, можно выбрать одно местоположение рассеивателя, два местоположения рассеивателей, десять местоположений рассеивателей, сто местоположений рассеивателей, тысячу местоположений рассеивателей, более тысячи местоположений рассеивателей, десятки тысяч местоположений рассеивателей, от ста до тысячи местоположений рассеивателей или любое подходящее число местоположений рассеивателей. Для использования в модели первого приближения Борна борновский рассеиватель может быть определен в каждом местоположении рассеивателей.

При моделировании электромагнитного поля с использованием модели первого приближения Борна, например при рассеянной инверсии Борна, геофизическую модель объема земли в местоположении ствола скважины, геологической формации и трещин используют для расчета первичных электромагнитных полей (иногда их называют падающими электромагнитными полями или полями падающего электромагнитного излучения) в местоположениях рассеивателей. В одном варианте осуществления геофизическая модель может включать местоположение обсадной трубы и источника электропитания. В первом запуске моделирования борновские рассеиватели считают приемниками первичных электромагнитных полей.

В соответствии с моделью FBA изменения электромагнитных свойств земли в местоположениях борновских рассеивателей будут приводить к образованию вторичных электромагнитных полей (в настоящем документе их иногда называют рассеянными электромагнитными полями). Поскольку в трещины закачивают проппант с подходящими электромагнитными свойствами, трещины можно моделировать как изменения электромагнитных свойств некоторых борновских рассеивателей.

Как показано на фиг. 3, когда в геологической формации созданы трещины 117, эти трещины 117 могут проходить через некоторые местоположения рассеивателей 200. Местоположения рассеивателей 200 включают местоположения рассеивателей в заполненных проппантом трещинах 200P и местоположения рассеивателей вне заполненных проппантом трещин 200F. Проппант, который обладает электромагнитными свойствами (например, диэлектрической постоянной, магнитной проницаемостью, электрической проводимостью), отличающимися от соответствующих свойств геологической формации, может находиться в местоположениях этих рассеивателей 200P.

Электромагнитные свойства в местоположениях рассеивателей 200P значительно изменятся после закачки проппанта в трещины. Однако электромагнитные свойства рассеивателей 200F (которые находятся в трещине, но на удалении от проппанта) и рассеивателей 200 (которые расположены вдали от трещин) изменятся меньше, чем свойства рассеивателей 200P, либо совсем не изменятся.

Как описано выше для фиг. 1, первое приближение Борна - это приближение, в котором рассеянное

электромагнитное поле в местоположениях борновских рассеивателей пропорционально изменению электромагнитных свойств этих борновских рассеивателей и падающим электромагнитным полям.

Поэтому учитывая первичные (или падающие) электромагнитные поля в местоположениях борновских рассеивателей и начальную оценку электромагнитных свойств материала в этих местоположениях (представленную, например, набором начальных значений настраиваемых параметров), можно рассчитать вторичные (или рассеянные) электромагнитные поля, сгенерированные борновскими рассеивателями в ответ на воздействие первичных электромагнитных полей. Вторичные электромагнитные поля в местоположениях датчиков 128 могут быть образованы, например, суммарным вкладом от всех борновских рассеивателей в геологической формации 106 и вокруг нее.

Для сопоставления с рассчитанными рассеянными полями получают два набора данных измерения электромагнитного поля от датчиков (например, до и после выполнения гидравлического разрыва). Разница между данными двух измерений электромагнитного поля может быть связана только или в первую очередь с появлением трещин, заполненных проппантом. Таким образом, разность данных измерений электромагнитного поля можно использовать для настройки рассчитанного рассеянного электромагнитного поля путем настройки параметров, соответствующих электромагнитным свойствам борновских рассеивателей.

Данные измеренного (наблюдаемого) электромагнитного поля, полученные в определенное время  $t$ , могут включать измеренную разность потенциалов  $\Delta V(x_s, t)$  и/или производную магнитной индукции по времени  $\partial b(x_s, t)/\partial t$ , наблюдаемые в наборе местоположений  $x_s$  датчиков (например, трехмерный вектор положения, который представляет местоположение датчика, такое как местоположения датчиков L1 или L2 на фиг. 1), по которым можно определить или спрогнозировать вектор напряженности электрического поля  $e_m(x_s, t)$  и/или вектор измеренного магнитного поля  $h_m(x_s, t)$ .

Рассчитанные данные первичного (или падающего) электромагнитного поля могут включать рассчитанный вектор первичного электрического поля  $e_p(x_B, t)$ , вектор магнитного поля  $h_p(x_B, t)$  или оба этих вектора, рассчитанных в наборе местоположений борновских рассеивателей  $x_B$ , (например, трехмерный вектор положения, который представляет местоположение рассеивателя, такое как местоположения рассеивателей L1' или L2' на фиг. 2).

Рассчитанные данные вторичного (или рассеянного) электромагнитного поля могут включать вектор электрического поля  $\delta e_p(x_s, t)$ , вектор магнитного поля  $\delta h_p(x_s, t)$  или оба этих вектора, рассчитанных в наборе местоположений датчиков  $x_s$ , (например, трехмерный вектор положения, который представляет местоположение датчика, такое как местоположения датчиков L1 или L2 на фиг. 1). Данные вторичного электромагнитного поля определяют путем вычисления эффективных объемных электромагнитных источников в каждом местоположении рассеивателей  $x_B$  с использованием первичных электрических полей  $e_p(x_B, t)$ , магнитных полей  $h_p(x_B, t)$  или обоих полей и набора настраиваемых параметров, который представляет изменение электромагнитных свойств борновского рассеивателя в этом местоположении рассеивателя  $x_B$ . Эффективные объемные источники и набор настраиваемых параметров могут быть использованы для расчета вторичных электромагнитных полей путем подстановки эффективных объемных источников и набора настраиваемых параметров в любой подходящий алгоритм моделирования электромагнитных полей путем решения прямой задачи в модификации для первого приближения Борна. Подходящие алгоритмы прямого моделирования электромагнитных полей могут включать широко известную систему дифференциальных уравнений электромагнитных волн в частных производных "ЕН", которую решают в явном виде конечно-разностными методами в временной области, или при помощи других подходящих численных методов решения. Другие подходящие методы моделирования путем решения прямой задачи могут включать формулы функции или потенциала Грина, модифицированные для FBA.

Набор настраиваемых параметров может включать изменение электрической проводимости  $\delta\sigma(x_B)$ , изменение диэлектрической постоянной  $\delta\epsilon(x_B)$  и/или изменение магнитной проницаемости  $\delta\mu(x_B)$  в каждом местоположении рассеивателя  $x_B$ , или изменение всех трех параметров или любого их сочетания.

Эффективные объемные источники могут включать вектор плотности тока  $\delta j(x_B, t)$ , вектор магнитной индукции  $\delta b(x_B, t)$  и/или вектор электрической индукции  $\delta d(x_B, t)$  в каждом местоположении рассеивателя  $x_B$ . В модели FBA эффективные объемные источники (и, следовательно, вторичные электромагнитные поля, которые генерируют эффективные объемные источники) пропорциональны падающему электромагнитному полю. Например, в модели FBA вектор плотности тока  $\delta j(x_B, t)$  является произведением падающего электрического поля и изменения электрической проводимости (например,  $\delta j(x_B, t) = \delta\sigma(x_B) e_p(x_B, t)$ ), вектор магнитной индукции  $\delta b(x_B, t)$  является произведением падающего магнитного поля и изменения проницаемости (например,  $\delta b(x_B, t) = \delta\mu(x_B) h_p(x_B, t)$ ), а вектор электрической индукции  $\delta d(x_B, t)$  - это произведение падающего электрического поля и изменения диэлектрической постоянной (например,  $\delta d(x_B, t) = \delta\epsilon(x_B) e_p(x_B, t)$ ).

