(19) Евразийское патентное ведомство

(21) 202290689 (13) A1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки
2022.06.16

(22) Дата подачи заявки
2019.08.28

(51) Int. Cl. ***E21B 47/095*** (2012.01)
E21B 47/005 (2012.01)

(54) СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ СБРАСЫВАЕМОГО ОБЪЕКТА В СТВОЛЕ СКВАЖИНЫ

(86) **PCT/RU2019/000600**
(87) **WO 2021/040556 2021.03.04**

(71) Заявитель:
ШЛЮМБЕРГЕР ТЕКНОЛОДЖИ Б.В. (NL)

(72) Изобретатель:
Демидов Демид Валерьевич, Кабанник Артем Валерьевич, Коркин Роман Владимирович (RU)

(74) Представитель:
Медведев В.Н. (RU)

(57) Во время операции цементирования можно определить положение сбрасываемого объекта (например, цементировочной пробки или продавочной цементировочной пробки) в обсаженном стволе скважины в режиме реального времени. На буровой площадке установлена система сбора данных о давлении, а в устье скважины установлен датчик давления. Когда сбрасываемый объект продвигается по обсадной колонне, он встречает области с положительным или отрицательным изменением размера внутреннего поперечного сечения. При прохождении через области сбрасываемый объект генерирует импульс давления. Датчик давления обнаруживает импульс давления и связанные с ним отражения, а сигналы проходят математическую обработку для определения текущего положения сбрасываемого объекта.

202290689 A1

202290689 A1

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

2420-573459EA/072

СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ СБРАСЫВАЕМОГО ОБЪЕКТА В СТВОЛЕ СКВАЖИНЫ

Область техники

[0001] Настоящее изобретение в целом относится к операциям цементирования. В частности, изобретение относится к использованию импульсов давления для определения положений скребковых пробок и продавочных цементировочных пробок внутри обсадных и буровых колонн.

Предпосылки создания изобретения

[0002] При строительстве подземных скважин во время и после бурения обычно используют трубчатый элемент, такой как хвостовик или обсадная колонна, и закрепляют его цементом, который закачивают в затрубное пространство вокруг наружной поверхности трубчатого элемента. Цемент используется для поддержания трубчатого элемента и для обеспечения изоляции различных продуцирующих жидкости зон, через которые проходит скважина. Последняя функция позволяет предотвратить перекрестное загрязнение жидкостей из разных слоев. Например, цемент предотвращает проникновение пластовых жидкостей на уровень грунтовых вод и загрязнение питьевой воды или предотвращает попадание в скважину воды вместо нефти или газа. Более того, цементное кольцо помогает предотвращать коррозию трубчатого элемента.

[0003] В этой отрасли процесс укладки цементной суспензии называется первичным цементированием. В большинстве операций первичного цементирования используется способ цементирования с двумя цементировочными пробками. На Фиг. 1 показана типичная конфигурация **100** буровой площадки для операции первичного цементирования. Цементировочная головка **101** расположена на поверхности, а обсадную колонну **103** опускают в ствол **102** скважины. По мере опускания обсадной колонны **103** в ствол **102** скважины внутреннее пространство обсадной колонны заполняется промывочной жидкостью **108**. Обсадную колонну центрируют в стволе скважины центраторами **104**, прикрепленными к наружной поверхности обсадной колонны. Центраторы размещаются на критических секциях обсадной колонны во избежание прихвата при спуске обсадной колонны в скважину. Кроме того, они удерживают обсадную колонну в центре ствола скважины, помогая обеспечивать укладку равномерного цементного кольца в затрубном пространстве между обсадной колонной и стволом скважины. Нижний конец обсадной колонны защищен направляющим башмаком **105** и муфтой **109** с обратным клапаном. Направляющие башмаки представляют собой устройства конической формы, обычно с пулевидным концом, которые направляют обсадную колонну к центру скважины, чтобы свести к минимуму столкновения с неровными краями или размывы во время установки. Направляющий башмак отличается от муфты с обратным клапаном тем, что в нем нет обратного клапана. Обратный клапан в муфте с обратным клапаном может предотвращать обратный поток жидкостей или их

перетекание по U-образной траектории из затрубного пространства в обсадную колонну. Внутри цементировочной головки **101** находятся нижняя цементировочная пробка **106** и верхняя цементировочная пробка **107**. Цементировочные пробки, также называемые цементировочными скребковыми пробками или скребковыми пробками, представляют собой эластомерные устройства, которые создают физический барьер между разными жидкостями, перекачиваемыми через внутреннее пространство обсадной колонны. Большинство цементировочных пробок изготовлены из литого алюминиевого корпуса с формованными резиновыми плавниками, которые обеспечивают равномерное движение через трубы.

[0004] Цели операции первичного цементирования заключаются в удалении промывочной жидкости из внутреннего пространства обсадной колонны и ствола скважины, размещении цементной суспензии в затрубном пространстве и заполнении внутреннего пространства обсадной колонны вытесняющей жидкостью, такой как соляной раствор или вода. Нижняя цементировочная пробка **106** отделяет цементную суспензию от промывочной жидкости, а верхняя цементировочная пробка **107** отделяет цементную суспензию от вытесняющей жидкости.

[0005] Как правило, цементные суспензии и промывочные жидкости химически несовместимы. Смешивание жидкостей может приводить к образованию более вязкой или гелеобразной массы на границе раздела, которую сложно удалять из ствола скважины, что может препятствовать укладке однородного цементного кольца по всему объему затрубного пространства. Поэтому помимо скребковых пробок для обеспечения разделения жидкостей инженеры применяют также и химические средства. Между цементной суспензией и промывочной жидкостью можно перекачивать промывочные жидкости с химическими реагентами и продавочные жидкости. Эти жидкости обладают дополнительным преимуществом, которое заключается в том, что они очищают поверхности обсадной колонны и пласта, что помогает добиться хорошего связывания с цементом.

[0006] На Фиг. 2 показаны промывочная жидкость **201** с химическими реагентами и продавочная жидкость **202**, которые закачивают между промывочной жидкостью **103** и нижней цементировочной пробкой **106**. Цементная суспензия **203** следует за нижней цементировочной пробкой. Нижняя цементировочная пробка имеет мембрану, которая разрывается при достижении дна обсадной колонны, что позволяет цементной суспензии проходить через нижнюю цементировочную пробку и попадать в затрубное пространство (Фиг. 3).

[0007] После закачивания достаточного объема цементной суспензии для заполнения кольцевой области между обсадной колонной и стенкой ствола скважины освобождается верхняя цементировочная пробка **107**, за которой следует вытесняющая жидкость **301**. Верхняя цементировочная пробка **107** не имеет мембраны, поэтому при ее посадке гидравлическое сообщение между внутренним пространством обсадной колонны и затрубным пространством прерывается (Фиг. 4). По окончании операции

цементирования инженеры ожидают, когда цемент застынет и наберет прочность, что называется «ожиданием затвердевания цемента» (ОЗЦ). По истечении времени ОЗЦ можно приступать к выполнению последующих операций, таких как более глубокое бурение или перфорирование обсадной колонны.

[0008] Традиционные цементировочные пробки закачивают непосредственно с поверхности, поскольку они проходят только через одну трубу с постоянным внутренним диаметром (ВД). С другой стороны, хвостовики не проходят от поверхности, а вместо этого их опускают в скважину на бурильной колонне на глубину установки. Как правило, хвостовики имеют гораздо больший ВД, чем бурильная колонна. Таким образом, с поверхности невозможно закачать одну цементировочную пробку. Поэтому продавливание осуществляют с использованием двух пробок. Одна пробка, называемая продавочной цементировочной пробкой, находится в поверхностном оборудовании для цементирования. Вторая пробка крепится либо к нижней, либо к верхней части спускного инструмента хвостовика в сборе. Вторая пробка называется скребковой пробкой хвостовика.

[0009] После закачивания цемента в хвостовик и бурильную колонну продавочную цементировочную пробку (сбрасываемый объект) освобождают от поверхностного оборудования для цементирования. По достижении верхней части хвостовика продавочная цементировочная пробка фиксируется в скребковой пробке хвостовика. После этого продавочная цементировочная пробка и скребковая пробка хвостовика становятся единым разделителем между цементной суспензией и вытесняющей жидкостью. Эту схему можно наблюдать в скважинах удаленной досягаемости и в задачах по многоступенчатому цементированию.

[0010] Дополнительную информацию о цементировочных пробках, продавочных цементировочных пробках и операциях первичного цементирования можно найти в следующих публикациях: Leugemors E et al.: “Cementing Equipment and Casing Hardware”, Nelson EB, Guillot D (eds.): Well Cementing-2nd Edition, Houston, Schlumberger (2006) 343-458. Piot B, Cuvillier G: “Primary Cementing Techniques”, Nelson EB, Guillot D (eds.): Well Cementing-2nd Edition, Houston, Schlumberger (2006) 459-501. Trogus M: “Studies of Cement Wiper Plugs Suggest New Deepwater Standards”, публикация SPE/IADC-173066-MS, представленная на конференции SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, Лондон, Великобритания, 17-19 марта 2015 г.

[0011] Могут наблюдаться отклонения от идеальной операции цементирования, описанной выше. К возможным причинам относятся неровности стенок скважины, ведущие к неточным расчетам объема вытесняющей жидкости, колебания производительности насоса, различия между номинальной и фактической геометрией обсадной колонны, поглощение промывочной жидкости, деформация обсадной колонны и потеря жидкости. Учитывая эти неопределенности, операторы и инженеры заинтересованы в том, чтобы обеспечить контроль положений цементировочной пробки в режиме реального времени, а также определение положения верхней границы цементного

кольца (ВГЦК) в затрубном пространстве.

Краткое описание графических материалов

[0012] На Фиг. 1 показана типичная конфигурация буровой площадки во время операции цементирования.

[0013] На Фиг. 2 показана операция цементирования в процессе выполнения. Нижняя цементировочная пробка была освобождена и отделяет цементную суспензию от химических промывочных жидкостей, продавочных жидкостей и промывочной жидкости.

[0014] На Фиг. 3 показана операция цементирования в процессе выполнения. Нижняя цементировочная пробка опустилась на муфту с обратным клапаном. Мембрана в нижней цементировочной пробке разрывается, что позволяет цементной суспензии попасть в затрубное пространство между обсадной колонной и стенкой ствола скважины.

