

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **035972**(13) **B1**(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2020.09.08

(51) Int. Cl. **G01V 5/10** (2006.01)

(21) Номер заявки
201892457

(22) Дата подачи заявки
2018.11.27

(54) **СПОСОБ ИМПУЛЬСНОГО НЕЙТРОН-НЕЙТРОННОГО КАРОТАЖА**(31) **2018102739**(32) **2018.01.24**(33) **RU**(43) **2019.07.31**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ
УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
"ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ ИМ.
Н.Л. ДУХОВА" (RU)**

(72) Изобретатель:

**Кошелев Александр Павлович,
Микеров Виталий Иванович,
Хусаннов Амир Мухитдинович (RU)**

(74) Представитель:

Ульянин О.В. (RU)

(56) SU-A1-1114156
RU-C1-2582901
RU-C1-2251684
SU-A1-1340332
US-A-3602713
JP-A-2011027559

(57) Изобретение относится к радиационным способам бесконтактного измерения нейтронно-физических характеристик вещества. Техническим результатом изобретения является повышение точности измерения влажности горной породы. Технический результат достигается тем, что регистрируют заряд, образованный по крайней мере в одном детекторе тепловых нейтронов потоком падающих на него нейтронов с момента начала нейтронного импульса и до начала следующего нейтронного импульса, сравнивают полученное временное распределение с набором заранее рассчитанных временных распределений из базы данных, в базе данных находят временное распределение, соответствующее по критериям сравнения зарегистрированному временному распределению, влажность горной породы, параметры скважины, промывочной жидкости считают совпадающими с влажностью горной породы, параметрами скважины и промывочной жидкости, использованными при расчете временного распределения, соответствующего зарегистрированному временному распределению.

B1**035972****035972****B1**

Изобретение относится к радиационным способам бесконтактного измерения нейтронно-физических характеристик вещества с помощью нейтронного излучения, а именно методу импульсного нейтрон-нейтронного каротажа.

Импульсный нейтрон-нейтронный каротаж применяют в обсаженных скважинах для литологического расчленения разрезов и выделения коллекторов, выявления водо- и нефтегазонасыщенных пластов, определения положений водонефтяного контакта, определения газожидкостных контактов, оценки пористости пород, количественной оценки начальной, текущей и остаточной нефтенасыщенности, контроля за процессом испытания и освоения скважин ("Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ с приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах РД 153-39.0-072-01", Москва - 2002).

Известен "Способ определения влажности", при котором измеряемый материал облучают быстрыми нейтронами от источника, регистрируют поток замедленных нейтронов, образующихся в материале, двумя группами детекторов-счетчиков медленных нейтронов, максимумы спектральной чувствительности которых разнесены в пределах диапазона энергий замедляющихся нейтронов, например, при помощи кадмиевого фильтра, измеряют выходные сигналы от каждой из групп детекторов в отсутствии анализируемого материала, а также после поочередной подачи материала с известной влажностью. Патент РФ № 2251684; МПК: G01N 23/12; 10.05.2005. 2005. Аналог.

Недостатком аналога является ограниченная область применения способа, используемого, в основном, для определенного влажности угля (кокса) и относительно низкая точность измерения влажности горной породы в скважине при наличии в ней кристаллизационной (связанной) воды, поскольку потоки нейтронов на обе группы детекторов определяются общим содержанием воды, а не только водой, содержащейся в поровом пространстве.

Известен "Импульсный нейтронный способ определения влажности материалов", заключающийся в том, что контролируемый материал облучают быстрыми нейтронами с энергией 2,5 МэВ, измеряют поток быстрых нейтронов во время нейтронных импульсов, в промежутках между нейтронными импульсами регистрируют тепловые нейтроны, образующиеся в контролируемом материале, нормируют количество зарегистрированных тепловых нейтронов на поток быстрых нейтронов, определяют влажность контролируемого материала путем сравнения нормированного значения количества зарегистрированных тепловых нейтронов со значениями, полученными из калибровочных измерений с тестовыми образцами. Патент РФ № 2582901, МПК: G01N 23/05. 27.04.2016. Аналог.

