

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **042366**

(13) **B1**

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

(45) Дата публикации и выдачи патента  
**2023.02.08**

(51) Int. Cl. *E21B 47/085* (2012.01)  
*E21B 47/005* (2012.01)

(21) Номер заявки  
**202091304**

(22) Дата подачи заявки  
**2018.11.29**

---

(54) **НЕРАДИОАКТИВНЫЙ ИЗОТОПНЫЙ ИНДИКАТОР ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОЦЕДУРЫ  
ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА**

---

(31) **15/831,081**

(56) US-A1-20160024909

(32) **2017.12.04**

US-A-5413179

(33) **US**

US-A1-20160333689

(43) **2020.08.27**

WO-A1-2016144355

(86) **PCT/US2018/063081**

US-A1-20130292109

(87) **WO 2019/112877 2019.06.13**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:  
**КАРБО КЕРАМИКС ИНК. (US)**

(72) Изобретатель:  
**Чжан Цяньмеи, Смит Гарри Д. (US)**

(74) Представитель:  
**Микуцкая Т.Ю., Файбисович А.С.,  
Рогова Е.В. (RU)**

---

(57) Предложен способ оценки искусственно образованных трещин в стволе скважины, который включает получение первого набора данных в стволе скважины с применением скважинного каротажного инструмента. Первый расклинивающий наполнитель перекачивают в ствол скважины после того, как регистрируют первый набор данных. Первый расклинивающий наполнитель содержит первый изотопный индикатор, который не является радиоактивным. Второй расклинивающий наполнитель также перекачивают в ствол скважины после того, как первый расклинивающий наполнитель перекачивают в ствол скважины. Второй расклинивающий наполнитель содержит второй изотопный индикатор, который не является радиоактивным, и второй изотопный индикатор отличается от первого изотопного индикатора. Второй набор данных получают в стволе скважины с применением скважинного инструмента после того, как первый и второй расклинивающие наполнители перекачивают в ствол скважины. Первый и второй наборы данных сравнивают.

---

**B1**

**042366**

**042366**

**B1**

### **Перекрестная ссылка на родственные заявки**

Настоящая заявка испрашивает приоритет и преимущество заявки на патент США, поданной 04 декабря 2017 года под серийным номером 15/831,081.

### **Область техники настоящего изобретения**

Настоящее изобретение относится к изотопным индикаторам для оценки процедур гидравлического разрыва. Более конкретно, настоящее изобретение относится к идентификации меченных множеством нерадиоактивных изотопных индикаторов расклинивающих наполнителей в стволе скважины.

### **Уровень техники настоящего изобретения**

Радиоактивные изотопные индикаторы, такие как Ir-192, Ir-194, Sc-46, Sb-124, Sb-122, Na-24, I-131 и т.д., в настоящее время используют для оценки множества процедур гидравлического разрыва, осуществляемых в стволе скважины. Более конкретно, различные изотопные индикаторы используют во множестве процедур гидравлического разрыва, чтобы определять, какое перфорационное отверстие является открытым и далее подвергнутым гидравлическому разрыву в течение каждой процедуры гидравлического разрыва.

Вследствие естественной проблемы неравномерного перемешивания, сигналы от радиоактивных изотопных индикаторов проявляют тенденцию к флуктуациям, что делает затруднительным их точное обнаружение. Кроме того, может оказаться затруднительным проведение различий между изотопными индикаторами, находящимися внутри ствола скважины и изотопными индикаторами, находящимися глубоко внутри подземного пласта. Кроме того, вследствие потенциально опасных свойств радиоактивных изотопных индикаторов, на них распространяются строгие правила в отношении здравоохранения и общественной безопасности и защиты окружающей среды. В результате этого может оказаться ненадежной оценка трещин в подземном пласте, в частности, в отношении горизонтальных стволов скважин, поскольку радиоактивные изотопные индикаторы могут осаждаться вдоль дна ствола скважины в горизонтальной части.

В последнее время были внедрены нерадиоактивные изотопные индикаторы. Нерадиоактивные изотопные индикаторы используют для наблюдения расклинивающего наполнителя, который перекачивают в ствол скважины в течение процедуры гидравлического разрыва. Меченый расклинивающий наполнитель можно оценивать двумя различными способами. Первый способ предусматривает измерения скорости счета детекторов меченого расклинивающего наполнителя с применением компенсированного нейтронного каротажного инструмента (CNT) или измерения скорости счета и импульсный каротаж с захватом нейтронов с применением инструмента для импульсного нейтронного каротажа (PNC) в целях обнаружения меченого расклинивающего наполнителя в стволе скважины в искусственно образованных трещинах, гравийных фильтрах, гидравлических разрывах с установкой гравийных фильтров и цемента. Второй способ предусматривает спектроскопические измерения гамма-излучения нейтронного захвата с применением каротажного инструмента PNC и спектральное разрешение гамма-излучения нейтронного захвата, исходящего из меченого расклинивающего наполнителя, и гамма-излучения нейтронного захвата, исходящего из других скважинных элементов. Указанные технологии раскрыты в патентах США 8100177, 8648309, 8805615 и 9038715. Поскольку для оценки высоты трещины или качества гравийного фильтра ранее был использован меченный единственным нерадиоактивным изотопным индикатором расклинивающий наполнитель, существует потребность в способе обнаружения и измерения множества (например, различных) нерадиоактивных изотопных индикаторов в целях оценки множества процедур гидравлического разрыва для одной и той же ступени или различных ступеней в стволе скважины, а также определения порядка осуществления каротажных процедур и оценки соответствующих каротажных диаграмм.

### **Краткое раскрытие настоящего изобретения**

Раскрыт способ оценки искусственно образованных трещин в стволе скважины. Способ включает получение первого набора данных в стволе скважины с применением скважинного каротажного инструмента. Первый расклинивающий наполнитель перекачивают в ствол скважины после того, как регистрируют первый набор данных. Первый расклинивающий наполнитель содержит первый изотопный индикатор, который не является радиоактивным. Второй расклинивающий наполнитель также перекачивают в ствол скважины после того, как первый расклинивающий наполнитель перекачивают в ствол скважины. Второй расклинивающий наполнитель содержит второй изотопный индикатор, который не является радиоактивным, и второй изотопный индикатор отличается от первого изотопного индикатора. Второй набор данных получают в стволе скважины с применением скважинного инструмента после того, как первый и второй расклинивающие наполнители перекачивают в ствол скважины. Первый и второй наборы данных сравнивают.

Согласно другому варианту осуществления способ включает перекачивание первого расклинивающего наполнителя в ствол скважины. Первый расклинивающий наполнитель содержит первый изотопный индикатор, который не является радиоактивным. Второй расклинивающий наполнитель также перекачивают в ствол скважины одновременно или после того, как первый расклинивающий наполнитель перекачивают в ствол скважины. Второй расклинивающий наполнитель содержит второй изотопный индикатор, который не является радиоактивным, и второй изотопный индикатор отличается от первого

изотопного индикатора. Набор данных получают в стволе скважины с применением скважинного каротажного инструмента после того, как первый и второй расклинивающие наполнители перекачивают в ствол скважины. Набор данных анализируют для определения положений первого и второго расклинивающих наполнителей в пластовых трещинах.

Согласно другому варианту осуществления способ включает получение первого набора данных в стволе скважины с применением скважинного инструмента. Текучую среду для гидравлического разрыва и расклинивающий наполнитель одновременно перекачивают в ствол скважины после того, как регистрируют первый набор данных. Текучая среда для гидравлического разрыва содержит первый изотопный индикатор, который не является радиоактивным, и расклинивающий наполнитель содержит второй изотопный индикатор, который не является радиоактивным. Второй набор данных получают в стволе скважины с применением скважинного инструмента после того, как текучую среду для гидравлического разрыва и расклинивающий наполнитель перекачивают в ствол скважины. Первый и второй наборы данных сравнивают для определения положений текучей среды для гидравлического разрыва с применением указанного расклинивающего наполнителя.

Кроме того, раскрыт способ оценки гравийных фильтров или гидравлического разрыва с установкой гравийных фильтров в стволе скважины. Способ включает перекачивание первого расклинивающего наполнителя в ствол скважины. Первый расклинивающий наполнитель содержит первый изотопный индикатор, который не является радиоактивным. Второй расклинивающий наполнитель также перекачивают в ствол скважины, одновременно или после того, как первый расклинивающий наполнитель перекачивают в ствол скважины. Второй расклинивающий наполнитель содержит второй изотопный индикатор, который не является радиоактивным, и второй изотопный индикатор отличается от первого изотопного индикатора. Первый набор данных получают в стволе скважины с применением скважинного каротажного инструмента после того, как первый и второй расклинивающие наполнители перекачивают в ствол скважины. Первый набор данных анализируют для определения положений первого и второго расклинивающих наполнителей в области гравийного фильтра в стволе скважины и/или в искусственно образованных пластовых трещинах.

#### **Краткое описание фигур**

Настоящее изобретение может быть понято наилучшим образом посредством ознакомления со следующим описанием и сопровождающими фигурами, которые использованы для иллюстрации варианты осуществления настоящего изобретения. Это следующие фигуры.

На фиг. 1 представлено схематическое изображение операции двухступенчатого гидравлического разрыва в стволе скважины согласно варианту осуществления.

На фиг. 2 представлено схематическое изображение скважинного импульсного нейтронного каротажного инструмента в стволе скважины согласно варианту осуществления.

На фиг. 3 представлена технологическая схема способа оценки множества трещин в стволе скважины с применением данных, полученных посредством скважинного инструмента согласно варианту осуществления.

На фиг. 4 представлен график (например, в форме диаграммы), иллюстрирующий данные, полученные посредством скважинного инструмента для импульсного нейтронного каротажа в стволе скважины до и после стадии осуществления гидравлического разрыва с применением меченного гадолинием расклинивающего наполнителя и меченного бором расклинивающего наполнителя согласно варианту осуществления.