Поскольку электромагнитные свойства земли в некоторых местоположениях борновских рассеивателей изменяются после закачки проппанта в трещины, после вычисления вторичных (или рассеянных) электромагнитных полей они могут быть настроены в соответствии с изменением электромагнитных

полей, наблюдаемым в местоположениях датчиков. Это можно выполнить путем модификации настраиваемых параметров в модели первого приближения Борна для вторичных (или рассеянных) электромагнитных полей путем, например, линейной оценки настраиваемых параметров, которая дает наилучшее соответствие с наблюдаемыми изменениями электромагнитных полей. Во время полевых измерений источники электромагнитной энергии и датчики могут занимать одно и то же положение во время обеих съемок. Условия регистрации (например, величина, форма волны и ориентация источников электромагнитной энергии; чувствительность и ориентация электромагнитных приемников, усилители системы регистрации, фильтры и характеристики дискретизации и пр.) во время обеих съемок также могут быть максимально близкими.

В некоторых обстоятельствах датчики могут быть перемещены из первого набора местоположений датчиков во второй набор местоположений датчиков для получения данных электромагнитных полей до выполнения гидравлического разрыва и после закачки проппанта в трещины. В этих условиях математические методы могут быть использованы для параллельного переноса, вращения, интерполяции и другого способа определения измеренных и/или модельных электромагнитных полей в первом и/или втором наборах местоположений датчиков или для оценки измеренных и/или модельных электромагнитных полей в одном из первых или вторых наборов местоположений датчиков на основании определенных модельных и/или измеренных электромагнитных полей в другом из первых или вторых наборов местоположений датчиков. Этот пример носит только иллюстративный характер. В разных вариантах осуществления местоположения датчиков сохраняют одними и теми же для всех измерений электромагнитных полей и всех определений модельных электромагнитных полей с тем, чтобы снизить затраты вычислительных ресурсов при выполнении моделирования и гарантировать, что изменение электромагнитных полей в первую очередь связано с закачкой проппанта.

В некоторых вариантах осуществления рассчитать вклад во вторичные электромагнитные поля от каждого борновского рассеивателя можно в отдельном запуске моделирования. Этот пример носит только иллюстративный характер. В некоторых вариантах осуществления рассчитать вклады во вторичные электромагнитные поля от каждой из нескольких групп борновских рассеивателей можно в соответствующих запусках моделирования. В одном варианте осуществления вклад всех борновских рассеивателей может быть рассчитан в одном запуске моделирования. Общее вторичное электромагнитное поле в каждом местоположении датчика является суммой вкладов всех борновских рассеивателей.

Примеры на фиг. 2 и 3 - это схемы в разрезе. Однако должно быть ясно, что борновские рассеиватели 200 могут быть распределены в объеме земли и в геологической формации трехмерным способом.

На фиг. 4 представлен пример трехмерного распределения борновских рассеивателей. В примере, изображенном на фиг. 4, борновские рассеиватели 200 распределены в данном объеме регулярной трехмерной сетки в местоположениях рассеивателей  $(x_B, y_B, z_B)$ , которые иногда в совокупности называют вектором  $x_B$ . Этот пример носит только иллюстративный характер. Борновские рассеиватели могут быть распределены по любой подходящей схеме для моделирования местоположения проппанта и/или изображения проппанта в трещинах путем выполнения, например, рассеянной инверсии Борна. Объем, в котором расположены рассеиватели 200, может быть выбран так, чтобы он включал объем земли, который включает по меньшей мере часть геологической формации, в которой трещины созданы или будут созданы.

Как видно на фиг. 4, для определенных борновских рассеивателей вектор 400 падающего (первичного) электрического поля (например,  $e_p = [e_x, e_y, e_z]$  в системе координат фиг. 4) может быть вычислен, например, в первом запуске моделирования. Во втором запуске моделирования может быть вычислена плотность 402 тока (например,  $\delta j_p = [\delta j_x, \delta j_y, \delta j_z]$ ). Плотность 402 тока может быть использована для расчета рассеянного (вторичного) электрического поля в местоположении одного или более датчиков 128, изображенных на фиг. 1.

На фиг. 5 представлен вариант осуществления потока данных и вычислительной системы 5000 для определения местоположения проппанта и/или изображения проппанта в трещинах геологической формации. На фиг. 5 показано, что система 5000 включает хранилище 500 данных, программу 502 моделирования первичного поля, программу 504 моделирования вторичного поля, программу 510 обработки данных измерений, программу 512 согласования данных и программу 514 построения изображения.

Хранилище 500 данных, программа 502 моделирования первичного поля, программа 504 моделирования вторичного поля, программа 510 обработки данных измерений, программа 512 согласования данных и программа 514 построения изображения могут быть реализованы на общем вычислительном оборудовании или одном или нескольких отдельных устройствах вычислительного оборудования. В одном варианте осуществления программа 502 моделирования первичного поля, программа 504 моделирования вторичного поля или некоторые или все хранилища 500 данных могут быть расположены на удалении от буровой площадки, на которой расположен ствол скважины, а программа 510 обработки данных измерений, программа 512 согласования данных и программа 514 построения изображения могут быть расположены на буровой площадке (например, включены в состав вычислительного оборудования 132, изображенного на фиг. 1). Этот пример носит только иллюстративный характер. Хранилище 500 данных, программа 502 моделирования первичного поля, программа 504 моделирования вторичного поля, про-



грамма 510 обработки данных измерений, программа 512 согласования данных и программа 514 построения изображения могут быть реализованы на общем вычислительном оборудовании 132 (см. фиг. 1) или одном или нескольких отдельных устройствах вычислительного оборудования. Как видно на фиг. 5, программа 502 моделирования первичного поля и программа 504 моделирования вторичного поля могут быть соединены с хранилищем 500 данных. При желании другие части системы на фиг. 5 могут также быть соединены с хранилищем 500 данных с возможностью обмена данными. Например, программа 502 моделирования первичного поля, программа 504 моделирования вторичного поля и/или любая другая часть системы, изображенной на фиг. 5, могут иметь доступ к запоминающему устройству на чтение и/или запись и к информации, которую хранят в хранилище 500 данных.

Хранилище 500 данных может быть использовано для хранения геофизической модели 501, модели источника 503 электрического тока, одного или нескольких местоположений 505 борновских рассеивателей, одного или нескольких типов и местоположений 507 датчиков, данных 509 и 511 модельных и/или измеренных электромагнитных полей или другой сопутствующей информации, данных, численных алгоритмов и/или машиночитаемых инструкций для использования в системе, изображенной на фиг. 5.

Геофизическая модель 501 может включать хранимые данные, которые описывают трехмерные размеры, форму и местоположение физических структур, таких как геологические формации, поверхность земли, ствол скважины, обсадная труба, слои горных пород, почва и/или вода между трещинной геологической формацией 106, изображенной на фиг. 1, и поверхностью, оборудование для бурения и добычи на буровой площадке, другие физические структуры и электромагнитные свойства (например, проводимость, проницаемость, диэлектрическая проницаемость и пр.) этих структур.

