

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(21) **202391767** (13) **A1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки
2023.07.25

(51) Int. Cl. *E21B 47/04* (2012.01)
E21B 47/10 (2012.01)
E21B 47/107 (2012.01)
G01V 1/50 (2006.01)

(22) Дата подачи заявки
2020.12.14

**(54) СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ГРАНИЦ РАЗДЕЛА ТЕКУЧИХ СРЕД И
ОБНАРУЖЕНИЯ СХВАТЫВАНИЯ ЦЕМЕНТА В ПОДЗЕМНОМ СТВОЛЕ СКВАЖИНЫ**

(86) PCT/RU2020/000679

(72) Изобретатель:

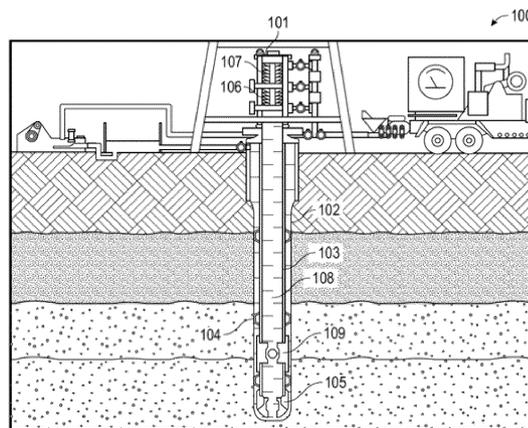
(87) WO 2022/131945 2022.06.23

Демидов Демид Валерьевич, Коркин
Роман Владимирович, Федоров
Андрей Владимирович, Кабанник
Артем Валерьевич (RU)

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

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

(57) Способы определения границ раздела текучих сред в обсаженном стволе скважины включают генерирование вибраций в обсадной колонне с формированием, тем самым, колебаний в текучих средах ствола скважины и обсадной колонне. Колебания обнаруживаются с помощью детектора вибрации. Колебания регистрируются с помощью системы сбора данных. Математическая обработка колебаний путем кепстрального анализа выполняется для определения глубины границ раздела между текучими средами в кольцевом пространстве. Способы также могут быть применены для определения времени начала схватывания и затвердевания цементного раствора. Способы могут выполняться в реальном времени.



202391767
A1

202391767
A1

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

2420-578485EA/072

СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ГРАНИЦ РАЗДЕЛА ТЕКУЧИХ СРЕД И ОБНАРУЖЕНИЯ СХВАТЫВАНИЯ ЦЕМЕНТА В ПОДЗЕМНОМ СТВОЛЕ СКВАЖИНЫ

ОБЛАСТЬ ТЕХНИКИ

[0001] Настоящее изобретение в целом относится к операциям цементирования. В частности, настоящее изобретение относится к применению вибраций и колебаний в трубе для определения положений границ раздела текучих сред в кольцевом пространстве между трубой и стенкой ствола скважины. Раскрытые способы также могут быть применены для определения момента схватывания цементного раствора.

УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ

[0002] При строительстве подземных скважин во время и после бурения в скважину обычно заводят трубу, такую как хвостовик или обсадная колонна, закрепляют ее с помощью цемента, закачиваемого в кольцевое пространство вокруг наружной стороны трубы. Цемент служит для поддержки трубы и обеспечивает изоляцию различных зон добычи флюидов, через которые проходит скважина. Эта последняя функция предотвращает перекрестное загрязнение флюидов из разных слоев. Например, цемент предотвращает попадание пластовых флюидов на уровень грунтовых вод и загрязнение питьевой воды или предотвращает попадание воды в скважину вместо нефти или газа. Кроме того, цементное кольцо помогает предотвратить коррозию трубы.

[0003] Процесс закачки цемента известен в отрасли как первичное цементирование. В большинстве операций первичного цементирования применяется способ закачки цемента с двумя пробками. На фиг. 1 показана типичная конфигурация скважины **100** для операции первичного цементирования. Цементировочная головка **101** находится на поверхности, а обсадная колонна **103** спускается в скважину **102**. По мере спуска обсадной колонны **103** в скважину **102** внутренняя часть обсадной колонны заполняется буровым раствором **108**. Обсадная колонна центрируется в скважине с помощью центраторов **104**, прикрепленных к внешней стороне обсадной колонны. Центраторы устанавливаются на критических участках обсадной колонны для предотвращения прихвата во время спуска обсадной колонны в скважину. Кроме того, они удерживают обсадную колонну в центре скважины, помогая обеспечить равномерное размещение цементного кольца в кольцевом пространстве между обсадной колонной и скважиной. Нижний конец обсадной колонны защищен направляющим башмаком **105** и муфтой **109** с обратным клапаном. Направляющие башмаки представляют собой конические устройства, обычно с пулевидным концом, которые направляют обсадную колонну к центру скважины, чтобы минимизировать попадание на неровные края или промывы во время установки. Направляющий башмак отличается от муфты с обратным клапаном тем, что в нем отсутствует обратный клапан. Обратный клапан в муфте с обратным клапаном может предотвратить обратный поток, или действие текучих сред, протекающих через U-

образную трубу из кольцевого пространства в обсадную колонну. Внутри цементировочной головки **101** находятся нижняя цементировочная пробка **106** и верхняя цементировочная пробка **107**. Цементировочные пробки, также известные как цементировочные скребковые пробки или скребковые пробки, представляют собой эластомерные устройства, которые обеспечивают физический барьер между различными текучими средами при их прокачке через внутреннюю часть обсадной колонны. Большинство цементировочных пробок изготавливаются из литого алюминиевого корпуса с формованными резиновыми ребрами, обеспечивающими устойчивое движение по насосно-компрессорной трубе.