На фиг. 5 представлен график (например, в форме диаграммы), иллюстрирующий данные, полученные посредством скважинного инструмента для импульсного нейтронного каротажа в стволе скважины до и после стадии осуществления гидравлического разрыва с применением меченного гадолинием расклинивающего наполнителя, меченного бором расклинивающего наполнителя и меченного самарием расклинивающего наполнителя согласно варианту осуществления.

На фиг. 6 представлен график, иллюстрирующий моделированное изменение скорости счета гамма-излучения с применением инструмента для импульсного нейтронного каротажа в ранний временной промежуток (например, от 50 до 150 мкс) в зависимости от продолжительности нейтронного импульса (например, от 0 до 30 мкс) с применением гадолиния и бора в качестве индикаторов в составе нерадиоактивного расклинивающего наполнителя в подвергнутом гидравлическому разрыву пласте согласно варианту осуществления.

На фиг. 7 представлен график, иллюстрирующий моделированное изменение скорости счета гамма-излучения с применением инструмента для импульсного нейтронного каротажа в поздний временной промежуток (например, от 200 до 1000 мкс) в зависимости от продолжительности нейтронного импульса (например, от 0 до 30 мкс) с применением гадолиния и бора в качестве индикаторов в составе нерадиоактивного расклинивающего наполнителя в подвергнутом гидравлическому разрыву пласте согласно варианту осуществления.

На фиг. 8 представлена таблица, иллюстрирующая моделированные изменения импульсного нейтронного каротажного скважинного значения эффективного сечения захвата ( $\Sigma$ ), пластового значения  $\Sigma$ , скорости счета детекторов в различные временные промежутки и соотношение изменений скорости сче-

та детектора в двух временных промежутках (например, от 50 до 150 мкс и от 200 до 1000 мкс) для меченного гадолинием расклинивающего наполнителя, меченного бором расклинивающего наполнителя и меченного самарием расклинивающего наполнителя в подвергнутом гидравлическому разрыву пласте согласно варианту осуществления.

На фиг. 9 представлена диаграмма, иллюстрирующая регистрируемые гамма-спектральные различия между меченым гадолинием расклинивающим наполнителем и меченым самарием расклинивающим наполнителем в скважинной расклиненной трещине согласно варианту осуществления.

#### **Подробное раскрытие настоящего изобретения**

Настоящее изобретение относится к системам и способам для обнаружения и идентификации множества (например, различных) меченных нерадиоактивными изотопными индикаторами расклинивающих наполнителей и/или текучих сред для гидравлического разрыва (и согласно некоторым вариантам осуществления меченных нерадиоактивными индикаторами расклинивающих наполнителей/текучих сред в сочетании с мечеными радиоактивными индикаторами материалами) в искусственно образованных пластовых трещинах в стволе скважины с применением импульсного нейтронного каротажного инструмента (PNC). На фиг. 1 представлено схематическое изображение операции двухступенчатого гидравлического разрыва в стволе скважины 102 согласно варианту осуществления. Ствол скважины 102 может проходить в подземный пласт, имеющий один или несколько слоев. Например, ствол скважины 102 может содержать практически вертикальную часть, которая проходит вниз через первый пластовый слой 104, второй пластовый слой 105, третий пластовый слой 106 и коллекторный слой 107. Ствол скважины 102 также может содержать практически горизонтальную часть (например, в коллекторном слое 107).

Ствол скважины 102 может быть обсаженным или необсаженным и перфорированным и/или подвергнутым гидравлическому разрыву на одной или нескольких ступенях. Как представлено на фигуре, горизонтальная часть ствола скважины 102 может быть перфорирована и/или подвергнута гидравлическому разрыву на двух ступенях, включая первую ступень 110 и вторую ступень 120. Первая ступень 110 может быть расположена ниже (например, дальше от исходной точки ствола скважины 102), чем вторая ступень 120. Первая ступень 110 может быть перфорированной и/или подвергнутой гидравлическому разрыву до второй ступени 120.

Первая ступень 110 может содержать один или несколько множеств перфорационных отверстий (представлены два множества 112, 114). Первое множество перфорационных отверстий 112 может быть аксиально сдвинуто от второго множества перфорационных отверстий 114 по отношению к оси, проходящей вдоль ствола скважины 102. Например, первое множество перфорационных отверстий 112 может быть расположенное ниже (например, дальше от исходной точки ствола скважины 102), чем второе множество перфорационных отверстий 114. Первое множество перфорационных отверстий 112 может быть образовано до или во время образования второго множества перфорационных отверстий 114. После образования первого и второго множеств перфорационных отверстий 112, 114 может быть инициирована первая процедура гидравлического разрыва. Первая процедура гидравлического разрыва может включать перекачивание первого меченного нерадиоактивным индикатором расклинивающего наполнителя в ствол скважины 102. При использовании в настоящем документе, термин "меченный нерадиоактивным индикатором расклинивающий наполнитель" означает расклинивающий наполнитель, который является меченым изотопным индикаторным материалом, который не является радиоактивным и имеет высокое значение сечения захвата тепловых нейтронов. Изотопный индикатор в первом меченном нерадиоактивным индикатором расклинивающей наполнителе может представлять собой или содержать, например, гадолий (Gd). Например, изотопный индикатор может представлять собой или содержать  $Gd_2O_3$ . После завершения первой процедура гидравлического разрыва может быть инициирована вторая процедура гидравлического разрыва. Вторая процедура гидравлического разрыва может включать перекачивание второго меченного нерадиоактивным индикатором расклинивающего наполнителя в ствол скважины 102. Согласно одному варианту осуществления в первой процедуре гидравлического разрыва могут быть использованы частицы меченого расклинивающего наполнителя одного размера (сита), а в следующей операции могут быть использованы частицы меченого расклинивающего наполнителя другого размера (сита). Изотопный индикатор во втором меченном нерадиоактивным индикатором расклинивающим наполнителе может отличаться от первого меченного нерадиоактивным индикатором расклинивающего наполнителя. Изотопный индикатор во втором меченном нерадиоактивным индикатором расклинивающим наполнителе может представлять собой или содержать, например, бор (B). Например, изотопный индикатор может представлять собой или содержать  $B_4C$ . Два меченных нерадиоактивными индикаторами расклинивающих наполнителя также могут быть использованы в одной процедуре гидравлического разрыва, причем на начальной стадии операции используют один индикаторный материал, а на второй стадии используют второй индикаторный материал.

Как далее описано более подробно, если первый меченный нерадиоактивным индикатором расклинивающий наполнитель (например, меченный гадолинием расклинивающий наполнитель) находится в трещине, искусственно образованной первым множеством перфорационных отверстий 112, и второй меченный нерадиоактивным индикатором расклинивающий наполнитель (например, меченный бором расклинивающий наполнитель) находится в трещине, искусственно образованной вторым множеством пер-

форационных отверстий 114, может быть определено, что первое множество перфорационных отверстий 112 было открыто/подвергнуто гидравлическому разрыву первым меченным нерадиоактивным индикатором расклинивающим наполнителем, прежде чем второе множество перфорационных отверстий 114 было открыто/подвергнуто гидравлическому разрыву вторым меченным нерадиоактивным индикатором расклинивающим наполнителем. Однако если первый меченный нерадиоактивным индикатором расклинивающий наполнитель (например, меченный гадолинием расклинивающий наполнитель) находится в трещине, искусственно образованной вторым множеством перфорационных отверстий 114, и второй меченный нерадиоактивным индикатором расклинивающий наполнитель (например, меченный бором расклинивающий наполнитель) находится в трещине, искусственно образованной первым множеством перфорационных отверстий 112, то может быть определено, что второе множество перфорационных отверстий 114 было открыто/подвергнуто гидравлическому разрыву первым меченным нерадиоактивным индикатором расклинивающим наполнителем, прежде чем первое множество перфорационных отверстий 112 было открыто/подвергнуто гидравлическому разрыву вторым меченным нерадиоактивным индикатором расклинивающим наполнителем.

Вторая ступень 120 также может содержать один или несколько множеств перфорационных отверстий (здесь представлены три множества 122, 124, 126). Например, третье множество перфорационных отверстий 122 может быть расположено ниже (например, дальше от исходной точки ствола скважины 102), чем четвертое множество перфорационных отверстий 124, и четвертое множество перфорационных отверстий 124 может быть расположено ниже пятого множества перфорационных отверстий 126. После образования третьего, четвертого и пятого множеств перфорационных отверстий 122, 124, 126 может быть инициирована третья процедура гидравлического разрыва. Третья процедура гидравлического разрыва может представлять собой первую процедуру гидравлического разрыва во второй ступени 120. Третья процедура гидравлического разрыва может включать перекачивание третьего меченного нерадиоактивным индикатором расклинивающего наполнителя в ствол скважины 102. Изотопный индикатор в третьем меченном нерадиоактивным индикатором расклинивающим наполнителем может быть таким же или отличаться от изотопных индикаторов в меченных нерадиоактивными индикаторами расклинивающих наполнителях, используемых в первой ступени 110. Например, изотопный индикатор в третьем меченном нерадиоактивным индикатором расклинивающим наполнителем может представлять собой или содержать, например, гадолиний (Gd). Например, изотопный индикатор может представлять собой или содержать  $Gd_2O_3$ .

После завершения третьей процедуры гидравлического разрыва может быть инициирована четвертая процедура гидравлического разрыва. Четвертая процедура гидравлического разрыва может включать перекачивание четвертого меченного нерадиоактивным индикатором расклинивающего наполнителя в ствол скважины 102. Изотопный индикатор в четвертом меченном нерадиоактивным индикатором расклинивающим наполнителем может быть таким же или отличаться от изотопных индикаторов в меченных нерадиоактивными индикаторами расклинивающих наполнителях, используемых в первой ступени 110. Изотопный индикатор в четвертом меченном нерадиоактивным индикатором расклинивающим наполнителем может отличаться от изотопного индикатора в третьем меченном нерадиоактивным индикатором расклинивающим наполнителем. Например, изотопный индикатор в четвертом меченном нерадиоактивным индикатором расклинивающим наполнителем может представлять собой или содержать, например, бор (B). Например, изотопный индикатор может представлять собой или содержать  $B_4C$ .