[0015] На Фиг. 4 показана завершенная операция цементирования. Цементная суспензия заполняет затрубное пространство, обе цементировочные пробки опустились на муфту с обратным клапаном, а внутреннее пространство обсадной колонны заполнено вытесняющей жидкостью.

[0016] На Фиг. 5 показано прохождение цементировочной пробки через область обсадной трубы с отрицательным или положительным изменением размера внутреннего поперечного сечения.

[0017] На Фиг. 6 показано прохождение цементировочной пробки через муфту, имеющую размер внутреннего поперечного сечения d_1, который отличается от размера остальной обсадной колонны d_2.

[0018] На Фиг. 7 показана конфигурация скважины для применения раскрытых способов на практике.

[0019] На Фиг. 8(i) и 8(ii) показана последовательность вычислительных операций для определения импульсов давления, возникающих при прохождении цементировочной пробки через муфты обсадной колонны. На Фиг. 8(i)(a) представлен график зависимости давления и расхода в устье скважины от времени; на Фиг. 8(i)(b) показана спектрограмма давления в устье скважины; на Фиг. 8(ii)(c) показана нормализованная спектральная плотность энергии; на Фиг. 8(ii)(d) представлены графики зависимостей вытесненного объема и оценочной глубины цементировочной пробки от времени; на Фиг. 8(ii)(e) представлен график измеренных импульсов давления, возникающих при прохождении цементировочной пробки через муфты обсадной колонны.

[0020] На Фиг. 9 показаны глубины, ассоциируемые с каждым импульсом давления в соответствии с мерой труб.

[0021] На Фиг. 10 показаны импульсы давления в соответствии с мерой труб при наличии неодинаковых расстояний между муфтами.

[0022] На Фиг. 11 показаны примеры данных с операции первичного цементирования: давление в устье скважины, время-частотная диаграмма и интенсивность отраженного сигнала.

[0023] На Фиг. 12 показаны примеры данных с операции первичного

цементирования: диаграмма интенсивности отраженного сигнала и эволюция давления в устье скважины.

Краткое описание сущности

[0024] В одном аспекте варианты осуществления относятся к способам определения положения сбрасываемого объекта внутри обсадной колонны. Обсадную колонну устанавливают в ствол скважины, и в ходе этого процесса жидкость в стволе скважины попадает во внутреннее пространство обсадной колонны и заполняет его. Обсадная колонна содержит по меньшей мере одну область с отрицательным или положительным изменением размера внутреннего поперечного сечения. На буровой площадке установлена система сбора данных о давлении, а на цементировочной головке установлен датчик давления.

[0025] Затем внутри обсадной колонны размещают сбрасываемый объект. Сбрасываемый объект может представлять собой верхнюю цементировочную пробку, нижнюю цементировочную пробку или продавочную цементировочную пробку. Затем за сбрасываемым объектом закачивают жидкость, в результате чего сбрасываемый объект продвигается по внутреннему пространству обсадной колонны и проходит через по меньшей мере одну область с отрицательным или положительным изменением размера внутреннего поперечного сечения, создавая таким образом импульс давления.

[0026] Данные о давлении фиксируются датчиком давления и передаются в систему сбора данных о давлении. Затем данные о давлении математически обрабатываются путем выделения импульсов давления, отражений импульсов или обоих параметров, и определяется положение сбрасываемого объекта.

[0027] В дополнительном аспекте варианты осуществления относятся к способам цементирования ствола скважины, проходящего через подземный пласт. Обсадная колонна устанавливается в заполненный жидкостью ствол скважины, и в ходе этого жидкость в стволе скважины попадает во внутреннее пространство обсадной колонны и заполняет его, причем обсадная колонна содержит по меньшей мере одну область с отрицательным или положительным изменением размера внутреннего поперечного сечения. На буровой площадке установлена система сбора данных о давлении, а на цементировочной головке установлен датчик давления.

[0028] Датчик давления используется для обнаружения импульса давления и отражений импульсов и передачи данных о давлении в систему сбора данных о давлении. Затем данные о давлении математически обрабатываются и определяется положение цементировочной пробки.

[0029] Внутри обсадной колонны размещают верхнюю цементировочную пробку. За верхней цементировочной пробкой закачивают вытесняющую жидкость, в результате чего верхняя цементировочная пробка продвигается по внутреннему пространству обсадной колонны и проходит через по меньшей мере одну область с отрицательным или положительным изменением размера внутреннего поперечного сечения, генерируя таким образом импульс давления.

[0030] По меньшей мере один датчик давления используется для обнаружения импульса давления, отражений импульсов или обоих параметров и передачи данных о давлении в систему сбора данных о давлении. Затем данные о давлении математически обрабатываются и определяется положение цементировочной пробки.

Подробное описание изобретения

[0031] Прежде всего, следует отметить, что при разработке любого такого фактического варианта осуществления необходимо проверять многочисленные конкретные варианты его реализации, чтобы достичь конкретных целей разработчика, таких как соответствие системным и коммерческим ограничениям, которые различаются для разных вариантов реализации. Более того, следует понимать, что несмотря на возможную сложность и продолжительность такой разработки, ее результат станет рутинным процессом для специалистов в данной области, которые могут воспользоваться преимуществами настоящего изобретения. Кроме того, использованная/раскрытая в настоящем документе композиция может также содержать некоторые компоненты, отличные от указанных. В кратком описании изобретения и в настоящем подробном описании каждое числовое значение следует сначала читать в сопряжении с термином «приблизительно» (если в явной форме отсутствует в тексте), а в дальнейшем - без такого термина, если контекстом не определено иное. Также следует понимать, что в кратком описании изобретения и в настоящем подробном описании при указании или описании диапазонов полезных, подходящих или т. п. концентраций имеются в виду любые концентрации в пределах этого диапазона, включая конечные точки. Например, «диапазон от 1 до 10» означает указание на все возможные числа в непрерывном множестве от приблизительно 1 до приблизительно 10. Таким образом, даже если в пределах этого диапазона в явном виде указаны или подразумеваются конкретные точки данных либо не указаны и не подразумеваются никакие точки данных, следует понимать, что авторы изобретения учитывают и понимают, что все точки данных в пределах этого диапазона необходимо рассматривать как заданные и что авторы изобретения обладают знаниями обо всем диапазоне и всех точках в пределах этого диапазона.

[0032] Настоящее описание относится к определению положения сбрасываемых объектов в обсадной колонне или хвостовике во время операции цементирования скважины. Сбрасываемые объекты могут включать в себя верхние или нижние цементировочные пробки или продавочные цементировочные пробки. Способ основан на генерации импульсов давления в скважине, регистрации высокочастотных данных о давлении, математической обработке зарегистрированных данных с извлечением импульсов давления и отражений импульсов давления от скважинных объектов, измерении значений времени отражения импульсов и вычислении расстояния от известного положения датчика давления до сбрасываемого объекта. Раскрытые в настоящем документе способы и измерения можно выполнять в режиме реального времени во время операции цементирования. Возможность определять местоположения сбрасываемых объектов в режиме реального времени позволяет операторам принимать

мгновенные решения в отношении хода операции, например, решения о продолжении или прекращении продавливания, объемах вводимой в ствол скважины жидкости и скоростей закачки.

[0033] Способ и система определения местоположения стационарных скважинных объектов, отражающих гидравлический сигнал, раскрыты в патентной заявке WO 2018/004369. Контроль скважины основан на кепстральном анализе данных о давлении, зарегистрированных на устье скважины. Он предназначен для определения положения стационарных скважинных объектов, отражающих гидравлический сигнал. Датчик давления обнаруживает гидравлический сигнал, а затем происходит обработка данных о давлении для определения их свойств, таких как значения времени отражения трубных волн. Одним (но не единственным) способом получения такой информации является кепстральный анализ. Кепстральный анализ широко используется в различных сферах применения, например для контроля операций гидроразрыва пласта. Кепстрограмма позволяет обнаруживать объекты, отражающие гидравлический сигнал. Для операций гидроразрыва пласта в этом способе используются источники гидравлических сигналов, включая эффект гидравлического удара, шумы от работы поверхностных или погружных насосов и случаи перфорации.

[0034] В патенте США 6401814 B1 раскрыт способ определения местоположения цементировочной пробки в подземной скважине во время проведения операций цементирования с помощью отражений импульсов давления. После генерации импульсы давления передаются через вытесняющую жидкость, отражаются от цементировочной пробки и, наконец, принимаются датчиком давления. Местоположение пробки рассчитывают на основании времени отражения и скорости импульсов давления в данной среде. Способ генерации и передачи импульса давления через жидкость в обсадной колонне включает в себя мгновенное открытие клапана, установленного в трубопроводе скважины. Другие способы генерации импульсов давления включают в себя пневмопушку, изменение частоты вращения двигателя насоса или отключение насоса.

[0035] В патенте США 5754495 описан способ акустического определения длины жидкостного трубопровода. Он включает в себя устройство системы создания давления в закрытом пространстве, подключение датчиков давления, заполнения системы жидкостью, генерацию импульса давления, измерение распространения импульса давления до дистального конца жидкостного трубопровода и расчет длины жидкостного трубопровода. В варианте осуществления трубная волна генерируется путем резкого сброса давления в скважине через клапан.

[0036] В патенте США 4819726 раскрыт способ указания положения цементировочной скребковой пробки до ее прибытия на забой. Он предусматривает устройство, включающее в себя секцию колонны труб с внутренним срезаемым временным средством ограничения движения цементировочной скребковой пробки через секцию колонны труб. Прибытие цементировочной пробки в срезаемое временное средство ограничения в колонне труб регистрируется по повышению давления в колонне

труб на поверхности и отслеживается датчиком давления.

[0037] В патенте США 9546548 раскрыты устройство и способ использования для анализа цементного кольца на основании распространения акустических волн. Оно состоит из устройства обнаружения акустических волн, содержащего оптоволоконный кабель, протянутый вниз в скважину, оптический источник и систему сбора данных. Акустический источник формирует продольную волну в обсадной колонне. Давление в затрубном пространстве определяют по мере застывания цементной суспензии, и это давление сравнивают с максимальным пластовым давлением как показатель того, застыл ли цемент и набрал ли он достаточную прочность для поддержания эффективного уплотнения между пластом и обсадной колонной по затрубному пространству.