Электромагнитные данные, хранимые в хранилище 500 данных, могут включать модельные (т.е. рассчитанные или вычисленные) электромагнитные данные 509 и/или измеренные электромагнитные данные 511. Измеренные электромагнитные данные 511 могут поступать в хранилище 500 данных из системы 508 регистрации электромагнитных данных, которая может быть физически расположена рядом с буровой площадкой, как показано на фиг. 1. Помимо модельных и измеренных данных хранилище 500 данных может содержать в себе исполняемый код, который представляет процесс моделирования первого приближения Борна с набором настраиваемых параметров  $P$  (например, параметр изменения электрической проводимости  $\delta\sigma(x_B)$ , параметр изменения диэлектрической постоянной  $\delta\epsilon(x_B)$  и/или параметр изменения магнитной проницаемости  $\delta\mu(x_B)$  в каждом местоположении  $x_B$  рассеивателя). При выполнении на одном или нескольких процессорах с использованием геофизической модели 501, модели 503 источника электрического тока, местоположений 505 рассеивателей и местоположений 507 датчиков программа моделирования путем решения прямой задачи может давать в выбранных местоположениях рассчитанные (или модельные) значения электромагнитного поля в зависимости от времени  $t$ . Значения электромагнитного поля могут быть рассчитаны при помощи программы 502 моделирования первичного поля и/или программы 504 моделирования вторичного поля с использованием любого пригодного подхода численного моделирования (например, метода конечных разностей, метода конечных элементов, разрывного метода Галеркина, функции Грина, метода пропагаторов слоистой среды или любой другой пригодной процедуры расчета численными методами).

Программу 502 моделирования первичного поля используют для расчета данных 516 первичного электромагнитного поля (например, значений первичного или падающего электромагнитного поля) в одном или нескольких местоположениях борновских рассеивателей  $x_B$  в объеме земли, причем этот объем включает по меньшей мере часть геологической формации, где планируют гидравлический разрыв пласта. Модельные данные 516 первичного поля могут включать прогнозное первичное электрическое поле  $e_p(x_B, t)$  и/или прогнозное первичное магнитное поле  $h_p(x_B, t)$  в зависимости от времени  $t$  в местоположениях рассеивателей  $x_B$ . Данные 516 модельного первичного поля могут быть рассчитаны с использованием геофизической модели 501, модели 503 источника электрического тока и местоположений 505 рассеивателей, которые хранят в хранилище 500 данных.

Программу 504 моделирования вторичного поля используют для расчета данных 518 вторичного электромагнитного поля (например, значений вторичного или рассеянного электромагнитного поля) в одном или нескольких местоположениях датчиков  $x_s$ , распределенных на поверхности земли (как датчики 128, изображенные на фиг. 1) или под землей. Данные 518 модельного вторичного поля могут включать вектор  $\delta e_p(x_s, t; P)$  прогнозного вторичного электрического поля и/или вектор  $\delta h_p(x_s, t; P)$  прогнозного магнитного поля в зависимости от времени  $t$  в местоположениях датчиков  $x_s$ . Эти модельные вторичные электромагнитные поля также зависят от настраиваемых параметров  $P$ , которые связаны с мощностью борновских рассеивающих источников. Данные 518 модельного вторичного поля могут быть рассчитаны с использованием геофизической модели 501, модели 503 источника электрического тока, местоположений 505 рассеивателей, местоположений 507 датчиков, которые хранят в хранилище 500 данных.

Местоположения 505 рассеивателей, которые используют в программах моделирования первичного и вторичного полей, представляют местоположения L1 и L2 датчиков 128, которые изображены на фиг. 1 и которые также соответствуют местоположениям 506 электромагнитных датчиков, изображенных на фиг. 5. Эти датчики используют для измерения данных электромагнитного поля до и после выполнения

гидравлического разрыва пласта и закачки проппанта.

Электромагнитные датчики 506 передают данные измерений в систему 508 регистрации электромагнитных данных, где эти данные хранят на соответствующем носителе информации. Например, электромагнитные датчики 506 используют для сбора данных электромагнитного поля до гидравлического разрыва и закачки проппанта и для сбора данных электромагнитного поля после гидравлического разрыва и закачки проппанта. Эти два набора измеренных данных обозначены на фиг. 5 буквами А и В, что соответствует измеренным данным электромагнитного поля after (после) и before (до) гидравлического разрыва и закачки проппанта. Измеренные данные могут включать вектор электрического поля  $e_m(x_s, t; A$  и  $B)$  и/или вектор магнитного поля  $h_m(x_s, t; A$  и  $B)$ , наблюдаемых в местоположениях датчиков  $x_s$ , вместе их называют двумя наборами измеренных электромагнитных данных в местоположениях 520 датчиков. Эти два набора измеренных электромагнитных данных могут быть в первую очередь или полностью разными в силу добавления к геологической формации 106 (изображена на фиг. 1) заполненных проппантом трещин.

Эти два набора измеренных электромагнитных данных в местоположениях 520 датчиков (обозначены буквами А и В) передают в программу 510 обработки измеренных данных. Программа 510 обработки измеренных данных может получать эти наборы данных двумя альтернативными способами или путями. В первом случае система 508 регистрации электромагнитных данных в реальном времени или в режиме, близком к реальному времени, передает эти данные напрямую в программу 510 обработки измеренных данных в ходе измерения этих электромагнитных данных. Во втором случае система 508 регистрации электромагнитных данных передает эти данные в хранилище 500 данных, где их содержат в компьютерном запоминающем устройстве как измеренные электромагнитные данные 511 для последующего доступа к ним программы 510 обработки измеренных данных.

Программа 510 обработки измеренных данных может быть использована для выполнения разных операций обработки двух измеренных наборов электромагнитных данных А и В с целью повышения качества сигнала, подавления помех и пр. Затем программу 506 обработки измеренных данных используют для генерации данных 522 изменений в измеренных электромагнитных данных в местоположениях датчиков на основании двух измеренных наборов электромагнитных данных в местоположениях 520 датчиков (обозначены как А и В). Данные 522 изменений в измеренных данных, например, включают разность (т.е. результат вычитания) наборов данных А и В. Данные изменений в измеренных данных могут включать электрический вектор  $\Delta e_m(x_s, t)$  и/или магнитный вектор  $\Delta h_m(x_s, t)$ . Данные 522 изменений в измеренных данных в местоположениях датчиков представляют рассеянную часть данных электромагнитного поля 520, которое образуется из-за присутствия проппанта в трещинах.

Модельные вторичные электромагнитные данные 518 в местоположениях датчиков (например, рассчитанные данные вторичного электромагнитного поля в местоположениях датчиков 506, основанные на подходе моделирования FBA) и данные 522 изменения измерений в местоположениях датчиков (например, данные измеренного рассеянного электромагнитного поля в местоположениях датчиков 506) передают в программу 512 согласования данных. Поскольку модельные вторичные электромагнитные данные 518 генерируют с использованием начального набора настраиваемых параметров Р, который "ничего не знает" о заполненных проппантом трещинах, модельные вторичные электромагнитные данные 518 и данные 522 изменений в измеренных данных могут быть разными.

Программу 512 согласования данных используют для настройки настраиваемых параметров (например, набора параметров Р, соответствующего электромагнитным свойствам материала в местоположениях борновских рассеивателей  $x_B$ ), пока не будет достигнуто соответствие модельных вторичных электромагнитных данных 518 в местоположениях датчиков и данных изменений в измерениях в местоположениях 522 датчиков в пределах заранее заданного или определенного диапазона. В одном варианте для количественной оценки степени несовпадения модельных данных 518 и измеренных данных 522 может быть использован взвешенный наименьший квадрат разности. Конкретный набор параметров PFIT, который минимизирует разность взвешенных наименьших квадратов, может быть найден при помощи широко известных методов линейной алгебры. Этот пример носит только иллюстративный характер. В разных других вариантах осуществления для настройки настраиваемых параметров Р до достижения надлежащего совпадения модельных вторичных электромагнитных данных 518 и данных 522 изменений в измерениях могут быть использованы любые подходящие процедуры согласования данных. Конкретный набор параметров, который дает наилучшее совпадение (т.е. минимальную невязку), представляет собой набор оптимальных параметров PFIT.