После завершения четвертой процедуры гидравлического разрыва может быть инициирована пятая процедура гидравлического разрыва. Пятая процедура гидравлического разрыва может включать перекачивание пятого меченного нерадиоактивным индикатором расклинивающего наполнителя в ствол скважины 102. Изотопный индикатор в пятом меченном нерадиоактивным индикатором расклинивающим наполнителем может быть таким же или отличаться от изотопных индикаторов в меченных нерадиоактивными индикаторами расклинивающих наполнителях, используемых в первой ступени 110. Изотопный индикатор в пятом меченном нерадиоактивным индикатором расклинивающим наполнителем может отличаться от изотопных индикаторов в третьем и/или четвертом меченных нерадиоактивными индикаторами расклинивающих наполнителях. Например, изотопный индикатор в пятом меченном нерадиоактивным индикатором расклинивающим наполнителем может представлять собой или содержать, например, самарий (Sm). Например, изотопный индикатор может представлять собой или содержать  $Sm_2O_3$ . Другие примерные нерадиоактивные изотопные индикаторы могут представлять собой или содержать изотопные индикаторы (например, кадмий, иридий или диспрозий), имеющие высокое значение сечения захвата тепловых нейтронов.

В примерной второй ступени 120 процедуры гидравлического разрыва не могут происходить внутри/посредством желательных перфорационных отверстий. Например, в примерной второй ступени 120, если третий меченный нерадиоактивным индикатором расклинивающий наполнитель (например, меченный гадолинием расклинивающий наполнитель) находится в трещине, искусственно образованной пятым множеством перфорационных отверстий 126, четвертый меченный нерадиоактивным индикатором расклинивающий наполнитель (например, меченный бором расклинивающий наполнитель) находится в трещине, искусственно образованной четвертым множеством перфорационных отверстий 124, и пятый

меченный нерадиоактивным индикатором расклинивающий наполнитель (например, меченный самарием расклинивающий наполнитель) находится в трещине, искусственно образованной третьим множеством перфорационных отверстий 122, может быть определено, что пятое множество перфорационных отверстий было открыто/подвергнуто гидравлическому разрыву третьим меченным нерадиоактивным индикатором расклинивающим наполнителем, и затем четвертое множество перфорационных отверстий 124 было открыто/подвергнуто гидравлическому разрыву четвертым меченным нерадиоактивным индикатором расклинивающим наполнителем, и затем третье множество перфорационных отверстий 122 было открыто/подвергнуто гидравлическому разрыву пятым меченным нерадиоактивным индикатором расклинивающим наполнителем.

Такие же принципы, которые описаны выше для двухступенчатой операции гидравлического разрыва, могут быть использованы в одноступенчатой операции гидравлического разрыва, например, когда первая часть (т.е. начальная часть) перекачиваемого расклинивающего наполнителя содержит первый нерадиоактивный изотопный индикатор, а вторая, последующая часть (т.е. заключительная часть) перекачиваемого расклинивающего наполнителя содержит второй нерадиоактивный изотопный индикатор. При этом может быть получена информация, которая может быть использована для определения того, какие подвергнутые гидравлическому разрыву интервалы были легче подвергались гидравлическому разрыву и принимали первый меченный нерадиоактивным индикатором расклинивающий наполнитель, и какие интервалы принимали второй меченный нерадиоактивным индикатором расклинивающий наполнитель. Кроме того, если один из изотопных индикаторных материалов обнаружен в более чем одной (например, во всех) из расклиненных трещин, при этом может быть получена информация для определения, является ли возможным или нет в следующих скважинах введение индикатора только в часть (например, в заключительную часть) перекачиваемого расклинивающего наполнителя.

Схема/процедура гидравлического разрыва может включать гидравлический разрыв всей целевой зоны в вертикальной части ствола скважины снизу вверх или всей целевой зоны в горизонтальной части ствола скважины спереди назад, и здесь может не оставаться зона, не подвергнутая гидравлическому разрыву, для улучшения извлечения нефти или газа. Если планируется, что не будет подвергнута гидравлическому разрыву вся зона (например, по вертикали или по горизонтали) или некоторая зона остается не подвергнутой гидравлическому разрыву, для оператора может оказаться полезным знание последовательности трещин или модифицирование схемы и процедуры гидравлического разрыва. В качестве альтернативы, в дополнение к применению пробок, оператор также может герметизировать открытые перфорационные отверстия/трещины для гидравлического разрыва неоткрытых перфорационных отверстий/не подвергнутых гидравлическому разрыву зон, и в результате этого осуществление операции гидравлического разрыва потенциально становится дорогостоящей и рискованной.

На фиг. 2 представлено схематическое изображение скважинного инструмента 200 в стволе скважины 102 согласно варианту осуществления. Согласно по меньшей мере одному варианту осуществления скважинный инструмент 200 может содержать детектор природного гамма-излучения и/или инструмент для импульсного нейтронного каротажа, содержащий импульсный нейтронный источник и один или несколько детекторов гамма-излучения. Можно использовать скважинный инструмент 200 в стволе скважины 102 и получать результаты измерений до процедур гидравлического разрыва и/или после процедуры гидравлического разрыва. В качестве примера, можно использовать скважинный инструмент 200 в стволе скважины 102 и получать результаты измерений до процедур гидравлического разрыва в первой ступени 110 и второй ступени 120, а затем снова после процедуры гидравлического разрыва в первой ступени 110 и второй ступени 120. В качестве другого примера, можно использовать скважинный инструмент 200 в стволе скважины 102 и получать результаты измерений до процедур гидравлического разрыва в первой ступени 110, после процедуры гидравлического разрыва в первой ступени 110 и до процедуры гидравлического разрыва во второй ступени 120, и после процедуры гидравлического разрыва во второй ступени 120. Как проиллюстрировано, скважинный инструмент 200 можно поднимать и опускать в стволе скважины 102 посредством проводной линии 202. Согласно другим вариантам осуществления, в качестве альтернативы, скважинный инструмент 200 можно поднимать и опускать посредством буровой колонны. Данные, получаемые с помощью скважинного инструмента 200, можно передавать, сохранять и/или анализировать посредством вычислительной системы 204. Вычислительная система 204 может быть расположена внутри или иным образом составлять часть транспортного средства, такого как автомобиль.

На фиг. 3 представлена технологическая схема способа 300 оценки множества трещин в стволе скважины 102 согласно варианту осуществления. Способ 300 может включать получение (например, каротажное) первого набора данных в стволе скважины 102 с применением скважинного инструмента 200 (например, до того, как первую ступень 110 подвергают гидравлическому разрыву), что обозначено номером 302. Первый набор данных может называться термином "диаграмма до гидравлического разрыва". Первый набор данных может представлять собой или включать природное гамма-излучение, скважинное значение  $\Sigma$ , пластовое значение  $\Sigma$ , скорости счета детекторов в различные временные промежутки, соотношения скоростей счета детекторов в различные временные промежутки, выход индикатора/индикаторного элемента (например, выход Gd), температуру, плотность скважинной текучей среды,

соленость скважинной текучей среды или их сочетание. Сбор данных может начинаться на уровне ниже первого множества перфорационных отверстий 112 и продолжаться до уровня выше (например, выше на 200-300 футов) пятого множества перфорационных отверстий 126.

Способ 300 также может включать гидравлический разрыв первой ступени 110 ствола скважины 102, что обозначено номером 304. Согласно по меньшей мере одному варианту осуществления гидравлический разрыв первой ступени 110 ствола скважины 102 может включать перекачивание первого меченного нерадиоактивным индикатором расклинивающего наполнителя (например, меченного гадолинием расклинивающего наполнителя) в ствол скважины 102. Например, первый меченный нерадиоактивным индикатором расклинивающий наполнитель (например, меченный гадолинием расклинивающий наполнитель) может быть предназначен для течения в трещину, искусственно образованную первым множеством перфорационных отверстий 112. Гидравлический разрыв первой ступени 110 ствола скважины 102 также может включать перекачивание второго меченного нерадиоактивным индикатором расклинивающего наполнителя (например, меченного бором расклинивающего наполнителя) в ствол скважины 102. Например, второй меченный нерадиоактивным индикатором расклинивающий наполнитель (например, меченный бором расклинивающий наполнитель) может быть предназначен для течения в трещину, искусственно образованную вторым множеством перфорационных отверстий 114.

Способ 300 также может включать получение (например, каротажное) второго набор данных в стволе скважины 102 с применением скважинного инструмента 200 (например, после того, как первую ступень 110 подвергают гидравлическому разрыву), что обозначено номером 306. Второй набор данных может называться термином "первая диаграмма после гидравлического разрыва", потому что представляет собой данные, зарегистрированные после того, как первую ступень 110 подвергают гидравлическому разрыву. Второй набор данных может содержать данные такого же типа (типов), как первый набор данных.

Способ 300 также может включать нормирование первого и/или второго наборов данных, что обозначено номером 308. Нормирование первого и/или второго наборов данных может учитывать возможные изменения внутри ствола скважины 102 или обсадки, таким образом, что первый набор данных (т.е. диаграмма до гидравлического разрыва) и второй набор данных (т.е. диаграмма после гидравлического разрыва) перекрываются в интервале глубины, где отсутствуют трещины (например, в интервале глубины выше первой ступени 110 и/или выше второй ступени 120).

Способ 300 также может включать сравнение первого набора данных (т.е. диаграммы до гидравлического разрыва) и второго набора данных (т.е. первой диаграммы после гидравлического разрыва), что обозначено номером 310. Сравнение может происходить после нормирования. Сравнение может включать, но не ограничиваться этим, сравнение природного гамма-излучения, скважинного значения  $\Sigma$ , пластового значения  $\Sigma$ , выхода индикатора/индикаторного элемента (например, выхода Gd), скоростей счета детекторов в различные временные промежутки, соотношений скоростей счета детекторов в различные временные промежутки или их сочетаний.