[0038] В раскрытых в настоящей заявке способах импульсы давления генерируются при прохождении цементировочной пробки через соединения муфт обсадной колонны, где имеет место изменение внутреннего диаметра обсадной колонны. Вычисление расстояния основано на определении скорости трубных волн, генерируемых импульсами давления, и времени распространения трубной волны между датчиком давления и сбрасываемым объектом. Значения времени отражения получают путем кепстрального анализа зарегистрированных высокочастотных данных о давлении. Как описано в патентной заявке WO 2018/004369, ссылка на которую дана выше, кепстр представляет собой результат обратного преобразования Фурье (IFT) логарифма спектра мощности сигнала. Скорость трубной волны можно получить путем вычисления времени отражения импульса давления от объектов в стволе скважины с известным положением, например, посадочной муфты, или рассчитать теоретически на основании параметров, включающих в себя свойства жидкой среды и геометрию обсадной колонны. В другом варианте осуществления применяется распознавание положения скребковой пробки на основании генерации импульсов давления и информации о последовательности муфт, так называемой мере труб. Этот вариант осуществления включает в себя генерацию импульса давления при прохождении скребковой пробки через муфту, его обнаружение и соотнесение с его глубиной, взятой из таблицы меры труб.

[0039] Один вариант осуществления изобретения представляет собой систему, которая включает в себя по меньшей мере две обсадные трубы, соединенные с получением колонны обсадных труб и помещенные в ствол скважины (Фиг. 5). Цементировочную пробку **107** сбрасывают в обсадную колонну **103**, заполненную жидкостью. По меньшей мере в одной трубе обсадной колонны может быть область с по меньшей мере одним изменением размера внутреннего поперечного сечения. Изменение размера внутреннего поперечного сечения может быть отрицательным **501** или положительным **502** по отношению размеру внутреннего поперечного сечения остальной колонны. Изменение размера внутреннего поперечного сечения может происходить в местах соединения обсадных труб, которые могут быть винтовыми соединениями **601**, сварными соединениями или соединениями обоих типов (Фиг. 6). Импульс давления генерируется при прохождении цементировочной пробки через область с изменением

внутреннего диаметра (**501**, **502** или **601**) из-за различия в силах (**602**, **603**), требуемых для проталкивания цементировочной пробки через область d_1 и через остальную колонну d_2. Изменение размера внутреннего поперечного сечения также может быть ограничением, канавкой, выступом, отверстием или их комбинацией. Кроме того, расстояния между областями с по меньшей мере одним изменением размера внутреннего поперечного сечения могут быть одинаковыми, неодинаковыми или обоими.

[0040] В раскрытом способе используется сборный узел (Фиг. 7), который включает в себя ствол скважины **102**, введенную в ствол скважины заполненную жидкостью обсадную колонну **103**, датчик давления **701**, установленный на обсадной колонне на поверхности (устье скважины или цементировочная головка), систему сбора данных **702** для регистрации данных о давлении и по меньшей мере один насос **703**, соединенный с обсадной колонной через цементировочную головку **101**. Датчик давления может быть установлен на линии закачки жидкости, например, в цементировочной головке. Или же датчик давления может быть установлен на затрубной стороне обсадной колонны (например, на противовыбросовом устройстве). Импульсы давления можно регистрировать в диапазоне частот от 20 до 2000 Гц. После генерации импульс давления **704** может распространяться в заполненном жидкостью стволе скважины и отражаться от различных объектов. Отражающие импульс объекты представляют собой любые физические или геометрические изменения в стволе скважины и обсадной колонне, которые могут без ограничений включать в себя сбрасываемые объекты, такие как цементировочная пробка **107**, границы между верхом цемента и жидкостью или стационарные объекты, такие как посадочная муфта **705**, хвостовик, обратный клапан, забой **706**, трещины и пустоты. Распространение и отражение импульса могут повторяться несколько раз до их полного ослабления. Отражения импульсов от различных объектов обнаруживаются датчиком давления, установленным на поверхности, и данные фиксируются системой сбора данных. Затем зарегистрированные данные о давлении обрабатываются с использованием математического алгоритма с получением значений времени отражения от различных объектов. Математический алгоритм может представлять собой кепстральный анализ, включающий в себя получение кепстрограммы давления в координатах сачтота - время и расчет времени отражения импульса давления от сбрасываемого объекта. Затем рассчитывается местоположение объекта относительно известного положения датчика давления путем умножения полувремени отражения на скорость распространения импульса в среде, заполняющей объем между датчиком давления и объектом. Время отражения от сбрасываемого объекта можно преобразовать в положение сбрасываемого объекта путем умножения на скорость трубной волны.

[0041] Специалистам в данной области будет понятно, что раскрытые способы могут дополнительно включать в себя размещение нижней цементировочной пробки внутри обсадной колонны. Цементную суспензию можно закачивать за нижней цементировочной пробкой. Нижняя цементировочная пробка может продвигаться по внутреннему пространству обсадной колонны и проходить через по меньшей мере одну

область с отрицательным или положительным изменением размера внутреннего поперечного сечения, генерируя таким образом импульс давления. Для обнаружения импульса давления и передачи данных о давлении в систему сбора данных о давлении можно использовать по меньшей мере один датчик давления. Данные о давлении можно обработать математическими средствами и определить положение нижней цементировочной пробки. Контроль нижней цементировочной пробки может проводиться по меньшей мере до запуска верхней цементировочной пробки.

[0042] В другом варианте осуществления скорость распространения импульса давления в среде берется из результатов измерения в ходе цементирования предыдущей секции или соседней скважины с аналогичными характеристиками.

[0043] Определение местоположения объекта можно выполнять в режиме реального времени в процессе операции цементирования. Оно реализуется путем регистрации и математической обработки сигнала давления с последующим позиционированием объекта непосредственно в процессе операции цементирования. Компьютер со специализированным программным обеспечением может выполнять немедленную обработку данных и построение диаграммы отслеживания для объекта.

[0044] В другом варианте осуществления используется информация о последовательности муфт, так называемая мера труб. Мера труб представляет собой таблицу, в которой зафиксированы длины и положения всех муфт обсадной колонны. Импульс, генерируемый проходящей через муфту цементировочной пробкой, можно сопоставить с его глубиной, взятой из таблицы меры труб, как показано на Фиг. 8(i), 8(ii) и 9.

[0045] Высокочастотное давление и скорость закачки показаны на Фиг. 8(i)(a). Спектрограмма сигнала давления представляет собой визуальное представление изменение спектра частот сигнала во времени, как показано на Фиг. 8(ii)(b). Хотя импульсы давления неразличимы на кривой давления, они четко видны на спектрограмме как широкополосные события. Более того, эти импульсы проявляются как пики на графике нормализованной спектральной плотности энергии, показанном на Фиг. 8(ii)(c).

[0046] Спектральная плотность энергии описывает, как энергия сигнала распределена по частоте. Термин «энергия» используется в обобщенном смысле теории обработки сигнала, т. е. энергия E сигнала x(t) равна:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)^2| dt$$

(1)

[0047] Спектральная плотность энергии наиболее удобна для коротких импульсов - например, коротких импульсных сигналов давления, имеющих конечную полную энергию. В этом случае теорема Парсеваля дает альтернативное выражение для энергии сигнала:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |\hat{x}(f)|^2 df$$

(2)

где

$$x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-2\pi i f t} x(t) dt$$

(3)

представляет собой преобразование Фурье сигнала, а f представляет собой частоту в Гц. Часто используют угловую частоту $\omega = 2\pi f$. Поскольку интеграл в правой части представляет собой энергию сигнала, подынтегральное выражение $|\hat{x}(f)|^2$ можно интерпретировать как функцию плотности, описывающую энергию на единицу частоты f. В свете этого спектральная плотность энергии сигнала x(t) определяется следующим образом:

$$S_{xx}(f) = |\hat{x}(f)|^2.$$

(4)

[0048] Нормализованная спектральная плотность энергии вычисляется путем интегрирования спектрограммы по оси частот с последующей нормализацией на самый сильный пик. Поэтому нормализованная спектральная плотность энергии представляет собой безразмерную величину. На Фиг. 8(ii)(c) также показано, что временной интервал между этими пиками зависит от скорости закачки. Временной интервал короче при скорости закачки 1 м^3/мин и длиннее при скорости закачки [0,5 м^3/мин (3,1 барреля/мин)]. Удобным способом учета непостоянства скорости закачки является преобразование временной шкалы в шкалу глубин, как показано на Фиг. 8(ii)(d). Интегрированием скорости закачки по времени можно вычислить кривую вытесненного объема. На левой оси y на Фиг. 8(ii)(d) показана ось вытесненного объема в обратном порядке. Принимая во внимание внутренний диаметр обсадной колонны, можно вычислить шкалу глубин, как показано правой осью y на Фиг. 8(ii)(d). Для определения глубин цементировочной пробки выполняется отображение горизонтальной оси времени с Фиг. 8(ii)(c) на кривую вытесненного объема. Для получения графика импульсов от муфты можно отложить зависимость нормализованной спектральной плотности энергии вдоль оси глубин, как показано на Фиг. 8(ii)(e).

[0049] Затем, как показано на Фиг. 9, для определения глубины цементировочной пробки можно сравнить график импульсов от муфты с Фиг. 8(ii)(e) с известной мерой труб. Специалистам в данной области будет понятно, что положение нижней пробки можно контролировать в период до запуска верхней пробки.

[0050] Описанная выше последовательность операций работает оптимально, когда все импульсы четко видны на графике нормализованной спектральной плотности энергии. В некоторых случаях амплитуда одного или более импульсов может быть слишком низкой из-за ослабления трубной волны в стволе скважин, или может быть погребена в шумах, или по обеим причинам. Кроме того, из-за эффекта перетекания по U-образной

траектории импульсы давления могут быть видны не сразу после отделения пробки от цементировочной головки, а только после продвижения цементировочной пробкой на некоторую глубину от поверхности. В этом случае, если все соединения имеют одну и ту же длину, установить однозначное соответствие между ожидаемыми и измеренными импульсами может быть затруднительно. Этого обстоятельства можно избежать путем установки в различных местоположениях сегментов обсадной колонны, которые короче или длиннее используемых в обычной последовательности. Иными словами, расстояния между областями с по меньшей мере одним изменением размера внутреннего поперечного сечения могут быть одинаковыми или неодинаковыми. При таком подходе мера труб должна включать в себя одно или несколько более коротких или более длинных соединений или их комбинацию, чтобы они были четко различимы на графиках измеряемых импульсов. Затем эти импульсы можно использовать в качестве эталона для установления корреляции между ожидаемыми импульсами давления и мерой труб, как для муфт с номерами K и K+1, показанных на Фиг. 10.