Недостатком аналога является относительно низкая точность измерения влажности горной породы в скважине при наличии в ней кристаллизационной (связанной) воды, поскольку поток тепловых нейтронов определяется общим содержанием воды, а не только водой, содержащейся в поровом пространстве. Относительно низкая точность измерения влажности может быть обусловлена также наличием в породе примесей, заметно поглощающих тепловые нейтроны.

Известен "Импульсный нейтронный способ определения влажности материалов", заключающийся в том, что исследуемый материал облучают импульсным потоком быстрых нейтронов, регистрируют временное распределение потока тепловых нейтронов, определяют время от начала нейтронного импульса до наступления максимума потока тепловых нейтронов, регистрируют временное распределение потока эпитепловых нейтронов и определяют среднее время пребывания нейтрона в эпитепловой области. Авторское свидетельство СССР № 1114156; G01N 23/02; 23.04.1991. Прототип.

Недостатком прототипа является относительно низкая точность измерения влажности горной породы при частоте следования регистрируемых событий, приводящей к просчетам в счетном режиме регистрации.

Техническим результатом изобретения является повышение точности измерения влажности горной породы, в том числе, при частоте следования регистрируемых событий, приводящей к просчетам в счетном режиме регистрации.

Это достигается путем измерения временного распределения заряда, образованного по крайней мере в одном детекторе тепловых нейтронов, дополнительно обеспечивая тем самым регистрацию временного распределения заряда, вызванного быстрыми нейтронами, а также регистрацию временных распределений потоков эпитепловых и тепловых при частоте следования регистрируемых событий, приводящей к просчетам в счетном режиме регистрации.

Технический результат достигается тем, что в способе импульсного нейтрон-нейтронного каротажа, заключающемся в облучении породы импульсным потоком быстрых нейтронов, регистрации временных распределений потоков тепловых и эпитепловых нейтронов, регистрируют заряд, образованный по крайней мере в одном детекторе тепловых нейтронов потоком падающих на него нейтронов с момента начала нейтронного импульса и до начала следующего нейтронного импульса, дополнительно обеспечивая тем самым регистрацию временного распределения заряда, вызванного быстрыми нейтронами, а также регистрацию временных распределений потоков эпитепловых и тепловых нейтронов при частоте следования регистрируемых событий, приводящей к просчетам в счетном режиме регистрации, сохраняют полученное временное распределение заряда, повторяют процесс регистрации для $N \geq 1$ нейтронных импульсов, при этом каждое последующее временное распределение заряда суммируют с сохраненным, сравнивают

полученное временное распределение с набором временных распределений из базы данных, заранее рассчитанных для скважинного прибора при различных влажности горной породы, параметрах скважины, промывочной жидкости и аттестованных путем измерения временных распределений заряда данным способом на геофизических моделях горных пород, в базе данных находят временное распределение, соответствующее по критериям сравнения зарегистрированному временному распределению, влажность горной породы, параметры скважины, промывочной жидкости считают совпадающими с влажностью горной породы, параметрами скважины и промывочной жидкости, использованными при расчете временного распределения, соответствующего зарегистрированному временному распределению.

Сущность изобретения поясняется на фиг. 1-3 в случае применения одного детектора тепловых нейтронов. В общем случае их может быть несколько.

На фиг. 1 схематично показаны состав и взаимное расположение основных элементов одного из возможных устройств скважинного прибора, обеспечивающего реализацию предлагаемого способа, где

1 - охранный корпус;

2 - импульсный источник быстрых нейтронов;

3 - детектор тепловых нейтронов.