В качестве примера, если сравнение показывает, что выход индикатора/индикаторного элемента (например, выход Gd) увеличивается вблизи определенного множества перфорационных отверстий (например, первого множества перфорационных отверстий 112), может быть определено, что меченный гадолинием расклинивающий наполнитель был успешно помещен в первое множество перфорационных отверстий 112. В качестве другого примера, если сравнение показывает, что скорости счета детекторов увеличиваются в ранний временной промежуток (например, от 35 до 200 мкс или 50 до 150 мкс) после нейтронных импульсов (например, от 0 до 30 мкс) вблизи определенного множества перфорационных отверстий (например, первого множества перфорационных отверстий 112), может быть определено, что меченный гадолинием расклинивающий наполнитель был успешно помещен в первое множество перфорационных отверстий 112. В качестве следующего примера, если сравнение показывает, что скорости счета детекторов уменьшаются в определенном отношении в поздний временной промежуток (например, от 150 до 500 мкс или от 200 до 1000 мкс) вблизи определенного множества перфорационных отверстий (например, первого множества перфорационных отверстий 112), может быть определено, что меченный гадолинием расклинивающий наполнитель был успешно помещен в первое множество перфорационных отверстий 112.

В качестве другого примера, если сравнение показывает, что скорости счета детекторов уменьшаются в ранний временной промежуток (например, от 35 до 200 мкс или от 50 до 150 мкс) по отношению к нейтронным импульсам (например, от 0 до 30 мкс) вблизи определенного множества перфорационных отверстий (например, второго множества перфорационных отверстий 114), может быть определено, что меченный бором расклинивающий наполнитель был успешно помещен во второе множество перфорационных отверстий 114. В качестве следующего примера, если сравнение показывает, что скорости счета детекторов уменьшаются в определенном отношении в поздний временной промежуток (например, от 150 до 500 мкс или от 200 до 1000 мкс) вблизи определенного множества перфорационных отверстий (например, второго множества перфорационных отверстий 114), может быть определено, что меченный бором расклинивающий наполнитель был успешно помещен во второе множество перфорационных отвер-

ствий 114. Далее скорости счета обсуждаются более подробно со ссылкой на фиг. 4-7.

Способ 300 также может необязательно включать гидравлический разрыв второй ступени 120 ствола скважины 102, что обозначено номером 312. Ствол скважины 102 может быть подвергнут гидравлическому разрыву после образования перфорационных отверстий 122, 124, 126. Согласно по меньшей мере одному варианту осуществления гидравлический разрыв второй ступени 110 ствола скважины 102 может включать перекачивание третьего меченного нерадиоактивным индикатором расклинивающего наполнителя (например, меченного гадолинием расклинивающего наполнителя) в ствол скважины 102. Например, третий меченный нерадиоактивным индикатором расклинивающий наполнитель (например, меченный гадолинием расклинивающий наполнитель) может быть предназначен для течения в трещину, искусственно образованную третьим множеством перфорационных отверстий 122. Гидравлический разрыв второй ступени 120 ствола скважины 102 также может включать перекачивание четвертого меченного нерадиоактивным индикатором расклинивающего наполнителя (например, меченного бором расклинивающего наполнителя) в ствол скважины 102. Например, четвертый меченный нерадиоактивным индикатором расклинивающий наполнитель (например, меченный бором расклинивающий наполнитель) может быть предназначен для течения в трещину, искусственно образованную четвертым множеством перфорационных отверстий 124. Гидравлический разрыв второй ступени 120 ствола скважины 102 также может включать перекачивание пятого меченного нерадиоактивным индикатором расклинивающего наполнителя (например, меченного самарием расклинивающего наполнителя) в ствол скважины 102. Например, пятый меченный нерадиоактивным индикатором расклинивающий наполнитель (например, меченный самарием расклинивающий наполнитель) может быть предназначен для течения в трещину, искусственно образованную пятым множеством перфорационных отверстий 126. Применение трех меченных нерадиоактивными индикаторами расклинивающих наполнителей также может быть осуществлено в операции гидравлического разрыва единственной ступени или в операции гидравлического разрыва в присутствии более чем двух ступеней.

Способ 300 также может включать получение (например, каротажное) третьего набора данных в стволе скважины 102 с применением скважинного инструмента 200 (например, после того, как вторую ступень 120 подвергают гидравлическому разрыву), что обозначено номером 314. Третий набор данных может называться термином "вторая диаграмма после гидравлического разрыва", потому что представляет собой данные, зарегистрированные после того, как вторую ступень 120 подвергают гидравлическому разрыву. Третий набор данных может содержать данные такого же типа (типов), как первый и/или второй наборы данных.

Способ 300 также может включать нормирование первого и третьего наборов данных или второго и третьего наборов данных, что обозначено номером 316. Нормирование данные может учитывать возможные изменения внутри ствола скважины 102 или обсадки.

Способ 300 также может включать сравнение второго набора данных (т.е. первой диаграммы после гидравлического разрыва) и третьего набора данных (т.е. второй диаграммы после гидравлического разрыва), что обозначено номером 318. В качестве альтернативы, операция 318 может включать сравнение первого набора данных (т.е. диаграммы до гидравлического разрыва) и третьего набора данных (т.е. второй диаграммы после гидравлического разрыва). Сравнение может включать, но не ограничиваться этим, сравнение природного гамма-излучения, скважинного значения  $\Sigma$ , пластового значения  $\Sigma$ , выхода индикатора/индикаторного элемента (например, выхода Gd или Sm), скоростей счета детекторов в различные временные промежутки, соотношения скоростей счета детекторов в различные временные промежутки или их сочетаний.

В качестве примера, если сравнение показывает, что выход индикатора/индикаторного элемента (например, выход Gd) увеличивается вблизи определенного множества перфорационных отверстий (например, пятого множества перфорационных отверстий 126), может быть определено, что меченный гадолинием расклинивающий наполнитель был успешно помещен в пятое множество перфорационных отверстий 126. В качестве другого примера, если сравнение показывает, что выход индикатора/индикаторного элемента (например, выход Sm) увеличивается вблизи определенного множества перфорационных отверстий (например, третьего множества перфорационных отверстий 122), может быть определено, что меченный самарием расклинивающий наполнитель был успешно помещен в третье множество перфорационных отверстий 122. Как будет описано ниже со ссылкой на фиг. 9, меченный гадолинием расклинивающий наполнитель и меченный самарием расклинивающий наполнитель можно отличать друг от друга с применением способов обработки спектральных данных в определении выхода элементов Gd и Sm.

В другом примере, где гадолиний и бор представляют собой два индикатора, если сравнение показывает, что скорости счета детекторов увеличиваются в ранний временной промежуток (например, от 35 до 200 мкс или от 50 до 150 мкс) вблизи определенного множества перфорационных отверстий (например, пятого множества перфорационных отверстий 126), может быть определено, что меченный гадолинием расклинивающий наполнитель был успешно помещен в пятое множество перфорационных отверстий 126. В качестве следующего примера, если сравнение показывает, что скорости счета детекторов уменьшаются в определенном отношении в поздний временной промежуток (например, от 150 до 500 мкс

или от 200 до 1000 мкс) вблизи определенного множества перфорационных отверстий (например, пятого множества перфорационных отверстий 126), может быть определено, что меченный гадолинием расклинивающий наполнитель был успешно помещен в пятое множество перфорационных отверстий 126.

В примере с применением Gd и В в качестве индикаторов, если сравнение показывает, что скорости счета детекторов уменьшаются в ранний временной промежуток (например, от 35 до 200 мкс или от 50 до 150 мкс) вблизи определенного множества перфорационных отверстий (например, третьего множества перфорационных отверстий 122), может быть определено, что меченный бором расклинивающий наполнитель был успешно помещен в третье множество перфорационных отверстий 122. В качестве следующего примера, если сравнение показывает, что скорости счета детекторов уменьшаются в большей степени в поздний временной промежуток (например, от 150 до 500 мкс или от 200 до 1000 мкс) вблизи определенного множества перфорационных отверстий (например, третьего множества перфорационных отверстий 122), может быть определено, что меченный бором расклинивающий наполнитель был успешно помещен в третье множество перфорационных отверстий 122. Кроме того, поскольку соотношение изменения скорости счета между ранним временным промежутком и поздним временным промежутком для измерений до гидравлического разрыва и после гидравлического разрыва с применением меченного гадолинием расклинивающего наполнителя отличается от соответствующего соотношения изменения для меченного бором расклинивающего наполнителя, анализ соотношения измерений в подвергнутых гидравлическому разрыву зонах 122, 126 показывает, какой индикатор присутствовал (например, соотношение является отрицательным для меченного гадолинием расклинивающего наполнителя, но положительным для меченного бором расклинивающего наполнителя в подвергнутой гидравлическому разрыву зоне).

Способ 300 также может включать калибровку модели гидравлического разрыва в зависимости от сравнений, что обозначено номером 320. Модель гидравлического разрыва может быть калибрована в целях уменьшения неопределенностей в схемах процедуры гидравлического разрыва. Это может приводить к более эффективным процедурам гидравлического разрыва и улучшать конечное извлечение нефти или газа. Например, начальная часть расклинивающего наполнителя может не содержать изотопный индикатор, и только заключительная часть расклинивающего наполнителя может содержать изотопный индикатор. Согласно другому варианту осуществления размеры частиц в расклинивающем наполнителе (наполнителях) может изменяться в зависимости от результатов сравнения будущих операций гидравлического разрыва.