Пример

[0051] Следующий пример служит в качестве дополнительной иллюстрации изобретения.

[0052] В практическом примере настоящего изобретения датчик давления был установлен на цементировочную головку ствола скважины с обсадной колонной диаметром 34 см (13 3/8 дюйма), имеющей истинную вертикальную длину 600 м (1969 футов) и посадочную муфту на глубине 585 м (1919 футов). Скважину цементировали путем закачки цементной суспензии и последующей закачки вытесняющей жидкости на углеводородной основе. Для защиты цементной суспензии от загрязнения использовали две цементировочные пробки - нижнюю и верхнюю. Давление на цементировочной головке регистрировали со скоростью 500 отсчетов в секунду, используя датчик давления Viatran 509 и устройство сбора данных. После этого зарегистрированные данные обрабатывали с использованием кепстрального анализа и получали значения времени отражения импульсов давления от различных объектов. Положение верхней цементировочной пробки отслеживали раскрытым способом. На Фиг. 11 показаны результаты обработки высокочастотных данных о давлении с использованием кепстрального анализа и представлены профиль давления (a), диаграммы частоты (b) и интенсивности отраженного сигнала (c) с указанием времени отражения импульса давления от скребковой пробки, в зависимости от времени с начала операции продавливания цементирующего материала. На диаграмме (b) можно видеть периодические (каждые ~50 с) широкополосные сигналы **1101**, соответствующие импульсам давления, генерируемым при прохождении цементировочной пробки через соединения обсадных труб с положительным изменением размера внутреннего поперечного сечения (локальное расширение) через каждые 10,5 м (34,4 фута) трубчатого элемента. Принимая во внимание известные параметры, полученные из отчета по проведению операции цементирования, такие как скорость закачки [1,02 $м^3$ (6,4

барреля/мин)], внутренний диаметр обсадной колонны [31,7 см (12,475 дюйма)] и расстояние между двумя соединениями [10,5 м (34,4 фута)], можно рассчитать, что цементировочная пробка проходит через муфту каждые 52 с, что соответствует ~50-секундному периоду импульсов **1101** на частотной диаграмме (b). Кроме того, при снижении скорости закачки до [0,48 $м^3$ (3 барреля/мин)] через 1650 с после начала операции скорость цементировочной пробки снизилась, а время перемещения между двумя муфтами составило 116 с. В то же время период импульсов **1102**, наблюдаемых на диаграмме (b), увеличился до ~110 с. Для определения положения пробки в процессе продавливания можно установить корреляцию этих первичных импульсов с мерой труб. Кроме того, импульсы, генерируемые при прохождении цементировочной пробки через муфты, распространяются по стволу скважины до цементировочной головки, и некоторые из них отражаются вперед и назад до их полного ослабления. На диаграмме интенсивности отраженного сигнала (c) можно четко видеть линию **1103**, которая соответствует времени отражения импульса давления от цементировочной пробки, и перемещение цементировочной пробки можно отслеживать в режиме реального времени вплоть до достижения ей посадочной муфты в момент времени с начала операции 2450 с **1104**.

[0053] Чтобы перевести время отражения в положение цементировочной пробки в стволе скважины, экспериментально определяли скорость распространения импульса давления в жидкой среде между датчиком давления и верхней цементировочной пробкой. Использовался момент выпуска из скважины после посадки цементировочной пробки на посадочную муфту, поскольку он также приводил к генерации импульса давления. После кепстрального анализа данных о давлении вблизи момента сброса давления построили диаграмму интенсивности отраженного сигнала (Фиг. 12). В результате получили четко выраженное пятно **1201** на диаграмме. Оно соответствует времени отражения от верхней скребковой пробки, садящейся на посадочную муфту, - 1,01 с. Принимая во внимание известную глубину посадочной муфты, рассчитали скорость распространения импульса давления в вытесняющей жидкости (буровой раствор на углеводородной основе), оказавшуюся равной 1158 м/с. Используя этот результат, можно перевести время отражения импульса давления от цементировочной пробки в положение скребковой пробки в любой момент времени, когда отражение различимо на диаграмме интенсивности отраженного сигнала.

[0054] Хотя выше были подробно описаны лишь несколько примеров осуществления, специалистам в данной области будет понятно, что возможны многие модификации примеров осуществления без существенного отклонения от настоящего изобретения. Соответственно, предполагается, что все такие модификации должны быть включены в объем настоящего раскрытия, как определено в представленной ниже формуле изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ определения положения сбрасываемого объекта внутри обсадной колонны, включающий:

(i) установку обсадной колонны в заполненный жидкостью ствол скважины, причем обсадная колонна содержит по меньшей мере одну область с отрицательным или положительным изменением размера внутреннего поперечного сечения;

(ii) установку системы сбора данных о давлении на буровой площадке и датчика давления в устье скважины;

(iii) размещение сбрасываемого объекта внутри обсадной колонны;

(iv) закачивание жидкости за сбрасываемым объектом, в результате чего сбрасываемый объект продвигается по внутреннему пространству обсадной колонны и проходит через по меньшей мере одну область с отрицательным или положительным изменением размера внутреннего поперечного сечения, генерируя таким образом импульс давления;

(v) регистрацию данных о давлении датчиком давления и передачу данных о давлении в систему сбора данных о давлении; и

(vi) математическую обработку данных о давлении путем выделения импульсов давления, отражений импульсов или обоих параметров и определения положения сбрасываемого объекта.

2. Способ по п. 1, в котором сбрасываемый объект представляет собой верхнюю цементировочную пробку, нижнюю цементировочную пробку или продавочную цементировочную пробку.

3. Способ по п. 1, в котором изменение размера внутреннего поперечного сечения происходит в месте соединения обсадных труб, причем соединения обсадных труб включают в себя винтовые соединения, сварные соединения или оба типа соединений.

4. Способ по п. 1, в котором расстояния между областями с по меньшей мере одним изменением размера внутреннего поперечного сечения одинаковы, неодинаковы, или оба варианта.

5. Способ по п. 1, в котором математическая обработка импульсов давления и отражений импульсов включает в себя кепстральный анализ, включающий получение кепстрограммы давления в координатах сачтота - время и расчет времени отражения импульса давления от сбрасываемого объекта, двигающегося по обсадной колонне.

6. Способ по п. 1, в котором математическая обработка дополнительно включает в себя определение скорости трубной волны на основании времени отражения импульса давления от стационарного объекта с известным положением в стволе скважины.

7. Способ по п. 1, в котором время отражения от сбрасываемого объекта преобразуется в положение сбрасываемого объекта путем умножения на скорость трубной волны.

8. Способ по п. 1, в котором математическая обработка включает в себя анализ спектрограммы давления и определение импульсов давления.

9. Способ по п. 1, в котором математическая обработка включает в себя анализ нормализованной спектральной плотности энергии данных о давлении.

10. Способ по п. 9, в котором нормализованную спектральную плотность энергии вычисляют путем интегрирования спектрограммы давления по оси частот с последующей нормализацией.

11. Способ по п. 1, в котором математическая обработка включает в себя установление корреляции между ожидаемыми импульсами давления на основании известной меры труб и импульсами давления со спектрограммы давления или нормализованной спектральной плотности энергии.

12. Способ по п. 1, в котором определение местоположения сбрасываемых объектов выполняется в режиме реального времени во время закачивания, что позволяет оператору контролировать перемещение сбрасываемого объекта.

13. Способ по п. 1, в котором жидкость представляет собой вытесняющую жидкость.

14. Способ цементирования ствола скважины, проходящего через подземный пласт, включающий:

(i) установку обсадной колонны в ствол скважины, причем ствол скважины заполнен жидкостью, при этом обсадная колонна содержит по меньшей мере одну область с отрицательным или положительным изменением размера внутреннего поперечного сечения;

(ii) установку системы сбора данных о давлении на буровой площадке и по меньшей мере одного датчика давления в устье скважины;

(iii) размещение верхней цементировочной пробки внутри обсадной колонны;

(iv) закачивание вытесняющей жидкости за верхней цементировочной пробкой, в результате чего верхняя цементировочная пробка продвигается по внутреннему пространству обсадной колонны и проходит через по меньшей мере одну область с отрицательным или положительным изменением размера внутреннего поперечного сечения, генерируя таким образом импульс давления;

(v) использование по меньшей мере одного датчика давления для обнаружения импульса давления и передачи данных о давлении в систему сбора данных о давлении, причем данные о давлении включают в себя скорость распространения импульса давления и время отражения; и

(vi) обработку данных о давлении математическими средствами и определение положения верхней цементировочной пробки.

15. Способ по п. 14, дополнительно включающий:

(a) размещение нижней цементировочной пробки внутри обсадной колонны;

(b) закачивание цементной суспензии за нижней цементировочной пробкой, в результате чего нижняя цементировочная пробка продвигается по внутреннему пространству обсадной колонны и проходит через по меньшей мере одну область с отрицательным или положительным изменением размера внутреннего поперечного

сечения, генерируя таким образом импульс давления;

(c) использование по меньшей мере одного датчика давления для обнаружения импульса давления и передачи данных о давлении в систему сбора данных о давлении, причем данные о давлении включают в себя скорость распространения импульса давления и время отражения; и

(d) обработку данных о давлении математическими средствами и определение положения нижней цементировочной пробки.

16. Способ по п. 14, в котором расстояния между областями с по меньшей мере одним изменением размера внутреннего поперечного сечения одинаковы, неодинаковы, или оба варианта.

17. Способ по п. 14, в котором математическая обработка включает в себя кепстральный анализ, включающий получение кепстрограммы давления в координатах сачтота - время и расчет времени отражения импульса давления от верхней или нижней скребковой пробки.

18. Способ по п. 14, в котором математическая обработка дополнительно включает в себя определение скорости трубной волны на основании времени отражения импульса давления от стационарного объекта с известным положением в стволе скважины.

19. Способ по п. 14, в котором время отражения от верхней цементировочной пробки преобразуется в положение верхней цементировочной пробки путем умножения на скорость трубной волны.

20. Способ по п. 14, в котором математическая обработка включает в себя анализ спектрограммы давления и определение импульсов давления.

21. Способ по п. 14, в котором математическая обработка включает в себя анализ нормализованной спектральной плотности энергии данных о давлении.