Оптимальный набор 524 настраиваемых параметров (т.е. набор согласованных параметров PFIT), дающий модельные вторичные электромагнитные данные 518, которые наилучшим образом соответствуют данным 522 изменений в измерениях, может быть передан в программу 514 построения изображения. Программа 514 построения изображения может использовать оптимальные параметры 524 для определения местоположения проппанта в трещинах и/или для построения двух- или трехмерного изображения 526 пачки проппанта. Поскольку каждый из настраиваемых параметров (Р) пропорционален величине изменения электромагнитного свойства материала в местоположениях борновских рассеивателей, для построения изображения 526 проппанта могут быть использованы значения оптимальных парамет-

ров (PFIT). Местоположения рассеивателей  $x_B$  выступают в качестве эффективных пикселей в двумерных координатах или вокселей в трехмерных координатах. Этот пример носит только иллюстративный характер. В разных вариантах осуществления программа 514 построения изображения может выполнять обработку изображения, например масштабирование, повышение четкости, сглаживание, фильтрацию и другие виды обработки изображения для формирования изображения 526 проппанта.

Изображение 526 может быть построено в режиме, близком к режиму реального времени, сразу после выполнения гидравлического разрыва пласта для передачи изображения закачанного в трещины проппанта руководителю буровых работ или группе бурения. Затем это изображение может быть сразу же использовано для дальнейшего выполнения гидравлического разрыва пласта и закачки проппанта.

На фиг. 6 представлены операции моделирования гидравлического разрыва в геологической формации, которые могут быть выполнены при помощи вычислительного оборудования, такие как описаны выше в связи с фиг. 1 и 5.

В блоке 600 могут быть измерены электромагнитные поля вблизи трещин гидроразрыва до и после образования трещин гидроразрыва. Трещины гидроразрыва могут содержать в себе материал проппанта с электромагнитными свойствами, подобранными так, чтобы повышать возможность обнаружения в электромагнитных полях на поверхности. Электромагнитные поля на поверхности также могут быть измерены во время выполнения гидравлического разрыва пласта с целью создания трещин гидроразрыва. Трещины гидроразрыва могут быть созданы в геологической формации в объеме земли. В блоке 602 параметры модели FBA электромагнитных полей на поверхности могут быть настроены с использованием электромагнитных полей, измеренных на поверхности. Эти параметры могут быть настроены путем вычисления разности между электромагнитными полями, измеренными на поверхности до и после создания трещин, сопоставления модельных электромагнитных полей, вычисленных с использованием модели первого приближения Борна, и электромагнитными полями, измеренными на поверхности, и настройки параметров на основании этого сопоставления. Каждый из этих параметров может соответствовать изменению электромагнитного свойства материала, такого как горная порода или проппант, в местоположении борновского рассеивателя.

В блоке 604 местоположение проппанта, такого как пачка проппанта в трещинах, может быть определено с использованием настроенных параметров. Размеры, форма и ориентация пачки проппанта в трещинной формации могут быть также определены с использованием настроенных параметров.

В блоке 606 трехмерное изображение пачки проппанта может быть построено с использованием настроенных параметров.

Дополнительные подробности действий, которые могут быть выполнены для моделирования трещин гидроразрыва в геологической формации, представлены на фиг. 7.

На стадии 700 при помощи множества датчиков получают первые значения измеренного электромагнитного поля. Множество датчиков может быть расположено на или вблизи от поверхности земли, как описано выше, например, для фиг. 1. Кроме того, датчики могут быть установлены в скважинах под землей.

На стадии 702 выполняют гидравлический разрыв пласта.

На стадии 704 пачку проппанта с подходящими электромагнитными свойствами закачивают в трещины, созданные путем выполнения гидравлического разрыва. Пачка проппанта может частично или целиком заполнять эти трещины. Материал проппанта может обладать диэлектрической постоянной, магнитной проницаемостью, электрической проводимостью и/или другими электромагнитными свойствами, которые отличаются от соответствующих свойств окружающей геологической формации. Проппант может быть закачан так, что пачка проппанта соединена с обсадной трубой, которая используется при выполнении гидравлического разрыва, и в нее поступает электрический ток от источника электропитания, прикрепленного к обсадной трубе скважины.

На стадии 706 при помощи того же множества датчиков получают вторые значения измеренного электромагнитного поля.

На стадии 708 изменения значений электромагнитного поля, наблюдаемые в местоположениях датчиков, моделируют с использованием процедуры первого приближения Борна (FBA) с настраиваемыми параметрами. Настраиваемые параметры соответствуют изменениям электромагнитных свойств набора борновских рассеивателей в модели FBA. На стадии 710 параметры модели первого приближения Борна настраивают на основании модельных значений изменения поля и значений первого и второго измеренных полей. Например, модельные (т.е. прогнозные) значения изменений поля могут быть настроены путем настройки параметров модели FBA с тем, чтобы минимизировать разность между модельными значениями изменения поля и измеренными значениями изменения поля (т.е. разностью между значениями первого и второго измеренных полей).

На стадии 712 на основании настроенных параметров модели FBA может быть определено местоположение пачки проппанта.

На стадии 714 двух- или трехмерное изображение пачки проппанта может быть создано с использованием настроенных параметров.

Еще более подробно действия, которые могут быть выполнены для моделирования электромагнит-

ных полей, рассеянных заполненными проппантом трещинами гидроразрыва, и формирования трехмерного изображения этих трещин, представлены на фиг. 8.

На стадии 800 значения модельного первичного (или падающего) электрического и/или магнитного полей в наборе заранее заданных местоположений в объеме земли определяют с использованием геофизической модели. Геофизическая модель может включать геологическую формацию, которая расположена, по меньшей мере, частично в этом объеме, другие слои земли, поверхность земли, ствол скважины, обсадную трубу и/или другие геологические и геофизические особенности в этом объеме. Набор заранее заданных местоположений может быть набором местоположений в пределах или поблизости от геологической формации, в которой при моделировании первого приближения Борна (FBA) определены борновские рассеивающие источники.

На стадии 802 значения модельного вторичного (или рассеянного) электрического и/или магнитного полей в местоположениях набора датчиков определяют с использованием геофизической модели, значений модельного первичного электромагнитного поля в наборе заранее заданных местоположений и процедуры моделирования первого приближения Борна с настраиваемыми параметрами.

На стадии 804 при помощи множества датчиков получают измеренные значения первого электрического и/или магнитного полей.

На стадии 806 после получения (путем съемки) значений измеренного первого электрического и/или магнитного полей выполняют гидравлический разрыв пласта.

Гидравлический разрыв пласта может быть выполнен в части геологической формации в этом объеме.

На стадии 808 в трещины, созданные при выполнении гидравлического разрыва пласта, закачивают пачку проппанта с подходящими электромагнитными свойствами. На стадии 810 после закачки проппанта в трещины используют множество датчиков для получения (путем выполнения съемки) значений измеренных вторых электрических и/или магнитных полей.

На стадии 812 по значениям измеренных первых и вторых электрических и/или магнитных полей могут быть получены значения разности. Эти значения разности могут быть определены, например, путем вычитания на каждом датчике вторых измеренных значений из первых измеренных значений. Этот пример носит только иллюстративный характер. В разных вариантах осуществления другие способы вычисления разностей, корреляции или сопоставления могут быть использованы для определения изменений во вторых измеренных электромагнитных полях по сравнению с первыми измеренными электромагнитными полями.

На стадии 814 значения разности измерений сопоставляют с модельными значениями вторых электрических и/или магнитных полей стадии 802. Сопоставление значений разности со значениями модельных вторичных электрических и/или магнитных полей может включать определение дополнительной разности между значениями разности измерений и модельными значениями вторичного электрического или магнитного поля для каждого датчика, вычисление суммы квадратов этих дополнительных разностей, вычисление взвешенной суммы квадратов этих дополнительных разностей, вычисление суммы абсолютных значений этих дополнительных разностей или другой способ количественного сопоставления этих дополнительных разностей.