На фиг. 4 представлена диаграмма 400, иллюстрирующая первый и второй наборы данных, полученных с применением скважинного инструмента 200 в стволе скважины 102 (т.е. до и после того, как первую ступень 110 подвергают гидравлическому разрыву) согласно варианту осуществления. Диаграмма 400 содержит столбцы, которыми представлены измеренная глубина 410, природное гамма-излучение 420, интервалы между перфорационными отверстиями 430, соотношение скоростей счета от ближнего и дальнего детекторов 440, скважинное значение  $\Sigma$  450, пластовое значение  $\Sigma$  460, скорость счета в ранний временной промежуток (например, от 50 до 150 мкс) 470, скорость счета в поздний временной промежуток (например, от 200 до 1000 мкс) 475 и выход индикатора/индикаторного элемента (например, Gd) 480.

Как проиллюстрировано, скважинное значение  $\Sigma$  после гидравлического разрыва может увеличиваться вблизи обоих множеств перфорационных отверстий 112, 114 после того, как первую ступень 110 подвергают гидравлическому разрыву, и пластовое значение  $\Sigma$  после гидравлического разрыва может увеличиваться вблизи обоих множеств перфорационных отверстий 112, 114 после того, как первую ступень 110 подвергают гидравлическому разрыву. Скорости счета в ранний временной промежуток могут увеличиваться вблизи первого множества перфорационных отверстий 112 и уменьшение вблизи второго множества перфорационных отверстий 114 после того, как первую ступень 110 подвергают гидравлическому разрыву. Скорость счета в поздний временной промежуток могут уменьшаться вблизи обоих множеств перфорационных отверстий 112, 114 в различных относительных количествах после того, как первую ступень 110 подвергают гидравлическому разрыву. Выход индикатора/индикаторного элемента (например, Gd) может увеличиваться вблизи первого множества перфорационных отверстий 112 после того, как первую ступень 110 подвергают гидравлическому разрыву, и может практически отсутствовать изменение выхода индикатора/индикаторного элемента (например, Gd) вблизи второго множества перфорационных отверстий 114 после того, как первую ступень 110 подвергают гидравлическому разрыву. На основании любой части (или всех) из этих данных может быть определено, что меченный гадолинием расклинивающий наполнитель затек в трещину, искусственно образованную первым множеством перфорационных отверстий 112, и меченный бором расклинивающий наполнитель затек в трещину, искусственно образованную вторым множеством перфорационных отверстий 114.

На фиг. 5 представлена диаграмма 500, иллюстрирующая второй и третий наборы данных, зарегистрированных с применением скважинного инструмента 200 в стволе скважины 102 (т.е. до и после того, как вторую ступень 120 подвергают гидравлическому разрыву) согласно варианту осуществления. На фиг. 5 также могут быть описано множество перфорационных отверстий и множество изотопных индикаторов на одностадийной процедуре гидравлического разрыва. Как проиллюстрировано, скважинное

значение  $\Sigma$  может увеличиваться вблизи всех трех множеств перфорационных отверстий 122, 124, 126 после того, как вторую ступень 120 подвергают гидравлическому разрыву, и пластовое значение  $\Sigma$  может увеличиваться вблизи всех трех множеств перфорационных отверстий 122, 124, 126 после того, как вторую ступень 120 подвергают гидравлическому разрыву. В примере на фиг. 5 скважинный инструмент 200 способен измерять выход Gd 480 и выход Sm 490. Как проиллюстрировано, выход Gd 480 может увеличиваться вблизи пятого множества перфорационных отверстий 126, и выход Sm 490 может увеличиваться вблизи третьего множества перфорационных отверстий 122. Скорости счета в ранний временной промежуток могут увеличиваться вблизи третьего и пятого множеств перфорационных отверстий 122, 126 и уменьшаться вблизи четвертого множества перфорационных отверстий 124 после того, как вторую ступень 120 подвергают гидравлическому разрыву, и скорости счета в поздний временной промежуток могут уменьшаться вблизи всех трех множеств перфорационных отверстий 122, 124, 126 после того, как вторую ступень 120 подвергают гидравлическому разрыву. Выход индикатора/индикаторного элемента (например, Gd) может увеличиваться вблизи пятого множества перфорационных отверстий 126 после того, как вторую ступень 120 подвергают гидравлическому разрыву, и может отсутствовать изменение выхода индикатора/индикаторного элемента (например, Gd) вблизи третьего или четвертого множества перфорационных отверстий 122 и 124 после того, как вторую ступень 120 подвергают гидравлическому разрыву. Выход индикатора/индикаторного элемента (например, Sm) может увеличиваться вблизи третьего множества перфорационных отверстий 122 после того, как вторую ступень 120 подвергают гидравлическому разрыву, и может отсутствовать изменение выхода индикатора/индикаторного элемента (например, Sm) вблизи четвертого или пятого множеств перфорационных отверстий 124 и 126 после того, как вторую ступень 120 подвергают гидравлическому разрыву. На основании любой части (или всех) из этих данных может быть определено, что меченный бором расклинивающий наполнитель затек в трещину, искусственно образованную четвертым множеством перфорационных отверстий 124, потому что пластовое значение  $\Sigma$  и скважинное значение  $\Sigma$  на диаграммах увеличиваются после процедуры гидравлического разрыва, показывая, что нерадиоактивный индикатор присутствует, но на диаграммах выхода не наблюдается ни Gd, ни Sm, и это показывает, что ни Gd, ни Sm не присутствует в перфорационных отверстиях 124. Присутствие бора также показано в четвертом множестве перфорационных отверстий 124, потому что наблюдается уменьшение в ранний временной промежуток скорости счета в перфорационных отверстиях 124. Увеличение в ранний временной промежуток скорости счета могло бы наблюдаться, если бы Gd или Sm представляли собой индикаторы, присутствующие в перфорационных отверстиях 124.

Хотя это не проиллюстрировано, аналогичная диаграмма может быть построена с первым и третьим наборами данных. На основании анализа этих данных может быть определено, что меченный гадолинием расклинивающий наполнитель затек в трещину, искусственно образованную пятым множеством перфорационных отверстий 126, меченный бором расклинивающий наполнитель затек в трещину, искусственно образованную четвертым множеством перфорационных отверстий 124, и меченный самарием расклинивающий наполнитель затек в трещину, искусственно образованную третьим множеством перфорационных отверстий 122.

На фиг. 6 представлена диаграмма 600, иллюстрирующая скорости счета детекторов в ранний временной промежуток (например, от 50 до 150 мкс) после окончания каждого нейтронного импульса (например, от 0 до 30 мкс) согласно варианту осуществления. Более конкретно, на фиг. 6 представлены скорости счета детекторов для меченного гадолинием расклинивающего наполнителя и меченного бором расклинивающего наполнителя в ранний временной промежуток в зависимости от концентраций (массовых процентных долей) различных индикаторов в частицах расклинивающего наполнителя. Как можно видеть, скорость счета для меченного гадолинием расклинивающего наполнителя увеличивается, в то время как скорость счета для меченного бором расклинивающего наполнителя уменьшается, независимо от концентрации расклинивающего наполнителя. В качестве примера, концентрация расклинивающего наполнителя может составлять приблизительно 0,4% для меченного гадолинием расклинивающего наполнителя и приблизительно 1,0% для меченного бором расклинивающего наполнителя.

На фиг. 7 представлена диаграмма 700, иллюстрирующая скорости счета детекторов в поздний временной промежуток (например, от 200 до 1000 мкс) после окончания каждого нейтронного импульса согласно варианту осуществления. Более конкретно, на фиг. 7 представлены скорости счета детекторов для меченного гадолинием расклинивающего наполнителя и меченного бором расклинивающего наполнителя в поздний временной промежуток в зависимости от концентрации индикатора в частицах расклинивающего наполнителя. Как можно видеть, скорости счета для меченного гадолинием расклинивающего наполнителя и меченного бором расклинивающего наполнителя уменьшаются независимо от концентрации расклинивающего наполнителя. Однако скорость счета для меченного бором расклинивающего наполнителя может уменьшаться в различной (например, большей) степени/в большем процентном отношении, чем для меченного гадолинием расклинивающего наполнителя. Снова концентрация расклинивающего наполнителя может составлять приблизительно 0,4% для меченного гадолинием расклинивающего наполнителя и приблизительно 1,0% для меченного бором расклинивающего наполнителя.

На фиг. 8 представлена таблица 800, иллюстрирующая моделированные изменения импульсного нейтронного каротажного скважинного значения  $\Sigma$ , пластового значения  $\Sigma$ , скоростей счета детекторов в различные временные промежутки и соотношения изменений скорости счета детектора в двух временных промежутках (например, от 50 до 150 мкс и от 200 до 1000 мкс) от расположенного вблизи детектора для меченного гадолинием расклинивающего наполнителя, меченного бором расклинивающего наполнителя и меченного самарием расклинивающего наполнителя при номинальных концентрациях индикаторов, используемых в типичных промышленных условиях. Указанные концентрации приводят к аналогичному увеличению в расклиненной трещине пластового значения сечения захвата  $\Sigma_{\text{пласт}}$ . (во всех трех случаях увеличение составляет приблизительно 10% согласно таблице). С другой стороны, скорости счета детекторов в ранний временной промежуток увеличиваются для обоих элементов Gd и Sm в качестве индикаторов, в то время как скорость счета уменьшается для бора в качестве индикатора. Это отчасти обусловлено тем, что, в отличие от бора, Gd и Sm излучают значительную захватную энергию гамма-излучения после захвата тепловых нейтронов. В поздние временные промежутки (например, от 200 до 1000 мкс или от 400 до 1000 мкс) по отношению к времени нейтронных импульсов скорости счета детекторов уменьшаются для всех трех индикаторных материалов, причем относительное уменьшение оказывается большим для бора. Кроме того, на фиг. 8 представлено соотношение изменений скорости счета детектора в ранний временной промежуток и в поздний временной промежуток для всех трех индикаторных материалов. Можно видеть, что соотношения являются близкими (например, отрицательными), когда в качестве индикаторов присутствуют Gd и Sm; однако соотношения (например, положительные) значительно различаются, когда в качестве индикатора присутствует бор. Таким образом, чтобы различить сигнал от меченный бором расклинивающего наполнителя и сигналы от меченных гадолинием или самарием расклинивающих наполнителей, оператор может применять иное содержание бора в качестве индикатора в ранний временной промежуток для скорости счета или более значительное соотношение изменения скоростей счета в различные временные промежутки, когда присутствует меченый расклинивающий наполнитель. Кроме того, можно видеть по аналогичным данным в таблице для Gd и Sm, что требуется дополнительный дискриминатор, чтобы отличать присутствие гадолиниевого индикатора от самариевого индикатора.