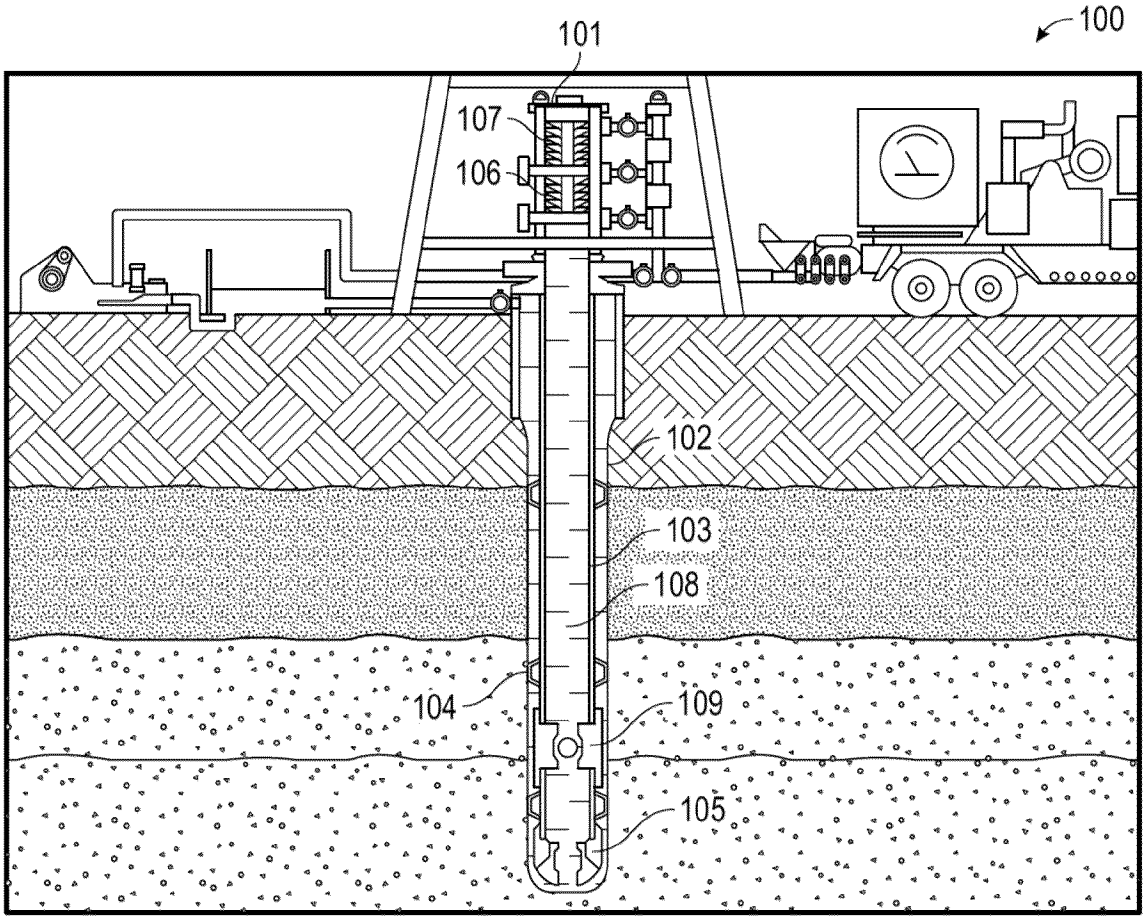
22. Способ по п. 14, в котором нормализованную спектральную плотность энергии вычисляют путем интегрирования спектрограммы давления по оси частот с последующей нормализацией.

23. Способ по п. 14, в котором математическая обработка включает в себя установление корреляции между ожидаемыми импульсами давления на основании известной меры труб и импульсами давления со спектрограммы давления или нормализованной спектральной плотности энергии.

24. Способ по п. 14, в котором определение местоположения сбрасываемых объектов выполняется в режиме реального времени во время закачивания, что позволяет оператору принимать мгновенные решения в отношении хода операции.

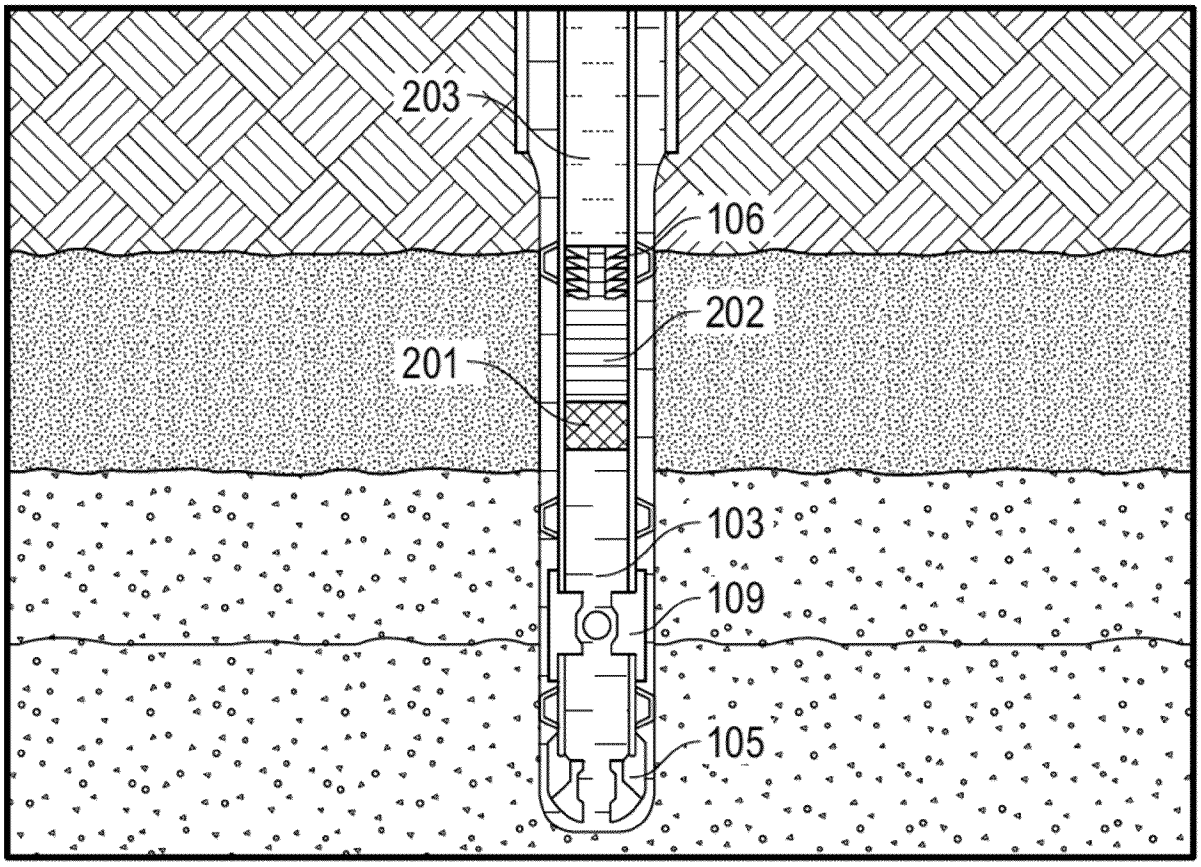
25. Способ по п. 14, в котором скорость распространения импульса давления берут из результатов измерений, полученных в ходе цементирования предыдущей секции или соседней скважины с аналогичными характеристиками.