На стадии 816 настраиваемые параметры модели первого приближения Борна (FBA) могут быть настроены на основании предшествующего сопоставления 814 значений разности измерений и значений вторых модельных электрических и/или магнитных полей. Настройка параметров может включать изменение некоторых или всех параметров по сравнению с их начальными значениями с тем, чтобы изменить модельное вторичное электрическое и/или магнитное поля для согласования значений разности измерений в пределах допустимого отклонения. Например, эти параметры могут быть настроены так, чтобы минимизировать взвешенную сумму квадратов разностей между значениями разности измерений и значениями модельного вторичного электрического и/или магнитного полей для каждого датчика. Настройка этих параметров может изменить вклад каждого из борновских рассеивающих источников в модельное электрическое и/или магнитное поля путем настройки соответствующего перепада одного или нескольких электромагнитных свойств материала в местоположении каждого борновского рассеивающего источника.

На стадии 818 местоположение, размеры, форма, ориентация или другие свойства пачки проппанта в трещинах могут быть определены на основании этих настроенных параметров.

На стадии 820 с использованием настроенных параметров может быть создано двух- или трехмерное изображение пачки проппанта. Это изображение может быть откалибровано по амплитуде (например, при помощи цветной шкалы) для того, чтобы различать изменяющиеся в пространстве интенсивности рассеивания борновских рассеивателей, представленные настроенными параметрами.

На стадии 822 образование трещин и/или размещение проппанта в результате выполнения гидравлического разрыва могут быть оценены с использованием определенного местоположения, размеров, формы, ориентации и/или изображения пачки проппанта.

На фиг. 9 представлена обобщенная схема типичного вычислительного устройства 900, которое может быть использовано в соответствии с раскрываемыми в настоящем документе системами и методо-

логиями. Например, вычислительное устройство 900 может быть использовано в системе, которая поддерживает вычисление оценок электромагнитных полей, вызванных подключенной к источнику электрического тока обсадной трубой и заполненными пропантом трещинами в системе скважины с использованием модели первого приближения Борна. В другом примере по меньшей мере часть вычислительного устройства 900 может быть использована в системе, которая поддерживает оценку размеров, местоположения, длины, ориентации и/или изображения пропанта в искусственных трещинах в геологической формации под поверхностью земли. Вычислительное устройство 900 включает по меньшей мере один процессор 902, исполняющий команды, которые хранят в запоминающем устройстве 904. Это запоминающее устройство 904 может быть ОЗУ (RAM), ПЗУ (ROM), электронно-стираемым устройством ППЗУ (EEPROM), флеш-памятью (flash memory) или включать их, а также может быть другим подходящим запоминающим устройством. Команды могут быть, например, командами на выполнение функций, описанных как выполняемые одной или несколькими описанными выше компонентами или командами для реализации одного или нескольких описанных выше способов. Процессор 902 может иметь доступ к запоминающему устройству 904 посредством системной шины 906. Помимо хранения исполняемых команд, запоминающее устройство 904 может также хранить основанные на программном обеспечении модели обсадной трубы/труб и/или трещины/трещин, значений, которые показывают количество электрического тока, приложенного к обсадной трубе, значения, которые показывают местоположение на обсадной трубе, к которому прикладывают электрический ток, местоположения датчиков, местоположения рассеивателей, модель первого приближения Борна с настраиваемыми параметрами и пр.

Вычислительное устройство 900 дополнительно включает хранилище 908 данных, которое доступно для процессора 902 посредством системной шины 906. Хранилище 908 данных может быть любым подходящим машиночитаемым хранилищем, которое включает жесткий диск, запоминающее устройство и пр., либо может включать его. Хранилище 908 данных может включать исполняемые команды, модели, основанные на программном обеспечении, и пр. Вычислительное устройство 900 также включает входной интерфейс 910, который позволяет внешним устройствам взаимодействовать с вычислительным устройством 900. Например, входной интерфейс 910 может быть использован для получения команд от внешнего компьютерного устройства, пользователя и пр. Вычислительное устройство 900 также включает выходной интерфейс 912, который обеспечивает взаимодействие вычислительного устройства 900 с одним или несколькими внешними устройствами. Например, вычислительное устройство 900 может отображать текст, изображения и пр. на дисплее 930 посредством выходного интерфейса 912.

Кроме того, несмотря на то, что вычислительное устройство 900 изображено как единая система, следует понимать, что оно может быть распределенной системой. Так, например, несколько устройств могут поддерживать связь друг с другом при помощи сетевого соединения и могут вместе выполнять задачи, которые описаны как задачи, выполняемые вычислительным устройством 900.

В соответствии с одним вариантом осуществления предлагается система, которая включает базу данных, в которой хранят геофизическую модель объема земли, которая включает геологическую формацию и ствол скважины, набор местоположений в этом объеме, электромагнитную модель и набор местоположений датчиков; и процессор, который рассчитан для прогнозирования значений электромагнитного поля в наборе местоположений датчиков с использованием электромагнитной модели и геофизической модели, получения данных измерения электромагнитного поля, полученных в этом наборе местоположений датчиков, и настройку значений прогнозного электромагнитного поля на основе данных измерения электромагнитного поля.

В соответствии с другим вариантом осуществления процессор дополнительно рассчитан на определение местоположения пропанта в трещинах геологической формации с использованием настроенных значений прогнозного электромагнитного поля.

В соответствии с другим вариантом осуществления процессор дополнительно рассчитан на построение изображения пропанта с использованием настроенных значений прогнозного электромагнитного поля.

В соответствии с другим вариантом осуществления электромагнитная модель включает модель первого приближения Борна со множеством борновских рассеивателей в наборе местоположений в объеме.

В соответствии с другим вариантом осуществления процессор рассчитан на прогнозирование значений электромагнитного поля путем расчета значений первичного электрического поля в наборе местоположений в объеме и вычисление значений вторичного электрического поля в наборе местоположений датчиков с использованием значений первичного электрического поля в наборе местоположений в этом объеме.

В соответствии с другим вариантом осуществления модель первого приближения Борна включает множество настраиваемых параметров, каждый из которых соответствует электромагнитному свойству материала в одном из наборов местоположений в этом объеме.

В соответствии с другим вариантом осуществления процессор рассчитан на настройку прогнозных значений электромагнитного поля путем настройки множества настраиваемых параметров.

В соответствии с другим вариантом осуществления система дополнительно включает множество

датчиков в наборе местоположений датчиков, и процессор рассчитан на получение данных измерения электромагнитного поля от множества датчиков.

В соответствии с другим вариантом осуществления данные измерения электромагнитного поля включают данные электромагнитного поля, полученные до и после выполнения гидравлического разрыва в геологической формации с использованием ствола скважины.

В соответствии с другим вариантом осуществления процессор рассчитан на настройку множества настраиваемых параметров таким образом, что значения вторичного электрического поля в наборе местоположений датчиков в пределах заранее заданного диапазона соответствуют разности между данными электромагнитного поля, полученными до и после выполнения гидравлического разрыва пласта.

В соответствии с одним вариантом осуществления предлагается метод, который включает определение множества значений рассеянного электромагнитного поля с использованием модели с настраиваемыми параметрами; выполнение гидравлического разрыва пласта для создания трещин в геологической формации; закачку в эти трещины пропанта с подходящими электромагнитными свойствами; получение множества измеренных значений электромагнитного поля во множестве местоположений датчиков до выполнения гидравлического разрыва; получение в этих трещинах дополнительного множества измеренных значений электромагнитного поля во втором множестве местоположений датчиков в присутствии пропанта с подходящими электромагнитными свойствами; определение разности между множеством измеренных значений и дополнительным множеством измеренных значений электромагнитного поля; изменение по меньшей мере некоторых настраиваемых параметров на основе сопоставления этой разности со множеством значений рассеянного электромагнитного поля.