На фиг. 9 представлена диаграмма 900, иллюстрирующая моделированные энергетические спектры импульсного нейтронного захватного гамма-излучения, которые показывают различия между меченным гадолинием расклинивающим наполнителем и меченный самарием расклинивающим наполнителем в искусственно образованной скважинной трещине. Как проиллюстрировано, меченный гадолинием расклинивающий наполнитель и меченный самарием расклинивающий наполнитель производят несколько различающиеся спектры захватного гамма-излучения. Таким образом, технологии обработки спектров гамма-излучения нейтронного захвата могут быть использованы для определения выходов для каждого из двух различных индикаторов (Gd и Sm), причем различия и, следовательно, выходы элементов могут показывать, в каких перфорационных отверстиях содержатся указанные меченые расклинивающие наполнители.

Если в операции гидравлического разрыва с применением одного или обоих из указанных двух индикаторов (например, Gd и Sm) ни один из указанных спектрально различающихся нерадиоактивных изотопных индикаторов в иных условиях не присутствует в скважинных пластах и областях ствола скважины, то также может оказаться возможным исключение или игнорирование набора данных до гидравлического разрыва и использование в качестве альтернативы двух выходов (или выходов выше статистических фоновых уровней), определяемых из набора данных после гидравлического разрыва, вероятно, в сочетании с другими параметрами диаграммы PNC в процессе определения положений в пределах подвергнутых гидравлическому разрыву зон, где присутствует каждый из материалов меченых расклинивающих наполнителей.

Множество нерадиоактивных изотопных индикаторов также можно использовать для оценки гидравлического разрыва с установкой гравийного фильтра. Гидравлический разрыв с установкой гравийного фильтра представляет собой технологию, которая объединяет два процесса оборудования скважин, представляющих собой гидравлический разрыв и установку гравийного фильтра. После гидравлического разрыва с установкой гравийного фильтра качество гравийного фильтра можно оценивать как обеспечивающее получение успешного предотвращения поступления песка в скважину. Высота гидравлического разрыва в пласте также может быть определена на основании гравийного фильтра. Множество изотопных индикаторов можно использовать при оценке процедур гидравлического разрыва с установкой гравийного фильтра для ствола скважины с одним или несколькими множествами перфорационных отверстий.

Согласно по меньшей мере одному варианту осуществления два множества частиц расклинивающего наполнителя, имеющих различные размеры, можно использовать в операции гидравлического разрыва или в операции гидравлического разрыва с установкой гравийного фильтра. Например, начальная часть расклинивающего наполнителя может содержать частицы меньшего размера, а заключительная часть расклинивающего наполнителя может содержать более крупные частицы. Частицы меньшего размера могут быть мечеными одним нерадиоактивным изотопным индикатором, а более крупные частицы

могут быть мечеными другим нерадиоактивным изотопным индикатором. Анализ данных гидравлического разрыва может быть осуществлен для определения трещин, в которых расположены частицы расклинивающего наполнителя меньшего или большего размера, а также он может оказаться полезным для планирования будущих процедур гидравлического разрыва. Кроме того, этот анализ может обеспечить полезную информацию для оценки гидравлического разрыва с установкой гравийного фильтра оценка или для разработки будущих процедур гидравлического разрыва с установкой гравийного фильтра. Например, оператор может определять, крупные или мелкие частицы расклинивающего наполнителя должны быть предпочтительно расположены в области установки гравийного фильтра в скважине или подвергнутой гидравлическому разрыву зоне (зонах) вне пласта.

Согласно по меньшей мере одному варианту осуществления может оказаться полезным перекачивание меченого расклинивающего наполнителя в операции гидравлического разрыва с применением одного или нескольких нерадиоактивных изотопных индикаторов, а также перекачивание текучей среды для гидравлического разрыва в скважину с применением расклинивающего наполнителя, содержащего другой нерадиоактивный изотопный индикатор, также имеющий высокий сечение захвата тепловых нейтронов. Изотопный индикатор в составе текучей среды для гидравлического разрыва может растворяться или иным образом содержаться в перекачиваемой текучей среде для гидравлического разрыва (например, растворимые в воде индикаторы на основе нерадиоактивного изотопа бора могут содержать борную кислоту или тетраборат натрия). Меченый расклинивающий наполнитель и меченую текучую среду для гидравлического разрыва можно перекачивать в ствол скважины одновременно или в различные сроки. Если растворимый в воде изотопный индикатор действительно содержит бор, то сигналы борного индикатора, присутствующего в текучей среде для гидравлического разрыва, также могут быть усилены за счет любого бора, присутствующего из других источников в текучей среде для гидравлического разрыва (например, некоторые сшитые текучие среды для гидравлического разрыва содержат соединения бора). Способность независимого обнаружения изотопных индикаторов в текучей среде для гидравлического разрыва по отношению к изотопным индикаторам в расклинивающем наполнителе может обеспечить определение любых зон, которые были подвергнуты гидравлическому разрыву, но не обеспечены эффективным расклинивающим наполнителем. Эти данные также могут обеспечить полезную информацию для процессов общей оценки и планирования гидравлического разрыва.

Согласно по меньшей мере одному варианту осуществления один или несколько нерадиоактивных изотопных индикаторов могут быть использованы в сочетании с радиоактивным (R/A) изотопом/индикатором. Например, текучая среда для гидравлического разрыва может быть меченой радиоактивным изотопным индикатором, и расклинивающий наполнитель может быть меченым одним или несколькими нерадиоактивными изотопными индикаторами. Это может уменьшать число используемых нерадиоактивных изотопных индикаторов, а также делать более простым и точным любой спектральный анализ сигналов радиоактивных индикаторов и/или сигналов нерадиоактивных индикаторов, потому что измерение радиоактивности может быть осуществлено посредством иного детектора в каротажном инструменте, чем один или несколько детекторов, используемых для обработки данных от нерадиоактивного индикатора. Традиционно, если оператор желает определить, сколько из двух или большего числа радиоактивных индикаторов находится в скважинной области по сравнению с пластом, обработка спектральных данных становится очень сложной и может оказываться в высокой степени неточной. Это становится неверным в случае применения единственного радиоактивного индикатора, где спектроскопия гамма-излучения может более эффективно использоваться для того, чтобы отличать этот индикатор в скважинной области от индикатора в пластовых трещинах. Следовательно, сочетание радиоактивного индикатора с нерадиоактивным индикатором может обеспечить независимые процессы и способы, позволяющие проводить определение двух индикаторов, а также может обеспечить более точный анализ данных радиоактивного индикатора, поскольку второй радиоактивный индикатор может быть исключен, и, таким образом, его присутствие не будет создавать помехи или иным образом вносить неточность в данные, относящиеся к первому радиоактивному индикатору.

Раздельное определение двух радиоактивных индикаторов включает применение спектроскопии гамма-излучения нейтронного захвата, и для осуществления измерений традиционно используют специализированный инструмент. Применение одного радиоактивного индикатора в сочетании с одним нерадиоактивным индикатором не предусматривает применение спектроскопии гамма-излучения нейтронного захвата, включая применение инструмента PNC для обнаружения нерадиоактивного индикатора или инструмента для компенсированного нейтронного каротажа. Может быть использован любой из нерадиоактивных индикаторов (например, Gd, Sm или B). Кроме того, оператору не требуется применение различных инструментов для обнаружения радиоактивного индикатора и нерадиоактивного индикатора. Оба индикатора могут быть обнаружены с применением одного и того же инструмента для импульсного нейтронного каротажа, используемого для обнаружения нерадиоактивного индикатора. Даже компенсированный нейтронный инструмент может быть использован для раздельного определения сигналов от радиоактивного индикатора и единственного нерадиоактивного индикатора. Детектор природного гамма-излучения в импульсном нейтронном или компенсированном нейтронном инструменте может быть использован для обнаружения радиоактивного индикатора в трещинах посредством сравнения диаграмм

мы природного гамма-излучения до гидравлического разрыва и диаграммы природного гамма-излучения после гидравлического разрыва. Увеличение гамма-излучения на диаграмме после гидравлического разрыва может быть обусловлено гамма-излучением от радиоактивного индикатора. Такой детектор природного гамма-излучения не используется в целях получения/анализа данных меченного нерадиоактивным индикатором расклинивающего наполнителя в определении сигнала (сигналов) нерадиоактивного расклинивающего наполнителя.

Если импульсный нейтронный инструмент оборудован указанным образом, также может находить применение способности применения захватной гамма-спектроскопии (когда это доступно) для улучшения анализа данных нерадиоактивного индикатора посредством вычисления выхода индикатора. В таком случае оказывается возможным различие двух или трех нерадиоактивных индикаторов (например, Gd, Sm и/или В), как проиллюстрировано на фиг. 4 и 5, если было бы желательным применение более чем двух индикаторов (например, одного радиоактивного индикатора и двух или трех нерадиоактивных индикаторов). Положительный аспект сокращения расходов на применение радиоактивного индикатора с одним или несколькими нерадиоактивными индикаторами заключается в том, что не требуется дополнительный каротажный инструмент для обнаружения радиоактивного индикатора. Все индикаторы могут быть обнаружены с применением одного и того же инструмента для импульсного нейтронного каротажа (или инструмента для компенсированного нейтронного каротажа для одного радиоактивного индикатора и одного нерадиоактивного индикатора) в текущем режиме с применением обработки данных для нерадиоактивного индикатора. Кроме того, в течение каротажной операции ни один дополнительный каротажный инструмент не требуется для введения в скважину в целях обнаружения присутствия радиоактивного индикатора, поскольку все сигналы индикаторов получают одновременно.