По доверенности



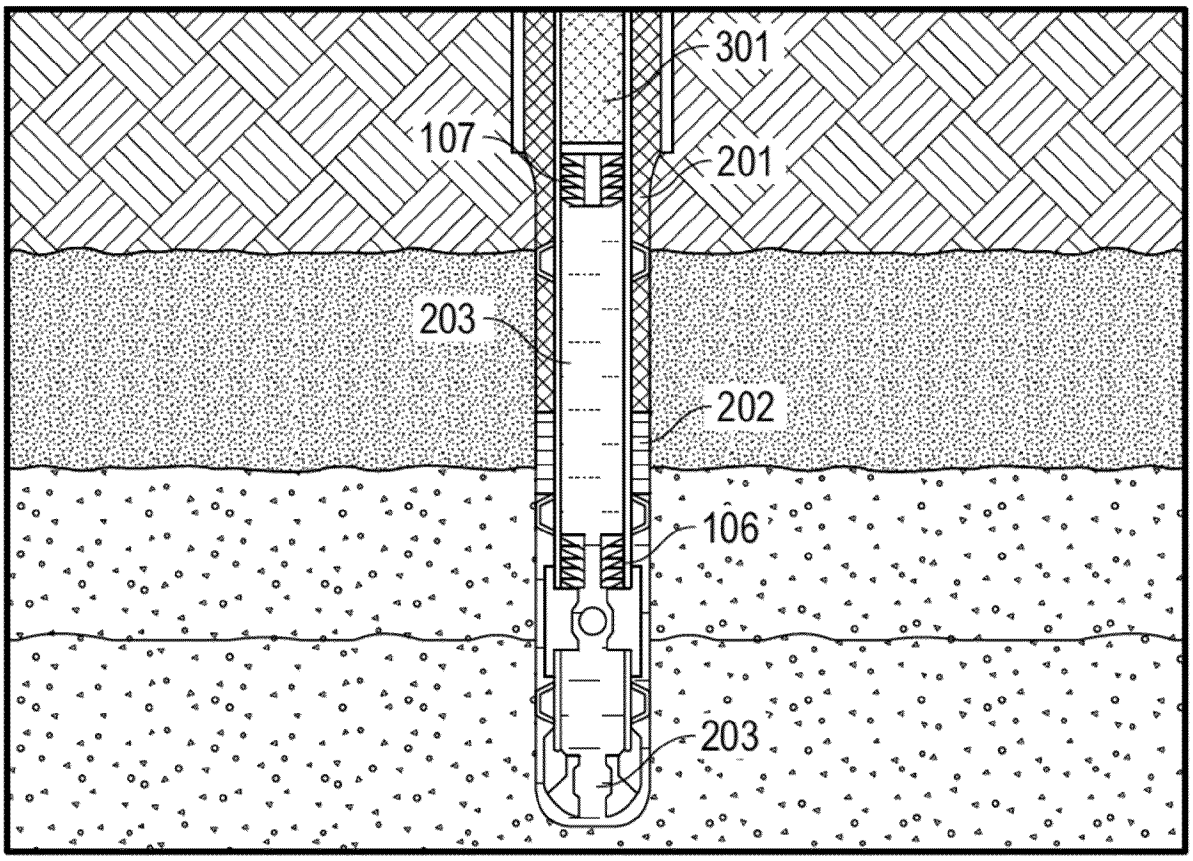
Фиг. 1

ПРЕДШЕСТВУЮЩИЙ УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ



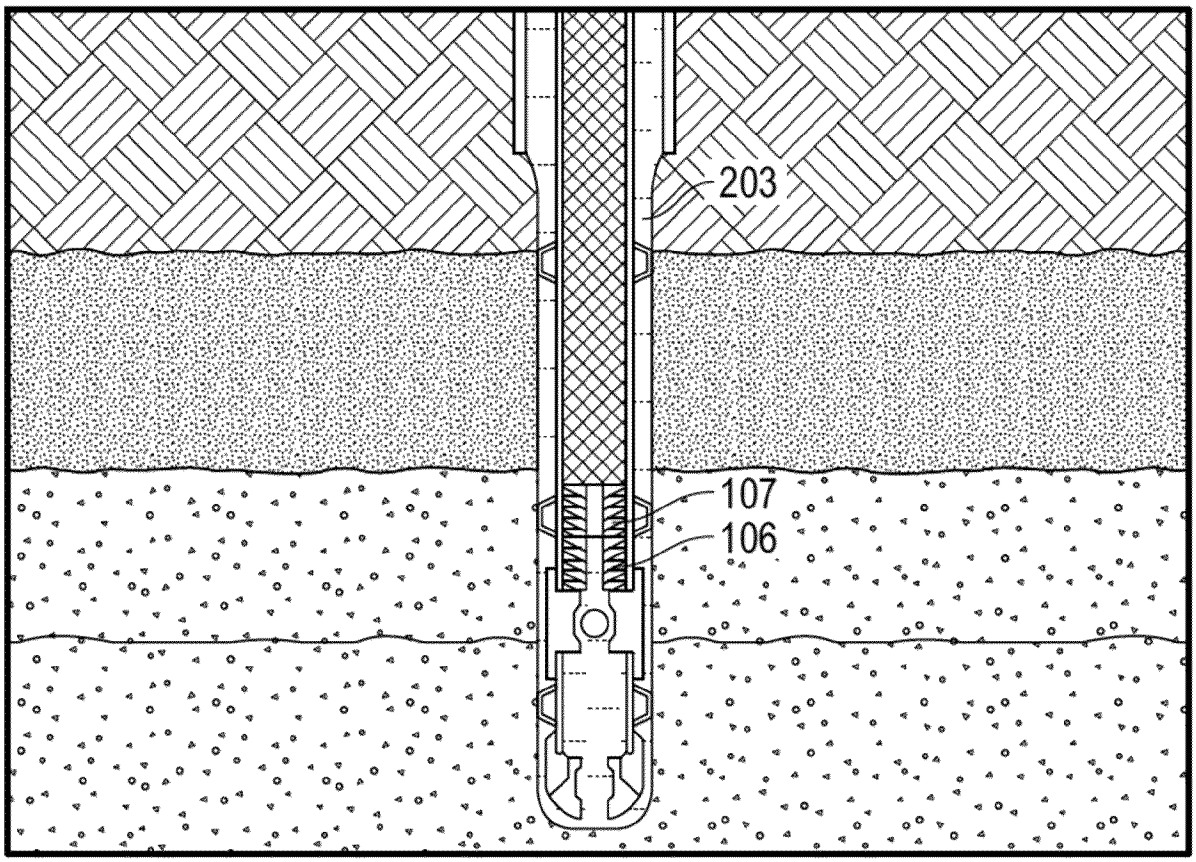
Фиг. 2

ПРЕДШЕСТВУЮЩИЙ УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ



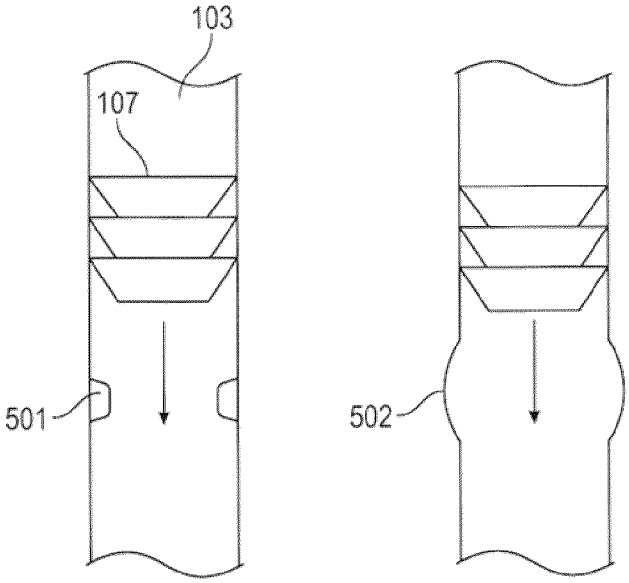
Фиг. 3

ПРЕДШЕСТВУЮЩИЙ УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ

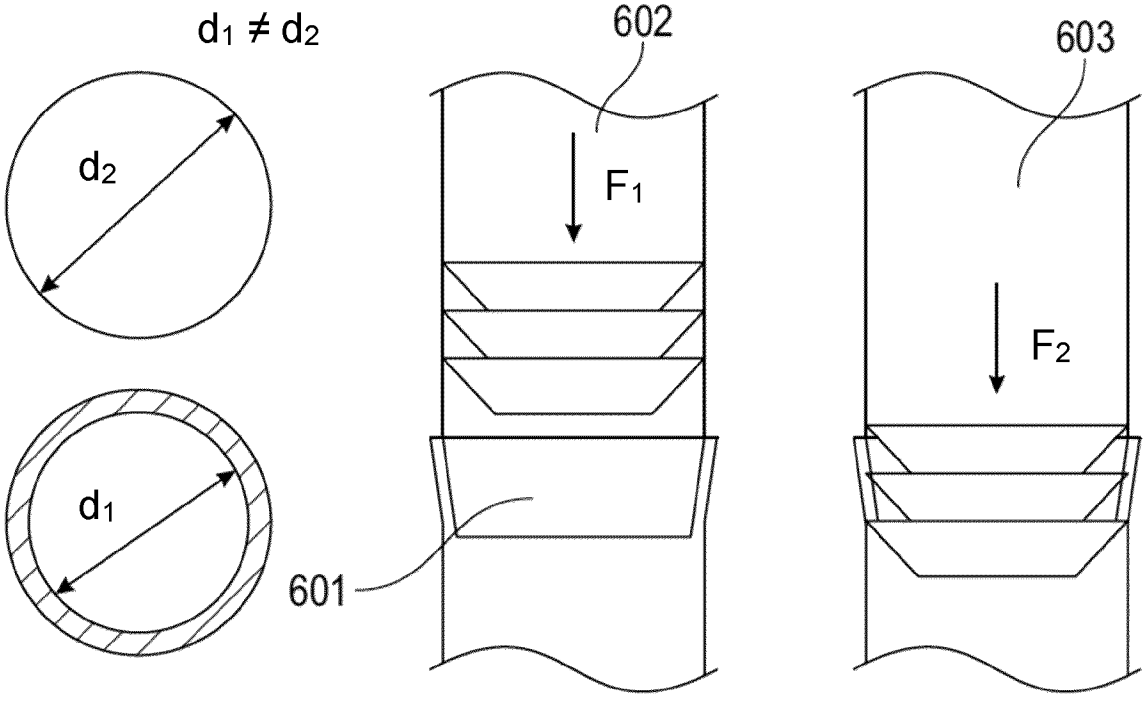


Фиг. 4

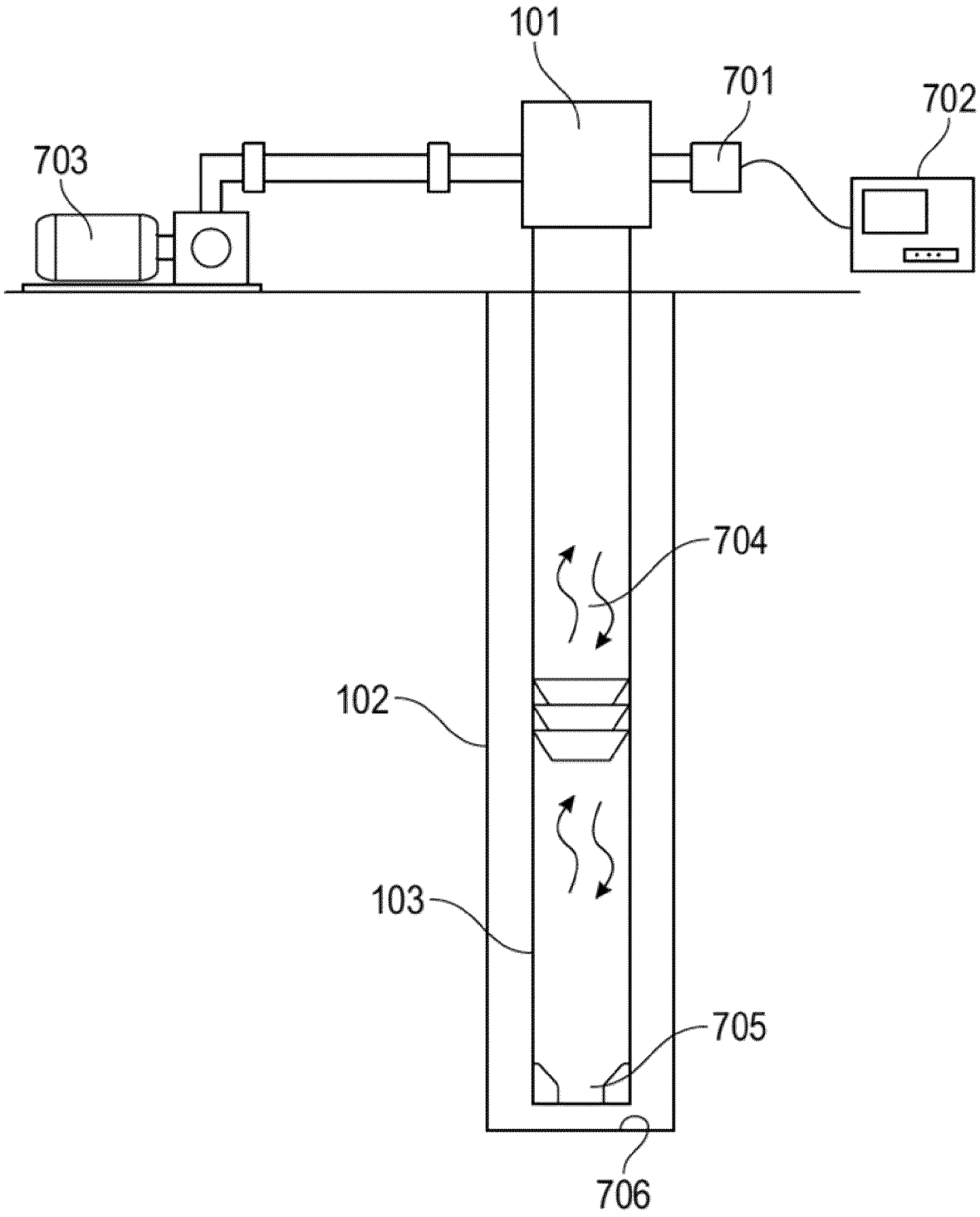
ПРЕДШЕСТВУЮЩИЙ УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ



Фиг. 5

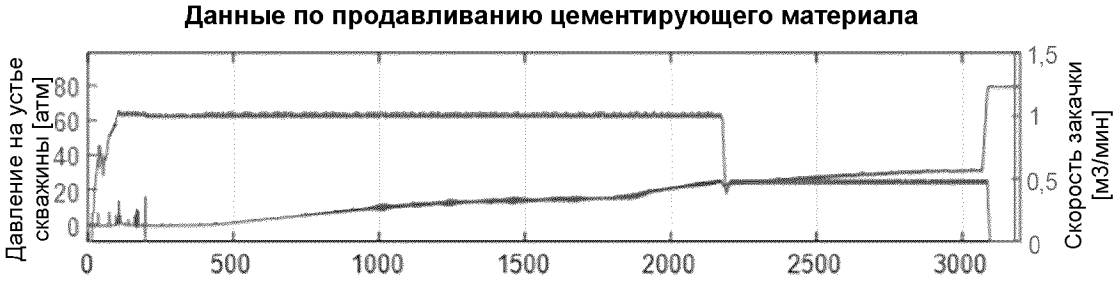


Фиг. 6

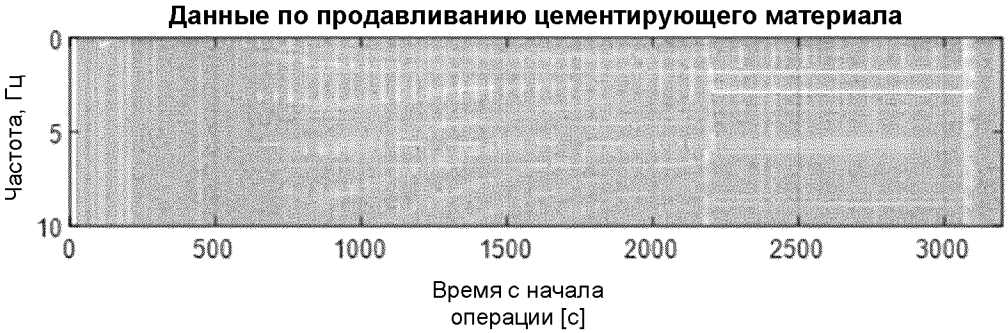


Фиг. 7

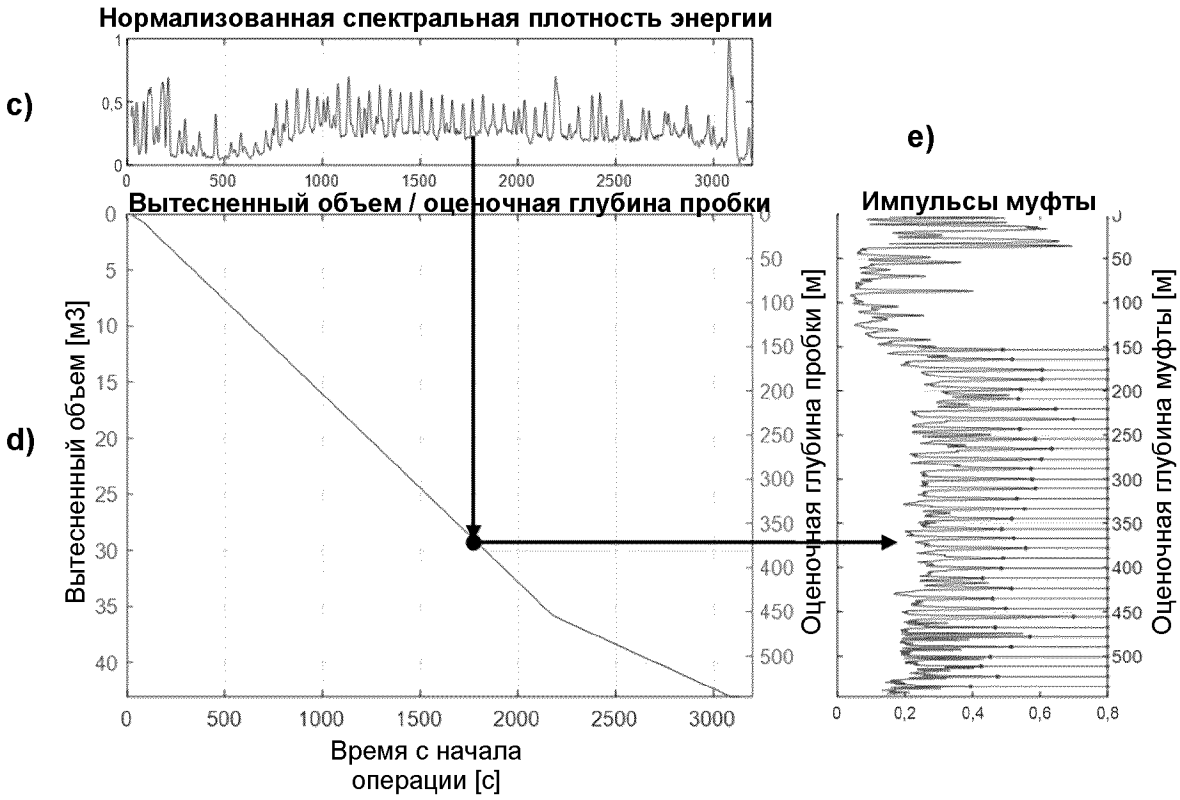
a)


Данные по продавливанию цементирующего материала
Давление на устье скважины [атм]
80
60
40
20
0
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
1,5
1
0,5
0
Скорость закачки [м3/мин]

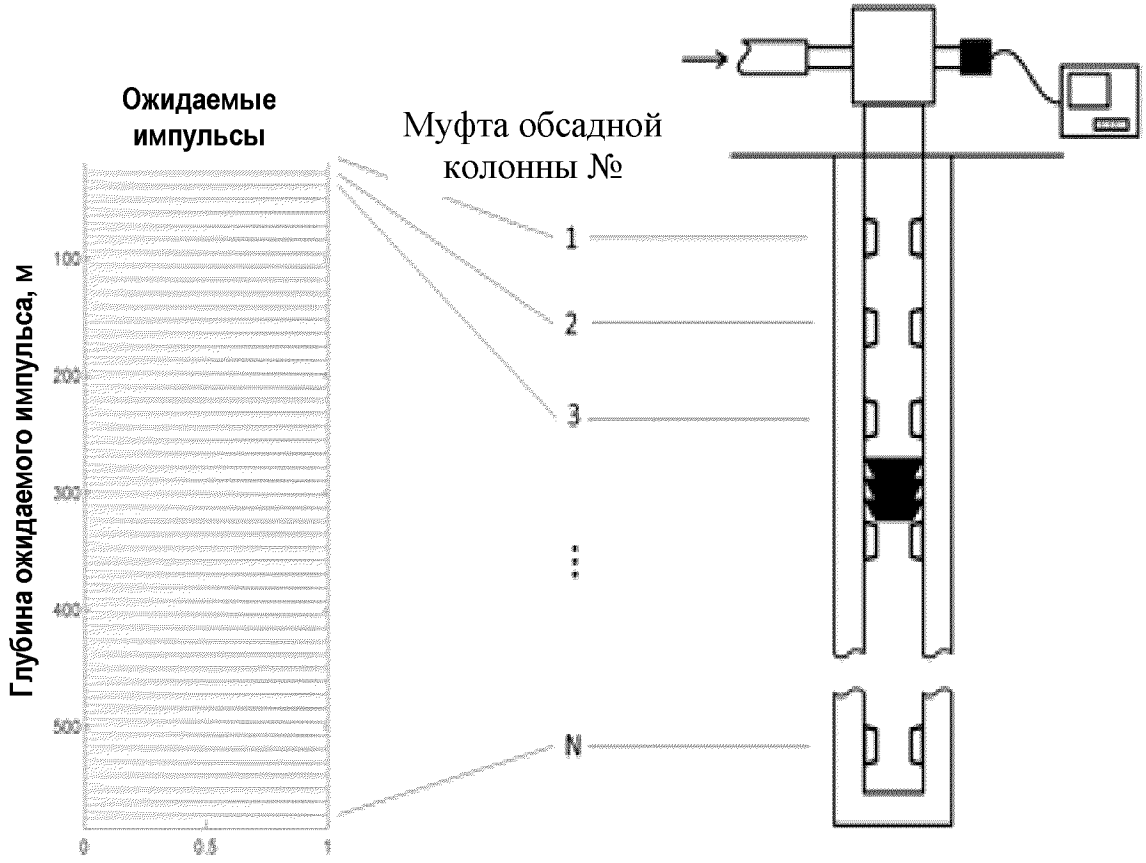
b)


Данные по продавливанию цементирующего материала
Частота, Гц
0
5
10
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
Время с начала операции [с]