На фиг. 2 показана зависимость от времени удельного энерговыделения в детекторе 3 тепловых нейтронов при использовании в его качестве пропорционального ^3He счетчика и составляющие удельного энерговыделения, рассчитанные для кальцита влажностью (нейтронной пористостью) 14,9% при его облучении 14 МэВ нейтронами с длительностью нейтронного импульса 1 мкс, где

4 - зависимость полного удельного энерговыделения в детекторе 3;

5 - зависимость удельного энерговыделения в детекторе 3, вызываемого быстрыми нейтронами с энергией 14 МэВ - 40 кэВ;

6 - зависимость удельного энерговыделения в детекторе 3, вызываемого эпитепловыми нейтронами с энергией 40 кэВ - 0,414 эВ;

7 - зависимость удельного энерговыделения в детекторе 3, вызываемого тепловыми нейтронами с энергией менее 0,414 эВ.

На фиг. 3 показаны рассчитанные зависимости удельного энерговыделения в детекторе 3 тепловых нейтронов при использовании в его качестве пропорционального ^3He счетчика при различной влажности кальцита при его облучении 14 МэВ нейтронами с длительностью нейтронного импульса 1 мкс, где

8 - зависимость удельного энерговыделения в детекторе 3 для кальцита влажностью 0,8%;

9 - зависимость удельного энерговыделения в детекторе 3 для кальцита влажностью 14,9%;

10 - зависимость удельного энерговыделения в детекторе 3 для кальцита влажностью 36,4%;

11 - зависимость удельного энерговыделения в детекторе 3 для пресной воды.

Скважинное устройство на фиг. 1 содержит цилиндрический охранный корпус 1 и выполняется из стали толщиной в несколько миллиметров.

Импульсный источник 2 быстрых нейтронов может быть выполнен в виде генератора нейтронов с энергией 2,5 или 14 МэВ и служит для облучения горной породы импульсами быстрых нейтронов.

Детектор 3 тепловых нейтронов служит для регистрации поступающих на него нейтронов. В качестве детектора 3 может использоваться ^3He пропорциональный счетчик. Детектор 3 может быть выполнен в виде кассеты, содержащей несколько пропорциональных счетчиков. По отношению к импульсному источнику 2 детектор 3 обычно располагается на расстоянии $L < 15$ см соосно с охранным корпусом 1.

Образованный в детекторе 3 заряд пропорционален удельному энерговыделению в детекторе 3 (зависимость 4 на фиг. 2).

Величина энерговыделения (заряда), возникающего в детекторе 3 под действием быстрых нейтронов, определяется их потоком и средней энергией, передаваемой ^3He за счет упругого рассеяния быстрых нейтронов.

Величина энерговыделения (заряда), возникающего в детекторе 3 под действием эпитепловых и тепловых нейтронов, прямо пропорциональна потоку на него этих нейтронов, поскольку при их захвате ядром ^3He выделяется одна и та же энергия, равная 0,76 МэВ/нейтрон.

Во время импульса источника 2 и некоторое время после него на детектор поступают в основном быстрые нейтроны как непосредственно от источника, так и со стороны окружающего вещества (зависимость 5 на фиг. 2 для нейтронов с энергией 14 МэВ-40 кэВ). Из-за замедления быстрых нейтронов в веществе средняя энергия этих нейтронов постоянно уменьшается. Время замедления быстрых нейтронов сильно зависит от нейтронной пористости горной породы и уменьшается с ее увеличением.

Из зависимости 5 видно, что заряд, возникающий в детекторе 3 тепловых нейтронов при $t \approx 0,1$ мкс от начала нейтронного импульса, может быть использован для мониторингирования выхода импульсного источника 2.

Через несколько микросекунд после начала нейтронного импульса на детектор начинают поступать эпитепловые нейтроны (зависимость 6 на фиг. 2 для нейтронов с энергией 40 кэВ-0,414 эВ). В случае короткого ~ 1 мкс нейтронного импульса максимальная величина заряда (потока) достигается примерно через $t \approx 2-3$ мкс и затем быстро спадает с постоянной спада не более нескольких десятков микросекунд.

Зависимость 6 показывает, что поток при $t \approx 2-3$ мкс в основном вызван эпитепловыми нейтронами.