Согласно другому варианту осуществления способ оценки искусственно образованных трещин в стволе скважины с применением радиоактивных и нерадиоактивных индикаторов может включать перекачивание расклинивающего наполнителя в ствол скважины, причем расклинивающий наполнитель содержит первый изотопный индикатор, который не является радиоактивным. Второй изотопный индикатор также можно перекачивать в ствол скважины до, в то же время и/или после того, как расклинивающий наполнитель перекачивают в ствол скважины. Второй изотопный индикатор является радиоактивным. Первый набор данных может быть получен в стволе скважины с применением скважинного каротажного инструмента после перекачивания первого и второго изотопных индикаторов в ствол скважины. Первый набор данных можно анализировать для определения положений первого и второго изотопных индикаторов в пластовых трещинах. Способ также может включать регистрацию второго набора данных с применением скважинного каротажного инструмента до перекачивания расклинивающего наполнителя и второго изотопного индикатора и сравнение первого и второго наборов данных для определения положений первого и второго изотопных индикаторов в пластовых трещинах.

Следует понимать, что модификации настоящего изобретения могут быть произведены по усмотрению специалиста в области техники настоящего изобретения в пределах объема прилагаемой формулы изобретения. Все изложенные в настоящем документе варианты осуществления, которые решают задачи настоящего изобретения, не были представлены со всеми подробностями. Могут быть разработаны другие варианты осуществления без отклонения от идеи настоящего изобретения или без выхода за пределы объема прилагаемой формулы изобретения. Хотя настоящее изобретение было описано с представлением конкретных подробностей, не предусмотрено, что такие подробности следует рассматривать в качестве ограничений объема настоящего изобретения, за исключением той степени, в которой они включены в сопровождающую формулу изобретения.

## ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ оценки искусственно образованных трещин в стволе скважины, включающий в себя
  - получение первого набора данных в стволе скважины с применением скважинного каротажного инструмента, причем скважинный каротажный инструмент содержит инструмент для импульсного нейтронного каротажа;
  - перекачивание первого расклинивающего наполнителя в ствол скважины после того, как регистрируют первый набор данных, причем первый расклинивающий наполнитель содержит первый изотопный индикатор, который не является радиоактивным, причем первый изотопный индикатор содержит элемент, выбранный из группы, состоящей из гадолиния, бора и самария;
  - перекачивание второго расклинивающего наполнителя в ствол скважины после того, как первый расклинивающий наполнитель перекачивают в ствол скважины, причем второй расклинивающий наполнитель содержит второй изотопный индикатор, который не является радиоактивным, причем второй изотопный индикатор содержит иной элемент, выбранный из группы, состоящей из гадолиния, бора и самария, и при этом второй изотопный индикатор отличается от первого изотопного индикатора;
  - получение второго набора данных в стволе скважины с применением скважинного инструмента после того, как первый и второй расклинивающие наполнители перекачивают в ствол скважины; и
  - сравнение первого и второго наборов данных, причем сравнение первого и второго наборов данных

включает в себя сравнение изменений скорости счета детектора между первым и вторым наборами данных в ранний временной промежуток после нейтронных импульсов, причем ранний временной промежуток составляет от около 35 до около 150 мкс; и дополнительно включающий в себя

определение, на основании сравнения изменений скорости счета детектора, что один из первого и второго изотопных индикаторов содержит бор и присутствует в первых пластовых трещинах, когда скорость счета детектора уменьшается вблизи первого множества перфорационных отверстий вблизи первых пластовых трещин.

2. Способ по п.1, в котором первый набор данных, второй набор данных, сравнение первого и второго наборов данных или их комбинация включают в себя

данные о скважинном значении эффективного сечения захвата ( $\Sigma$ ),

данные о пластовом значении  $\Sigma$ ,

данные о соотношении изменения скоростей счета в различные временные промежутки после нейтронных импульсов,

данные о выходе элементов первого изотопного индикатора и/или второго изотопного индикатора, или их комбинацию.

3. Способ по п.1, дополнительно включающий в себя определение, на основании сравнения первого и второго наборов данных, что первый расклинивающий наполнитель присутствует в пластовых трещинах вблизи первого множества перфорационных отверстий в стволе скважины, а второй расклинивающий наполнитель присутствует в пластовых трещинах вблизи второго множества перфорационных отверстий в стволе скважины, когда выход элементов первого изотопного индикатора увеличивается вблизи первого множества перфорационных отверстий и/или выход элементов второго изотопного индикатора увеличивается вблизи второго множества перфорационных отверстий.

4. Способ по п.1, дополнительно включающий в себя определение, на основании сравнения изменений скорости счета детектора, что другой из первого и второго изотопных индикаторов содержит гадолиний или самарий и присутствует во вторых пластовых трещинах, когда скорость счета детектора увеличивается вблизи второго множества перфорационных отверстий вблизи вторых пластовых трещин.

5. Способ по п.1, в котором сравнение первого и второго наборов данных включает в себя сравнение изменений скорости счета детектора между первым и вторым наборами данных в поздний временной промежуток после нейтронных импульсов, причем поздний временной промежуток составляет от около 200 до около 1000 мкс.

6. Способ оценки искусственно образованных трещин в стволе скважины, включающий в себя получение первого набора данных в стволе скважины с применением скважинного каротажного инструмента, причем скважинный каротажный инструмент содержит инструмент для импульсного нейтронного каротажа;

перекачивание первого расклинивающего наполнителя в ствол скважины после того, как регистрируют первый набор данных, причем первый расклинивающий наполнитель содержит первый изотопный индикатор, который не является радиоактивным, причем первый изотопный индикатор содержит элемент, выбранный из группы, состоящей из гадолиния, бора и самария;

перекачивание второго расклинивающего наполнителя в ствол скважины после того, как первый расклинивающий наполнитель перекачивают в ствол скважины, причем второй расклинивающий наполнитель содержит второй изотопный индикатор, который не является радиоактивным, причем второй изотопный индикатор содержит иной элемент, выбранный из группы, состоящей из гадолиния, бора и самария, и при этом второй изотопный индикатор отличается от первого изотопного индикатора;

получение второго набора данных в стволе скважины с применением скважинного инструмента после того, как первый и второй расклинивающие наполнители перекачивают в ствол скважины; и

сравнение первого и второго наборов данных, причем сравнение первого и второго наборов данных включает в себя вычисление соотношения изменения скорости счета детектора в ранний временной промежуток после нейтронных импульсов и изменения скорости счета детектора в поздний временной промежуток после нейтронных импульсов, причем ранний временной промежуток составляет от 35 до около 150 мкс и поздний временной промежуток составляет от около 200 до около 1000 мкс; и дополнительно включающий в себя

определение, на основании сравнения изменений скорости счета детектора, что один из первого и второго изотопных индикаторов содержит бор и присутствует в первых пластовых трещинах, когда скорость счета детектора уменьшается вблизи первого множества перфорационных отверстий вблизи первых пластовых трещин.

7. Способ по п.6, в котором соотношение является положительным в присутствии бора и отрицательным в присутствии гадолиния или самария.

8. Способ по п.1, дополнительно включающий в себя перекачивание третьего расклинивающего наполнителя в ствол скважины, причем третий расклинивающий наполнитель содержит третий изотопный индикатор, который не является радиоактивным, причем третий изотопный индикатор содержит третий элемент, выбранный из группы, состоящей из гадолиния, бора и самария, и при этом третий изотопный

индикатор отличается от первого и второго изотопных индикаторов.

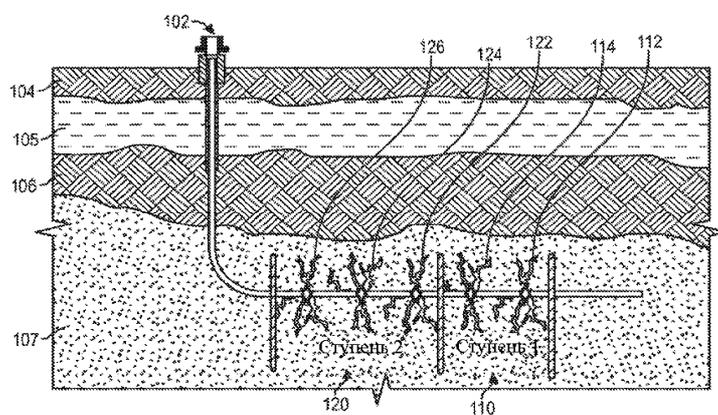
9. Способ по п.1, дополнительно включающий в себя определение, на основании сравнения первого и второго наборов данных, что первый расклинивающий наполнитель присутствует в пластовых трещинах вблизи первого множества перфорационных отверстий в стволе скважины, а второй расклинивающий наполнитель присутствует в пластовых трещинах вблизи второго множества перфорационных отверстий в стволе скважины, когда

вблизи первого множества перфорационных отверстий скважинное значение  $\Sigma$  увеличено, пластовое значение  $\Sigma$  увеличено, скорость счета детектора в ранний временной промежуток увеличена, скорость счета детектора в поздний временной промежуток уменьшена, выход элементов первого изотопного индикатора увеличен, или присутствует их сочетание, причем поздний временной промежуток составляет от около 200 до около 1000 мкс; и

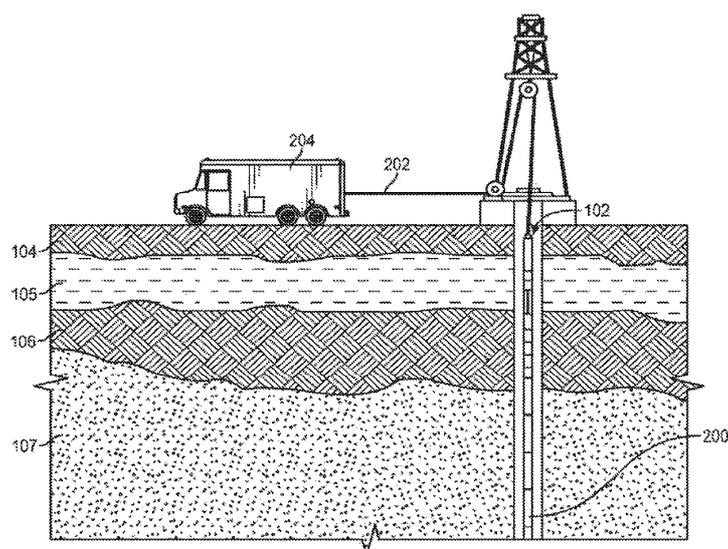
вблизи второго множества перфорационных отверстий скважинное значение  $\Sigma$  увеличено, пластовое значение  $\Sigma$  увеличено, скорость счета детектора в ранний временной промежуток уменьшена, скорость счета детектора в поздний временной промежуток уменьшена, или присутствует их сочетание.