В соответствии с другим вариантом осуществления модель включает модель первого приближения Борна, причем первое множество местоположений датчиков совпадает со вторым множеством местоположений датчиков, и определение множества значений рассеянного электромагнитного поля с использованием модели с настраиваемыми параметрами включает определение множества значений первичного электромагнитного поля в наборе заранее заданных местоположений в объеме земли, который, по меньшей мере, частично включает геологическую формацию и определение множества значений рассеянного электромагнитного поля в первом множестве местоположений датчиков с использованием модели первого приближения Борна и с использованием определенного множества первичных электромагнитных полей.

В соответствии с другим вариантом осуществления этот способ дополнительно включает применение электрического тока к стволу скважины, причем этот ствол проходит от поверхности земли к геологической формации.

В соответствии с другим вариантом осуществления изменение, по меньшей мере, некоторых настраиваемых параметров на основе сопоставления множества значений рассеянного электромагнитного поля с разностью включает определение набора настроенных параметров, которые минимизируют дополнительную разность между этой разностью и определенным множеством значений рассеянного электромагнитного поля. В соответствии с другим вариантом осуществления этот способ дополнительно включает определение местоположения пропанта в трещинах с использованием набора настроенных параметров и набора заранее заданных местоположений в этом объеме.

В соответствии с другим вариантом осуществления модель первого приближения Борна включает множество борновских рассеивателей, каждый из которых расположен в одном из наборов заранее заданных местоположений в объеме.

В соответствии с другим вариантом осуществления этот способ дополнительно включает построение изображения пропанта в трещинах с использованием набора настроенных параметров и набора заранее заданных местоположений в этом объеме. В соответствии с другим вариантом осуществления это изображение включает трехмерное изображение трещин.

В соответствии с одним вариантом осуществления предлагается система, которая включает проводящие обсадные трубы в стволе скважины, пробуренной с поверхности земли до геологической формации в земле; источник электропитания, который электрически связан с проводящей обсадной трубой в скважине; пропант в трещинах геологической формации, который электрически связан с обсадной трубой скважины; множество датчиков в соответствующем множестве местоположений датчиков, причем эти датчики рассчитаны на сбор данных об электромагнитном поле, которое образуется при подаче тока на проводящие обсадные трубы в скважине при помощи источника электропитания; вычислительное оборудование, включающее запоминающее устройство, в котором хранят множество прогнозных значений электромагнитного поля во множестве местоположений датчиков на основе модели первого приближения Борна, причем эта модель включает множество настраиваемых поправочных коэффициентов; процессор, рассчитанный на получение данных электромагнитных полей от множества датчиков, настройку настраиваемых поправочных коэффициентов по данным электромагнитного поля, и построение изображения пропанта с использованием настроенных настраиваемых поправочных коэффициентов.

В соответствии с другим вариантом осуществления настраиваемые поправочные коэффициенты включают амплитуды рассеяния соответствующего множества борновских рассеивателей.

Следует отметить, что некоторые примеры приведены для пояснения. Эти примеры не следует рас-

смагивать как ограничивающие формулу изобретения, прилагаемую к настоящему документу. Кроме того, может быть признано, что приведенные в настоящем документе примеры могут быть изменены, не выходя при этом за объемы заявленного предмета.

#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Система для определения местонахождения и построения изображения проппанта в трещине, включающая
  - обсадную трубу, размещаемую в стволе скважины, проходящей от поверхности земли до подземной геологической формации;
  - проппант и проводящий материал, размещенные внутри искусственной трещины, распространяющейся, по меньшей мере, практически перпендикулярно от обсадной трубы в геологическую формацию;
  - источник электрического тока, который электрически связан по меньшей мере с частью обсадной трубы, по меньшей мере частью проводящего материала и множеством датчиков в наборе местоположений датчиков;
  - базу данных, в которой хранят геофизическую модель объема земли, включающую геологическую формацию и ствол скважины, набор местоположений в этом объеме, электромагнитную модель, набор местоположений датчиков;
  - процессор, рассчитанный на прогнозирование значений электромагнитного поля в наборе местоположений датчиков с использованием электромагнитной модели и геофизической модели путем вычисления значений первичного электрического поля в наборе местоположений в объеме и вычисления значений вторичного электрического поля в наборе местоположений датчиков с использованием значений первичного электрического поля в наборе местоположений в объеме,
  - получение данных измерения электромагнитного поля, собранных в наборе местоположений датчиков,
  - настройку значений прогнозного электромагнитного поля на основании данных измерения электромагнитного поля,
  - определение местоположения проппанта в трещине геологической формации с использованием настроенных значений прогнозного электромагнитного поля и построение изображения проппанта с использованием настроенных значений прогнозного электромагнитного поля.
2. Система по п.1, в которой множество датчиков включает первое множество датчиков, рассчитанных на регистрацию электрических полей, и второе множество датчиков, рассчитанных на регистрацию магнитных полей.
3. Система по п.1, в которой по меньшей мере одно из множеств датчиков расположено в стволе скважины.
4. Система по п.1, в которой электромагнитная модель включает модель первого приближения Борна со множеством борновских рассеивателей, которые находятся в наборе местоположений в объеме.
5. Система по п.1, в которой вычисление значений вторичного электрического поля включает подстановку эффективных объемных источников, включающих вектор плотности тока, вектор магнитной индукции, вектор электрической индукции или их комбинации, в систему дифференциальных уравнений электромагнитных волн в частных производных, которую решают в явном виде конечно-разностным методом во временной области.
6. Система по п.4, в которой модель первого приближения Борна включает множество настраиваемых параметров, каждый из которых соответствует электромагнитному свойству материала в одном из наборов местоположений в этом объеме.
7. Система по п.6, в которой процессор рассчитан на настройку прогнозных значений электромагнитного поля путем настройки множества настраиваемых параметров.
8. Система по п.7, которая дополнительно включает множество датчиков в наборе местоположений датчиков, причем процессор рассчитан на получение данных измерения электромагнитного поля от множества датчиков.
9. Система по п.8, в которой данные измерения электромагнитного поля включают данные измерения электромагнитного поля, собранные до и после выполнения гидравлического разрыва в геологической формации с использованием ствола скважины.
10. Система по п.9, в которой процессор рассчитан на настройку множества настраиваемых параметров таким образом, что значения вторичного электрического поля в наборе местоположений датчиков соответствуют разности между данными электромагнитного поля в пределах заранее заданного диапазона, причем данные собраны до и после выполнения гидравлического разрыва пласта.
11. Система для определения местонахождения и построения изображения проппанта в трещине,

включающая

пачку электропроводящего проппанта, расположенную внутри искусственной трещины, распространяющейся, по меньшей мере, практически перпендикулярно от ствола скважины в геологическую формацию;

источник электрического тока, который электрически связан по меньшей мере с частью пачки электропроводящего проппанта и множеством датчиков в наборе местоположений датчиков;

базу данных, в которой хранят

геофизическую модель объема земли, включающую геологическую формацию и ствол скважины,

набор местоположений в этом объеме,

электромагнитную модель и

набор местоположений датчиков; и

процессор, рассчитанный на

прогнозирование значений электромагнитного поля в наборе местоположений датчиков с использованием электромагнитной модели и геофизической модели путем

вычисления значений первичного электрического поля в наборе местоположений в объеме и

вычисления значений вторичного электрического поля в наборе местоположений датчиков с использованием значений первичного электрического поля в наборе местоположений в объеме,

получение данных измерения электромагнитного поля, собранных в наборе местоположений датчиков,

настройку значений прогнозного электромагнитного поля на основании данных измерения электромагнитного поля,

определение местоположения пачки электропроводящего проппанта с использованием настроенных значений прогнозного электромагнитного поля и

построение изображения пачки электропроводящего проппанта с использованием настроенных значений прогнозного электромагнитного поля.