Тепловые нейтроны начинают поступать на детектор через несколько десятков микросекунд после начала нейтронного импульса (зависимость 7 на фиг. 2 для нейтронов с энергией $< 0,414$ эВ). В случае нейтронного импульса длительностью около 1 мкс поток достигает максимума к моменту времени $t \sim 10-20$ мкс. Зависимость 7 показывает, что при $t \approx 20$ мкс этот поток в основном вызван тепловыми нейтронами.

Постоянная спада потока тепловых нейтронов на детектор зависит от нейтронной пористости горной породы и практически не превышает 1 мс. Поэтому при частоте повторения импульсов менее 100 Гц к моменту прихода следующего импульса тепловые нейтроны в горной породе вымирают и с приходом следующего импульса процесс полностью повторяется.

В настоящее время для измерения влажности горной породы методом импульсного нейтрон-нейтронного каротажа используются эпитепловые и тепловые нейтроны. Для их регистрации применяются пропорциональные ^3He или ^{10}B счетчики.

Время сбора заряда, образованного в пропорциональном счетчике в результате захвата нейтрона, составляет около 1-4 мкс [D. Mazed, S. Mameri, R. Ciolini. Design parameters and technology optimization of ^3He -filled proportional counter for thermal neutron detection and spectrometry applications. Radiation Measurements 47 (2012) 577-587]. Соответствующее "мертвое" время для пропорциональных счетчиков составляет < 10 мкс [G.P. Manessi. Development of advanced radiation monitors for pulsed neutron fields. PhD thesis. (2015) 1-147, p.16]. Указанное мертвое время неизбежно приводит к просчету нейтронов при частоте регистрируемых событий более (5-10) кГц. Такая частота может иметь место при регистрации нейтронов во время сравнительно короткого и мощного нейтронного импульса и некоторое время после него.

"Временной спектр скоростей счета для отечественной низкочастотной аппаратуры сильно искажен просчетами, причем применяемая методика коррекции ограничивается просчетами до 2-кратных, что явно недостаточно. Основным интерпретационным параметром является измеряемый временной декремент спада нейтронов или фотонов, который зависит не только от свойств пласта, но и от условий измерения - конструкции и заполнения скважины, величины зонда. Полученное значение декремента к тому же обычно не обеспечивается оценкой его точности" (С.Г. Бородин. "Глубокая обработка данных импульсного нейтронного каротажа нефтегазовых скважин", автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, Москва - 2009).

Предлагаемый способ импульсного нейтрон-нейтронного каротажа обеспечивает регистрацию нейтронов во всем временном интервале с начала нейтронного импульса, в том числе и при наложении регистрируемых событий. Способ основан на измерении зависимости от времени величины заряда, образуемого в детекторе 3 тепловых нейтронов нейтронами различной энергии, как во время нейтронных импульсов, так и между ними с помощью усилителя-интегратора.

Усилитель-интегратор как в случае высокой частоты следования регистрируемых событий, так и в случае их частичного наложения работает в зарядовом режиме, в котором заряд, собранный с выхода счетчика, пропорционален числу зарегистрированных нейтронов и выделяющейся при этом энергии [I. Rios, J. Gonzalez, and R.E. Mayer. Total fluence influence on the detected magnitude of neutron burst using proportional detectors. Radiation Measurement 53-54 (2013) 31-37; J. Moreno, L. Birstein, R.E. Mayer et al. System for measurement of low yield neutron pulses from D-D fusion reactions based upon a ^3He proportional counter. Meas. Sci. Technol. 19 (2008) IOPScience 087002 (5pp)].

Измеряемая зависимость сигнала нейтронного детектора от времени, начиная с момента излучения быстрых нейтронов, позволяет дифференцировать процессы замедления и поглощения нейтронов в геофизической среде и существенно повысить контрастность выделения пластов, насыщенных продуктивными углеводородами.

Способ реализуют следующим образом.