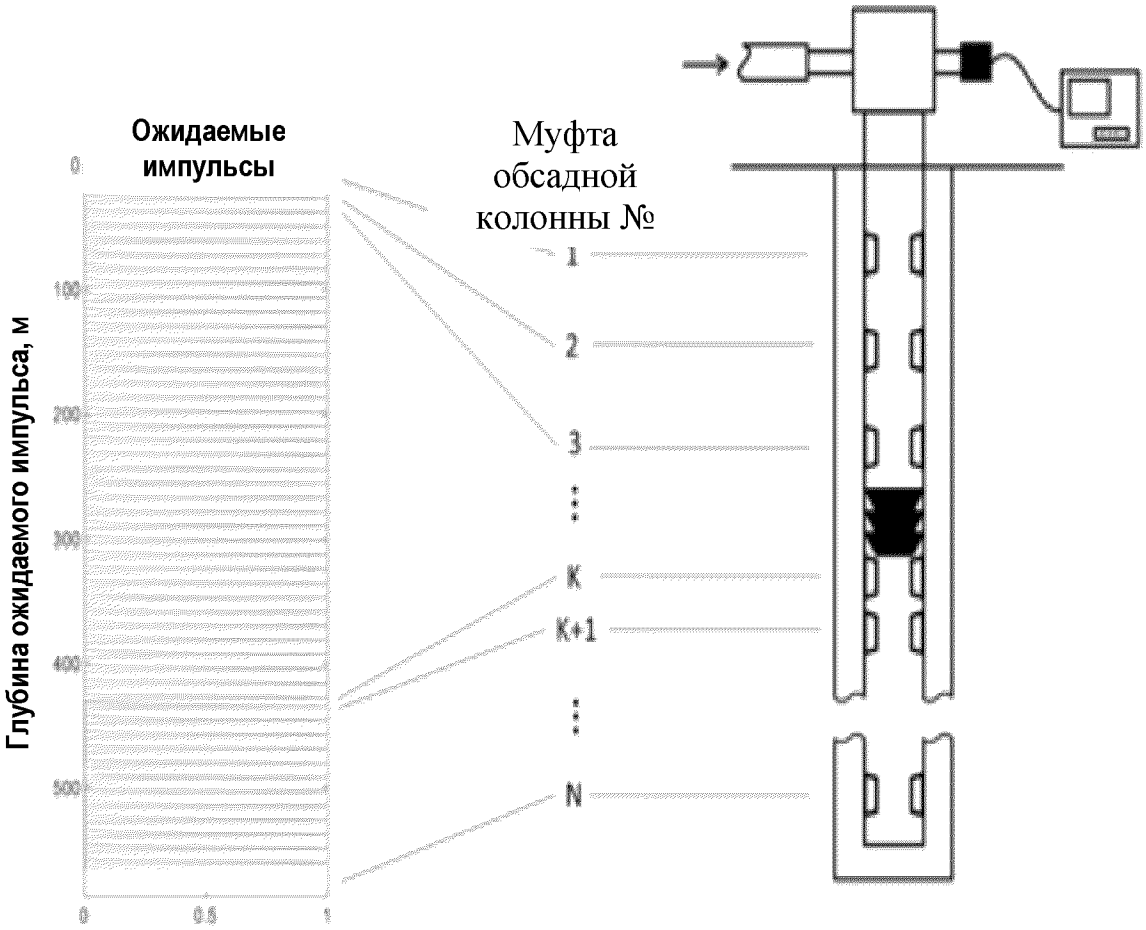
Фиг. 8(i)


c)
Нормализованная спектральная плотность энергии
d)
Вытесненный объем / оценочная глубина пробки
Вытесненный объем [м3]
Оценочная глубина пробки [м]
Время с начала операции [с]
e)
Импульсы муфты
Оценочная глубина муфты [м]

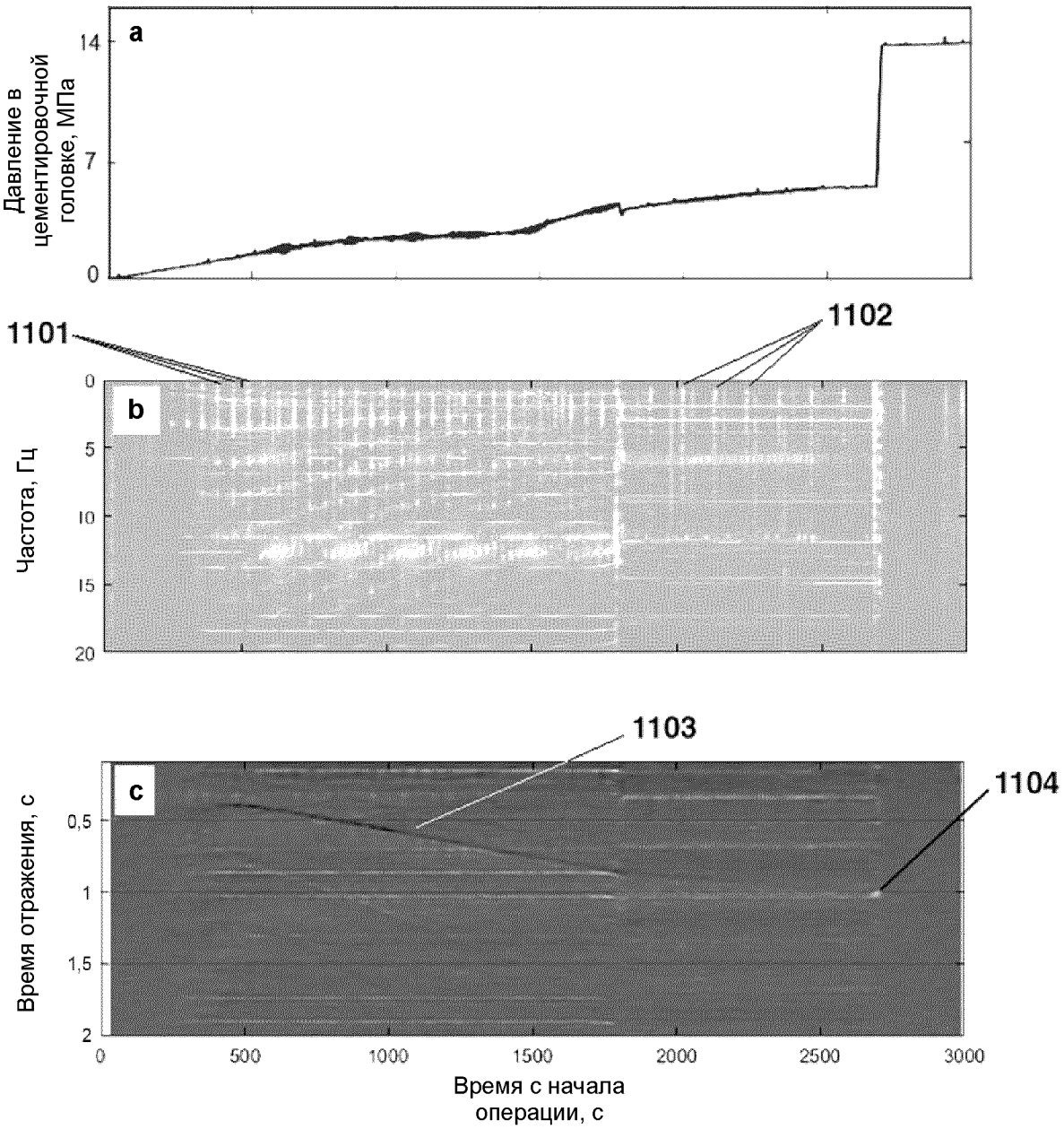
Фиг. 8(ii)


Ожидаемые импульсы
Муфта обсадной колонны №
Глубина ожидаемого импульса, м
100
200
300
400
500
0
0.5
1
1
2
3
N

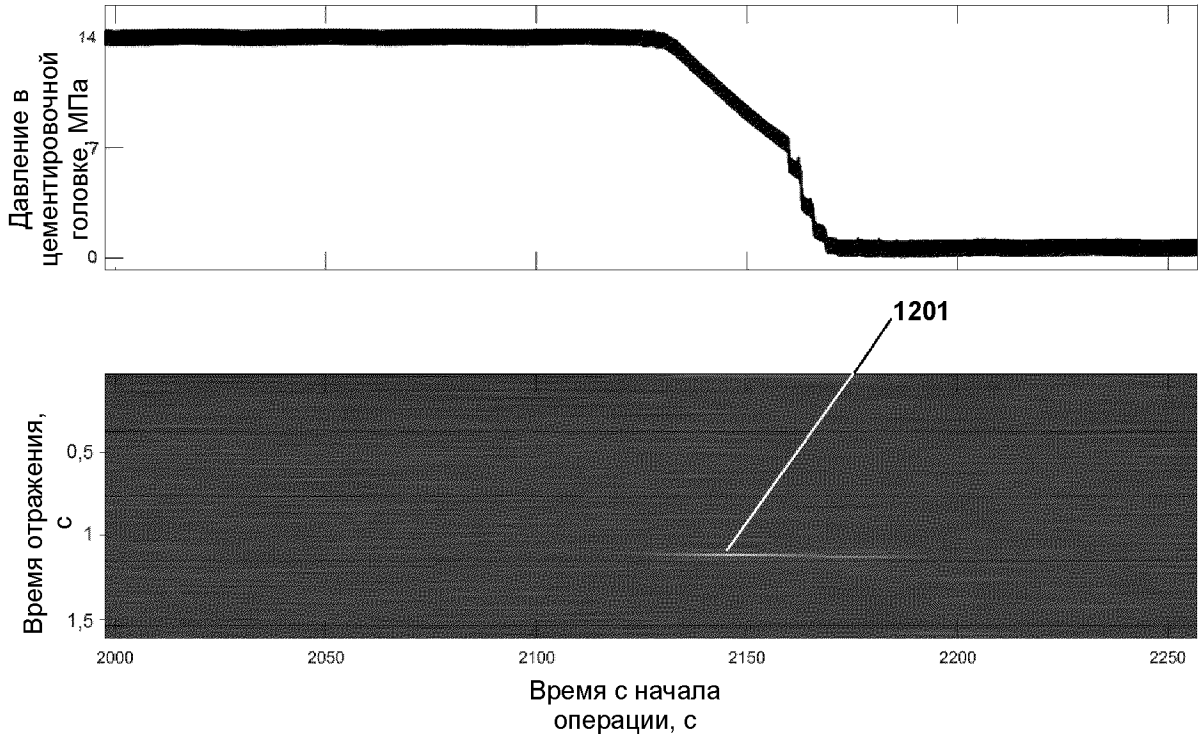
Фиг. 9


Ожидаемые импульсы
Глубина ожидаемого импульса, м
0
100
200
300
400
500
0
0.5
1
Муфта обсадной колонны №
1
2
3
K
K+1
N

Фиг. 10


a
Давление в цементировочной головке, МПа
14
7
0
1101
1102
b
Частота, Гц
0
5
10
15
20
1103
1104
c
Время отражения, с
0,5
1
1,5
2
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
Время с начала операции, с

Фиг. 11


Давление в цементировочной головке, МПа
14
7
0
1201
Время отражения, с
0,5
1
1,5
2000
2050
2100
2150
2200
2250
Время с начала операции, с

Фиг. 12