12. Система по п.11, в которой множество датчиков включает первое множество датчиков, рассчитанных на регистрацию электрических полей, и второе множество датчиков, рассчитанных на регистрацию магнитных полей.

13. Система по п.11, в которой по меньшей мере одно из множеств датчиков расположено в стволе скважины.

14. Система по п.11, в которой электромагнитная модель включает модель первого приближения Борна со множеством борновских рассеивателей, которые находятся в наборе местоположений в объеме.

15. Система по п.14, в которой модель первого приближения Борна включает множество настраиваемых параметров, каждый из которых соответствует электромагнитному свойству материала в одном из наборов местоположений в этом объеме, и причем процессор рассчитан на

настройку прогнозных значений электромагнитного поля путем настройки множества настраиваемых параметров и

получение данных измерения электромагнитного поля от множества датчиков.

16. Система для определения местонахождения и построения изображения проппанта в трещине, включающая

обсадную трубу, размещенную в стволе скважины, проходящей от поверхности земли до подземной геологической формации;

проппант и проводящий материал, размещенные внутри искусственной трещины, распространяющейся, по меньшей мере, практически перпендикулярно от обсадной трубы в геологическую формацию;

источник электрического тока, который электрически связан по меньшей мере с частью обсадной трубы, по меньшей мере частью проводящего материала и множеством датчиков в наборе местоположений датчиков;

базу данных, в которой хранят

геофизическую модель объема земли, включающую геологическую формацию и ствол скважины,

набор местоположений в этом объеме,

электромагнитную модель и

набор местоположений датчиков; и

процессор, рассчитанный на

прогнозирование значений электромагнитного поля в наборе местоположений датчиков с использованием электромагнитной модели и геофизической модели путем

вычисления значений первичного электрического и/или магнитного полей в наборе местоположений в объеме и

вычисления значений вторичного электрического и/или магнитного полей в наборе местоположений датчиков с использованием значений первичного электрического и/или магнитного полей в наборе местоположений в объеме,

получение данных измерения электромагнитного поля, собранных в наборе местоположений датчиков,



настройку значений прогнозного электромагнитного поля на основании данных измерения электромагнитного поля,

определение местоположения проппанта с использованием настроенных значений прогнозного электромагнитного поля и

построение изображения проппанта с использованием настроенных значений прогнозного электромагнитного поля.

17. Система по п.16, в которой множество датчиков включает первое множество датчиков, рассчитанных на регистрацию электрических полей, и второе множество датчиков, рассчитанных на регистрацию магнитных полей.

18. Система по п.16, в которой для вычисления значений первичного электрического и/или магнитного полей в наборе местоположений в объеме используют методологию численного моделирования, выбранную из группы, состоящей из метода конечных разностей, метода конечных элементов, разрывного метода Галеркина, функции Грина и метода пропагаторов слоистой среды и любой их комбинации.

19. Система по п.16, в которой электромагнитная модель включает модель приближения Борна со множеством борновских рассеивателей, которые находятся в наборе местоположений в объеме.

20. Система по п.16, в которой вычисление значений вторичного электрического поля включает подстановку эффективных объемных источников, включающих вектор плотности тока, вектор магнитной индукции, вектор электрической индукции или их комбинации, в систему дифференциальных уравнений электромагнитных волн в частных производных, которую решают методом конечных элементов.

21. Система по п.19, в которой модель приближения Борна включает множество настраиваемых параметров, каждый из которых соответствует электромагнитному свойству материала в одном из наборов местоположений в этом объеме.

22. Система по п.16, в которой электромагнитная модель включает множество настраиваемых параметров, каждый из которых соответствует электромагнитному свойству материала в одном из наборов местоположений в этом объеме, и процессор рассчитан на настройку прогнозных значений электромагнитного поля путем настройки множества настраиваемых параметров.

23. Система по п.22, дополнительно включающая множество датчиков в наборе местоположений датчиков, и причем процессор рассчитан на получение данных измерения электромагнитного поля от множества датчиков.

24. Система по п.23, в которой данные измерения электромагнитного поля включают данные электромагнитного поля, полученные до и после выполнения гидравлического разрыва в геологической формации с использованием ствола скважины.

25. Система по п.24, в которой процессор рассчитан на настройку множества настраиваемых параметров таким образом, что значения вторичного электрического поля в наборе местоположений датчиков соответствуют разности между данными электромагнитного поля в пределах заранее заданного диапазона, причем данные собраны до и после выполнения гидравлического разрыва пласта.

26. Система по п.16, дополнительно включающая второе множество датчиков во втором множестве местоположений датчиков, рассчитанных на получение множества значений измерения электромагнитного поля.

27. Система по п.16, причем изображение включает трехмерное изображение трещины.

28. Система по п.16, причем проппант содержит непроводящий проппант, и проводящий материал содержит проводящий проппант.

29. Система по п.16, причем геофизическая модель описывает поверхность земли, ствол скважины, обсадную трубу в их соответствующих трехмерных формах.

30. Система по п.29, в которой в электромагнитной модели используется метод конечных элементов.

31. Система для определения местонахождения и построения изображения проппанта в трещине, включающая

пачку электропроводящего проппанта, расположенную внутри искусственной трещины;

источник электрического тока, который электрически связан по меньшей мере с частью пачки электропроводящего проппанта и множеством датчиков в наборе местоположений датчиков;

базу данных, в которой хранят

геофизическую модель объема земли, включающую геологическую формацию и ствол скважины,

набор местоположений в этом объеме,

электромагнитную модель и

набор местоположений датчиков; и

процессор, рассчитанный на

прогнозирование значений электромагнитного поля в наборе местоположений датчиков с использованием электромагнитной модели и геофизической модели путем

вычисления значений первичного электрического и/или магнитного полей в наборе местоположений в объеме и

вычисления значений вторичного электрического и/или магнитного полей в наборе местоположе-

ний датчиков с использованием значений первичного электрического и/или магнитного полей в наборе местоположений в объеме,

получение данных измерения электромагнитного поля, собранных в наборе местоположений датчиков,

настройку значений прогнозного электромагнитного поля на основании данных измерения электромагнитного поля,

определение местоположения пачки электропроводящего проппанта с использованием настроенных значений прогнозного электромагнитного поля и

построение изображения пачки электропроводящего проппанта с использованием настроенных значений прогнозного электромагнитного поля.

32. Система по п.31, в которой множество датчиков включает первое множество датчиков, рассчитанных на регистрацию электрических полей, и второе множество датчиков, рассчитанных на регистрацию магнитных полей.

33. Система по п.31, в которой для вычисления значений первичного электрического и/или магнитного полей в наборе местоположений в объеме используют методологию численного моделирования, выбранную из группы, состоящей из метода конечных разностей, метода конечных элементов, разрывного метода Галеркина, функции Грина и метода пропагаторов слоистой среды и любой их комбинации.

34. Система по п.31, в которой электромагнитная модель включает модель приближения Борна со множеством борновских рассеивателей, которые находятся в наборе местоположений в объеме.

35. Система по п. 34, в которой модель приближения Борна включает множество настраиваемых параметров, каждый из которых соответствует электромагнитному свойству материала в одном из наборов местоположений в этом объеме, и причем процессор рассчитан на

настройку прогнозных значений электромагнитного поля путем настройки множества настраиваемых параметров и

получение данных измерения электромагнитного поля от множества датчиков.