Размещают скважинный прибор в скважине. Включают импульсный источник 2 на генерацию импульсов быстрых нейтронов. Быстрые нейтроны импульсного источника 2, а также быстрые нейтроны, рассеявшиеся в окружающей среде во время нейтронного импульса, образовавшиеся со временем эпитепловые и тепловые нейтроны частично попадают в детектор 3 тепловых нейтронов, сигнал на выходе которого определяется количеством взаимодействий тех или иных нейтронов с веществом внутри детектора 3 в соответствующие моменты времени и выделяющейся при этом энергией. Зависимость сигнала детектора 3 от времени при различной влажности горной породы аналогична зависимостям 8-11.

Сигнал, поступающий с выхода детектора, 3 усиливается с помощью электронной схемы (на фиг. 1 не показана), оцифровывается и передается в наземную аппаратуру. В общем случае в состав электронной схемы входит усилитель-интегратор, процессор и блок телеметрии. В наземной аппаратуре временная зависимость сигнала сохраняется в памяти персонального компьютера.

Процесс повторяется для $N \geq 1$ нейтронных импульсов, при этом каждую последующую зависимость сигнала от времени для детектора 3 суммируют с предыдущей. Число нейтронных импульсов N определяется заданной точностью измерений.

При достаточно низком потоке нейтронов на детектор 3 и/или достаточно больших временах после

нейтронного импульса регистрация временной зависимости потока нейтронов может также осуществляться в счетном режиме.

В наземной аппаратуре полученную временную зависимость сравнивают с набором зависимостей из базы данных, рассчитанных заранее для горной породы различной влажности, при различных параметрах скважины и обсадной колонны, а также промывочной жидкости и аттестованных путем измерений указанных зависимостей данным способом на геофизических моделях горных пород.

Для сравнения могут, например, использоваться методы корреляционного анализа. Степень соответствия экспериментальной зависимости, полученной с детектора 3, расчетным зависимостям может определяться, например, посредством выборочного коэффициента ранговой корреляции Спирмена (А.К. Чернышев. Использование методов математической статистики для анализа сигналов, полученных экспериментальным путем, с небольшим количеством выборок, <http://hi-tech.asu.edu.ru>; М.А. Харченко. Корреляционный анализ. Учебное пособие. Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2008 г.).

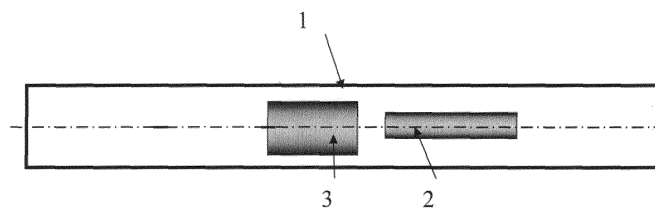
Из базы данных выбирают расчетную зависимость, наиболее близкую в соответствии с применяемыми критериями оценки к зависимости, зарегистрированной детектором 3. Влажность горной породы, а также параметры скважины принимают совпадающими с влажностью и параметрами, использованными при получении расчетной зависимости.

Таким образом, заявленный технический результат: повышение точности измерения влажности горной породы, в том числе при частоте следования регистрируемых событий, приводящей к просчетам в счетном режиме регистрации, достигается с помощью импульсного источника 2 быстрых нейтронов и детектора 3 тепловых нейтронов, расположенных в охранном корпусе 1 скважинного прибора, путем измерения зависимости от времени сигнала, возникающего по крайней мере в одном детекторе тепловых нейтронов, начиная с момента начала нейтронного импульса источника 2 быстрых нейтронов и до следующего импульса, обеспечивая измерение дополнительно, помимо потока эпитепловых 6 и тепловых 7 нейтронов, также потока быстрых 5 нейтронов.

Полученную зависимость сигнала детектора 3 от времени, аналогичную зависимостям 8-11, сравнивают с набором зависимостей из базы данных, заранее рассчитанных для скважинного прибора при различной влажности горной породы, параметрах скважины, промывочной жидкости и аттестованных путем измерений указанных временных зависимостей данным способом на геофизических моделях горных пород, в базе данных находят зависимость, соответствующую по критериям сравнения зарегистрированному временному распределению, влажность горной породы, параметры скважины, промывочной жидкости считают совпадающими с влажностью горной породы, параметрами скважины и промывочной жидкости, использованными при расчете временного распределения, соответствующего зарегистрированному временному распределению.