10. Способ по п.1, в котором первый расклинивающий наполнитель содержит первое множество частиц, второй расклинивающий наполнитель содержит второе множество частиц, а средний размер первого множества частиц отличается от среднего размера второго множества частиц.

11. Способ по п.1, в котором первый расклинивающий наполнитель содержит начальную часть, а второй расклинивающий наполнитель содержит заключительную часть.



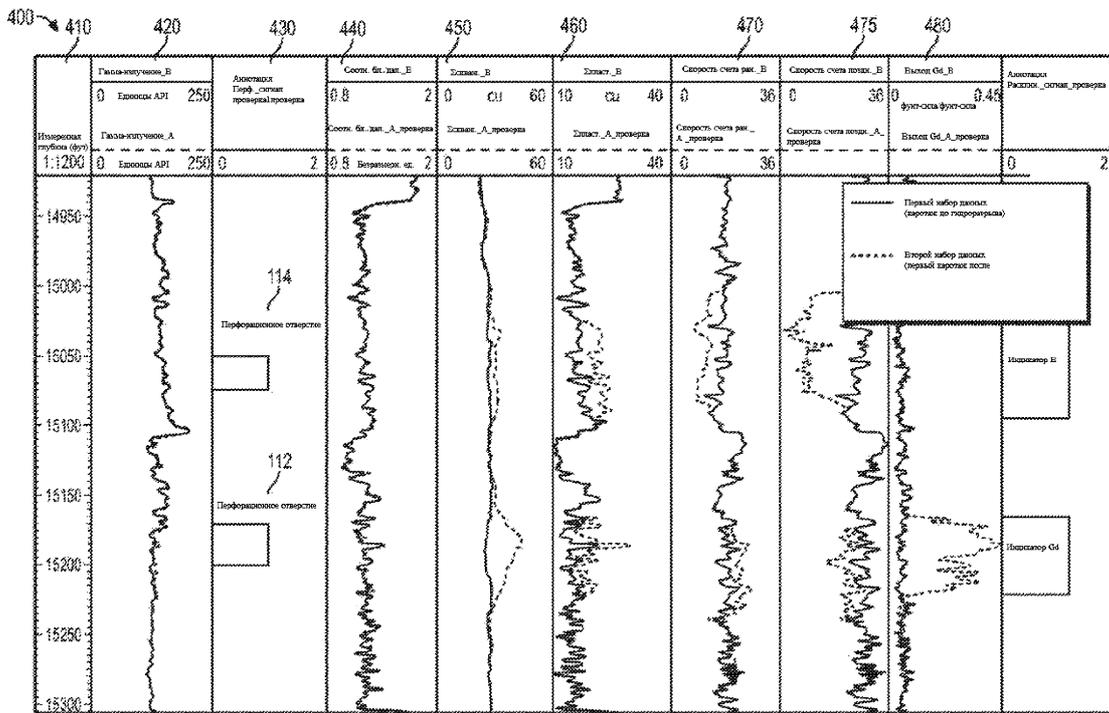
Фиг. 1



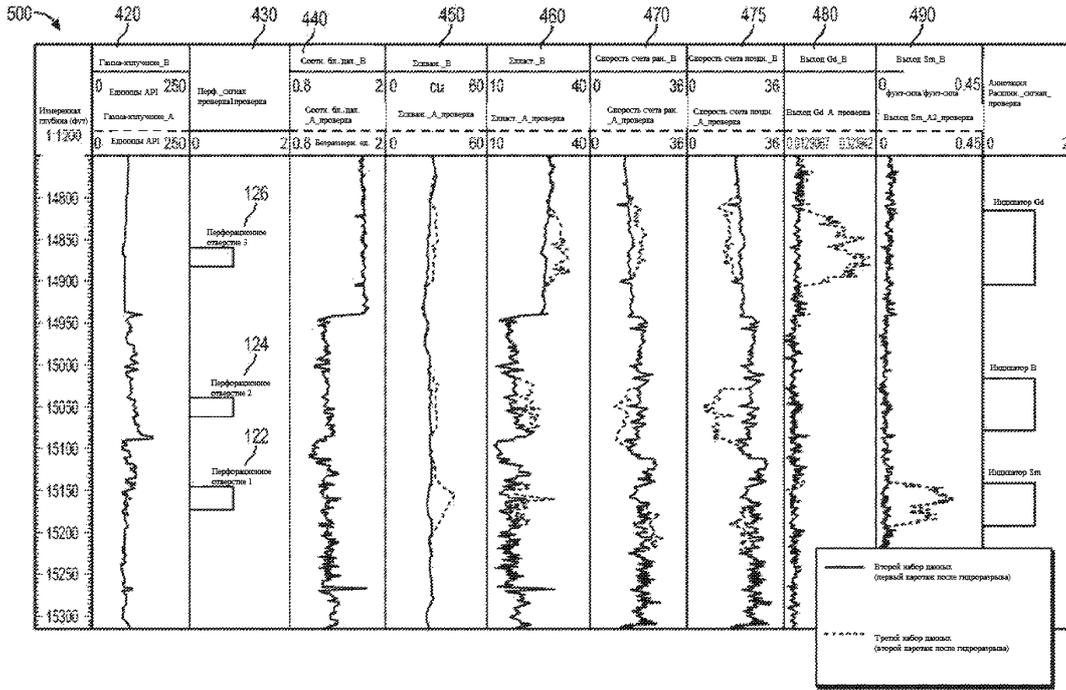
Фиг. 2



Фиг. 3



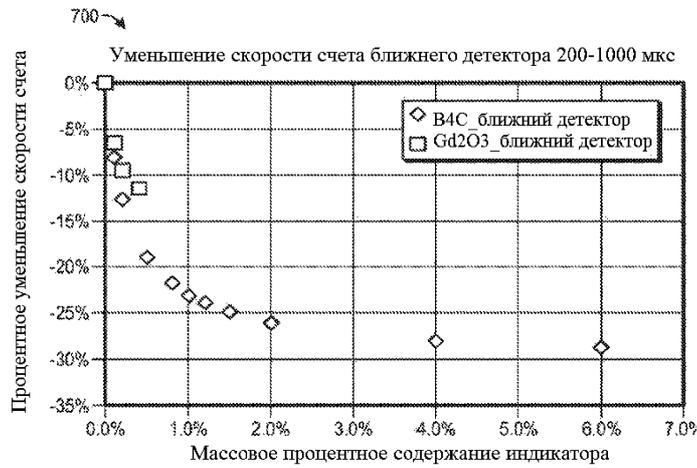
Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7

800

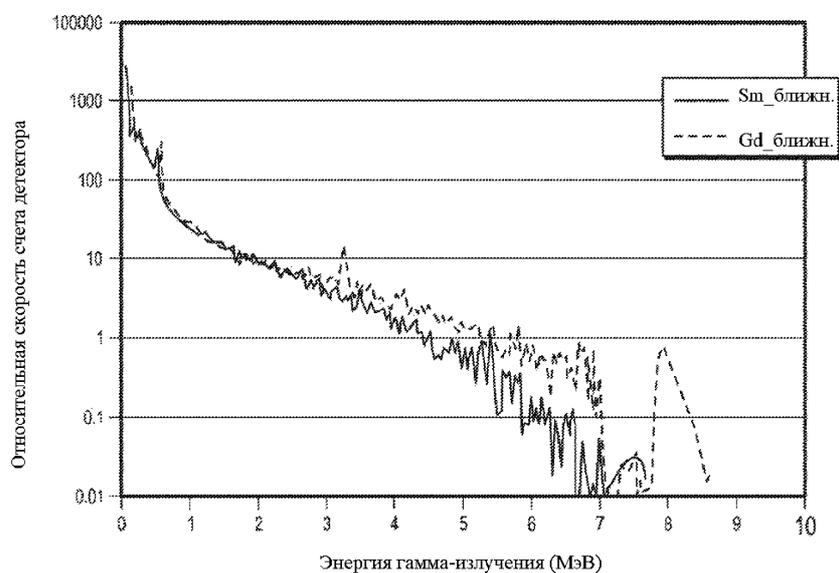
Сравнение меченного Gd, В и Sm расклинивающего наполнителя на диаграммах PNC

Индикатор	Концентрация	d( $\Sigma$ скв._бл.)	d( $\Sigma$ пласт._бл.)	d( $\Sigma$ CR_бл.)			d( $\Sigma$ CR_бл.) / d( $\Sigma$ CR_бл.)
				50-150 мкСм	200-1000 мкСм	400-1000 мкСм	50-150 мкСм / 200-1000 мкСм
Gd <sup>203</sup>	0.4%	7.8%	10.0%	7.3%	-11.5%	-21.0%	-0.635
B <sup>4C</sup>	1.0%	2.5%	9.5%	-6.2%	-23.2%	-32.0%	0.287
Sm <sup>203</sup>	1.5%	7.4%	10.0%	8.0%	-10.5%	-20.0%	-0.762

Фиг. 8

900

Сравнение спектров нейтронного захвата Sm и Gd



Фиг. 9



Евразийская патентная организация, ЕАПВ

Россия, 109012, Москва, Малый Черкасский пер., 2