36. Система по п.31, в которой пачка электропроводящего проппанта включает непроводящий проппант.

37. Система для определения местонахождения и построения изображения проппанта в трещине, включающая

обсадную трубу, размещенную в стволе скважины, проходящей от поверхности земли до подземной геологической формации;

пачку проппанта, включающую непроводящий проппант и проводящий материал, размещенную внутри искусственной трещины, распространяющейся, по меньшей мере, практически перпендикулярно от обсадной трубы в геологическую формацию;

источник электрического тока, который электрически связан по меньшей мере с частью обсадной трубы, по меньшей мере частью проводящего материала и множеством датчиков в наборе местоположений датчиков;

базу данных, в которой хранят

геофизическую модель объема земли, включающую поверхность земли, обсадную трубу, геологическую формацию и ствол скважины,

набор местоположений в этом объеме,

модель конечных элементов,

набор местоположений датчиков;

процессор, рассчитанный на

прогнозирование значений электромагнитного поля в наборе местоположений датчиков с использованием модели конечных элементов и геофизической модели путем

вычисления значений первичного электрического и/или магнитного полей в наборе местоположений в объеме и

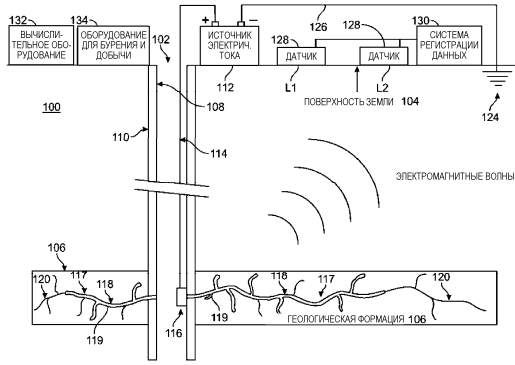
вычисления значений вторичного электрического и/или магнитного полей в наборе местоположений датчиков с использованием значений первичного электрического и/или магнитного полей в наборе местоположений в объеме,

получение данных измерения электромагнитного поля, собранных в наборе местоположений датчиков,

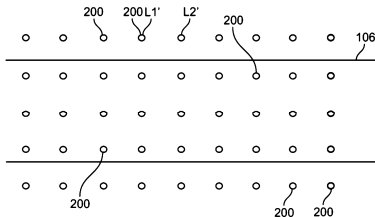
настройку значений прогнозного электромагнитного поля на основании данных измерения электромагнитного поля,

определение местоположения пачки проппанта с использованием настроенных значений прогнозного электромагнитного поля и

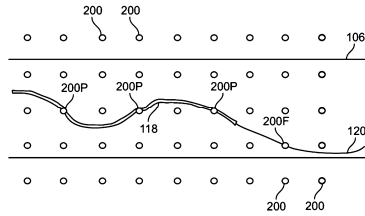
построение трехмерного изображения пачки проппанта с использованием настроенных значений прогнозного электромагнитного поля.



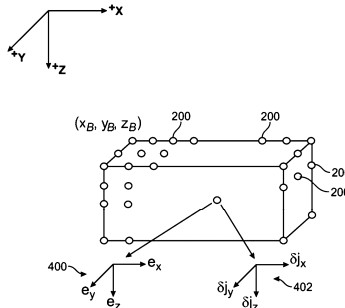
Фиг. 1



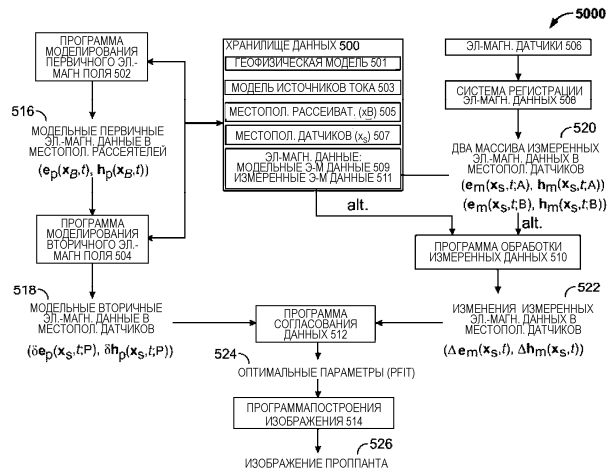
Фиг. 2



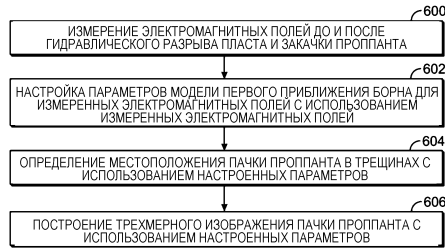
Фиг. 3



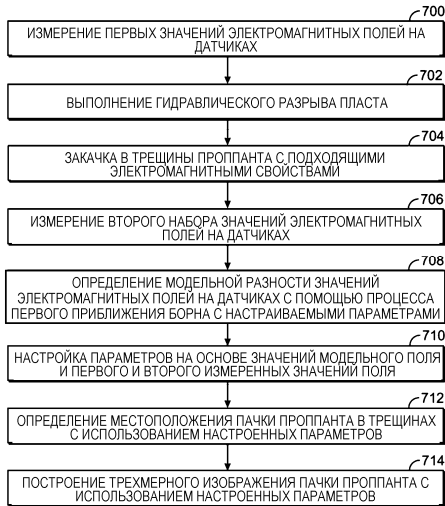
Фиг. 4



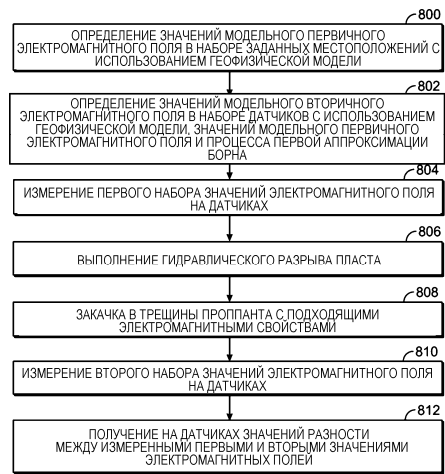
Фиг. 5



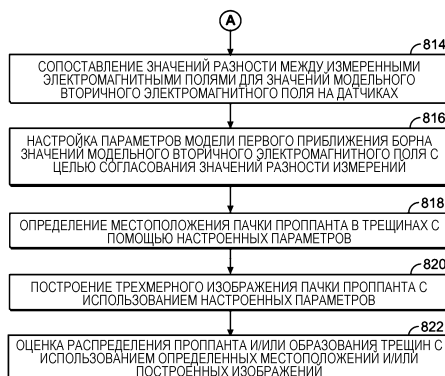
Фиг. 6



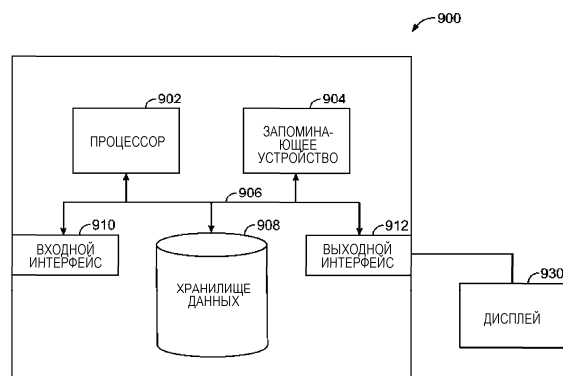
Фиг. 7



Фиг. 8А



Фиг. 8В



Фиг. 9