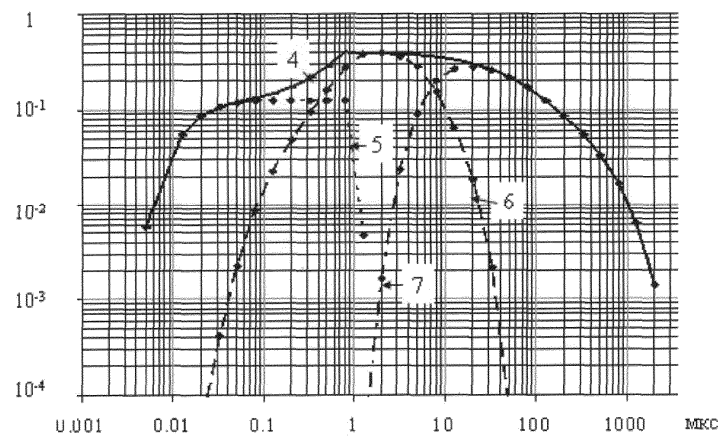
ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

Способ импульсного нейтрон-нейтронного каротажа, заключающийся в облучении породы импульсным потоком быстрых нейтронов, регистрации временных распределений потоков тепловых и эпитепловых нейтронов, отличающийся тем, что регистрируют заряд, образованный по крайней мере в одном детекторе тепловых нейтронов потоком падающих на него нейтронов с момента начала нейтронного импульса и до начала следующего нейтронного импульса, дополнительно обеспечивая тем самым регистрацию временного распределения заряда, вызванного быстрыми нейтронами, а также регистрацию временных распределений потоков эпитепловых и тепловых нейтронов при частоте следования регистрируемых событий, приводящей к просчетам в счетном режиме регистрации, сохраняют полученное временное распределение заряда, повторяют процесс регистрации для $N \geq 1$ нейтронных импульсов, при этом каждое последующее временное распределение заряда суммируют с сохраненным, сравнивают полученное временное распределение с набором временных распределений из базы данных, заранее рассчитанных для скважинного прибора при различных влажности горной породы, параметрах скважины, промывочной жидкости и аттестованных путем измерения временных распределений заряда данным способом на геофизических моделях горных пород, в базе данных находят временное распределение, соответствующее по критериям сравнения зарегистрированному временному распределению, влажность горной породы, параметры скважины, промывочной жидкости считают совпадающими с влажностью горной породы, параметрами скважины и промывочной жидкости, использованными при расчете временного распределения, соответствующего зарегистрированному временному распределению.



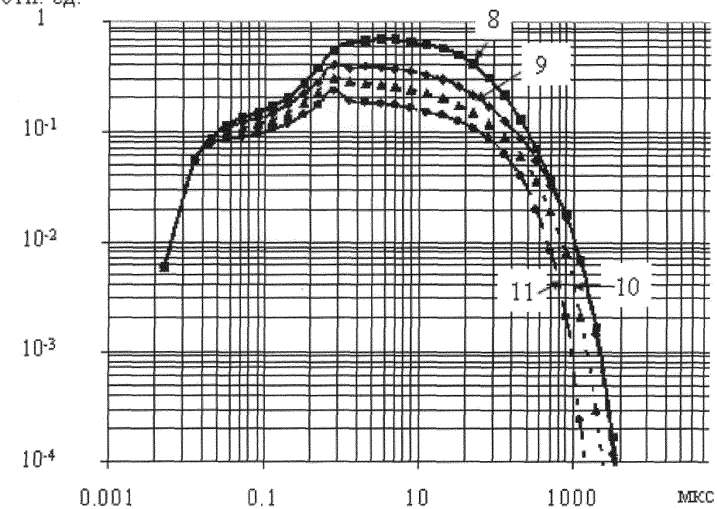
Фиг. 1

отн. ед.



Фиг. 2

отн. ед.



Фиг. 3



Евразийская патентная организация, ЕАПВ

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