[0004] Целями операции первичного цементирования являются удаление бурового раствора из внутренней части обсадной колонны и скважины, размещение цементного раствора в кольцевом пространстве и оставление внутренней части обсадной колонны заполненной вытесняющей жидкостью, такой как рассол или вода. Нижняя цементировочная пробка **106** отделяет цементный раствор от бурового раствора, а верхняя цементировочная пробка **107** отделяет цементный раствор от вытесняющей жидкости.

[0005] Цементные растворы и буровые растворы обычно химически несовместимы. Смешивание может привести к образованию загустевшей или гелеобразной массы на границе раздела, которую будет трудно удалить из ствола скважины, что может помешать созданию равномерного цементного кольца по всему кольцевому пространству. Поэтому, помимо применения скребковых пробок, инженеры применяют и химические средства для поддержания разделения текучих сред. Химические промывочные и разделительные жидкости могут закачиваться между цементным раствором и буровым раствором. Эти текучие среды имеют дополнительное преимущество - они очищают поверхности обсадной колонны и пласта, что способствует достижению надлежащего сцепления с цементом.

[0006] На фиг. 2 показаны химическая промывочная жидкость **201** и разделительная жидкость **202**, закачиваемые между буровым раствором **108** и нижней цементировочной пробкой **106**. Цементный раствор **203** следует за нижней цементировочной пробкой. Нижняя цементировочная пробка имеет мембрану, которая разрывается, когда она садится на дно обсадной колонны, позволяя цементному раствору пройти через нижнюю цементировочную пробку и попасть в кольцевое пространство (фиг. 3).

[0007] После закачки достаточного объема цементного раствора для заполнения кольцевой области между обсадной колонной и стенкой скважины верхняя цементировочная пробка **107** высвобождается, а за ней следует вытесняющая жидкость **301**. Верхняя цементировочная пробка **107** не имеет мембраны, поэтому при ее посадке гидравлическая связь между внутренней частью обсадной колонны и кольцевым пространством прерывается (фиг. 4). После операции цементирования инженеры ждут, пока цемент схватится и наберет прочность, что называется «ожиданием затвердения цемента» (WOC - англ.: waiting-on-cement). По истечении времени WOC можно

приступать к дальнейшим операциям, таким как дальнейшее бурение или перфорация обсадной колонны.

[0008] Традиционные цементировочные пробки закачиваются непосредственно с поверхности, поскольку они проходят только через одну трубу с непрерывным внутренним диаметром (ID - англ.: inside diameter). С другой стороны, хвостовики не начинаются на поверхности; вместо этого они спускаются вниз по скважине на бурильной колонне до глубины установки. Обычно хвостовики имеют гораздо больший внутренний диаметр, чем бурильная колонна; в результате этого с поверхности нельзя закачать одну цементировочную пробку. Поэтому вытеснение осуществляется двумя пробками. Одна пробка, известная как продавочная цементировочная пробка, находится в цементировочном оборудовании на поверхности. Вторая пробка крепится либо к нижней части узла инструмента для установки хвостовика, либо к верхней части узла инструмента для установки хвостовика. Вторая пробка называется скребковой пробкой хвостовика.

[0009] После закачки цемента в хвостовик и бурильную колонну, продавочная цементировочная пробка (выпадающий предмет) выпускается из цементировочного оборудования на поверхности. Когда продавочная цементировочная пробка достигает верхней части хвостовика, она защелкивается в скребковой пробке хвостовика. В этом случае и продавочная цементировочная пробка, и скребковая пробка хвостовика становятся единым разделителем между цементным раствором и вытесняющей жидкостью. Такое расположение может наблюдаться в скважинах с большим отходом от вертикали и при многоступенчатом цементировании.

[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», в Nelson EB and Guillot D (eds.): Well Cementing-2nd Edition, Houston, Schlumberger (2006) 343-458. Piot B and Cuvillier G: «Primary Cementing Techniques» в Nelson EB and Guillot D (eds.): Well Cementing-2nd Edition, Houston, Schlumberger (2006) 459-501. Trogus M: «Studies of Cement Wiper Plugs Suggest New Deepwater Standards», доклад SPE/IADC-173066-MS, представленный на конференции и выставке по бурению SPE/IADC, Лондон, Великобритания, 17-19 марта 2015 г.

[0011] Возможны отклонения от идеализированной операции цементирования, изображенной выше. К возможным причинам относятся шероховатость ствола скважины, приводящая к неточным расчетам объема вытеснения, колебания производительности насоса, различия между номинальной и фактической геометрией обсадной колонны, потеря циркуляции, деформация обсадной колонны и потеря текучей среды. Учитывая эти неопределенности, операторы и инженеры заинтересованы в обеспечении контроля в реальном времени положения цементировочных пробок, а также определения местоположения верхней границы цементного кольца (ТОС - англ.: top of the cement) в кольцевом пространстве.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ГРАФИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

[0012] На фиг. 1 показана типичная конфигурация скважины во время операции цементирования.

[0013] На фиг. 2 показана операция цементирования в процессе. Нижняя цементировочная пробка высвобождена, в результате чего цементный раствор отделяется от химических промывочных жидкостей, разделительных жидкостей и бурового раствора.

[0014] На фиг. 3 показана операция цементирования в процессе. Нижняя цементировочная пробка опустилась на муфту с обратным клапаном. Мембрана в нижней цементировочной пробке разрывается, позволяя цементному раствору попасть в кольцевое пространство между обсадной колонной и стенкой скважины.

[0015] На фиг. 4 показана завершенная операция цементирования. Цементный раствор заполняет кольцевое пространство, обе цементировочные пробки опустились на муфту с обратным клапаном, а внутренняя часть обсадной колонны заполнена вытесняющей жидкостью.

[0016] На фиг. 5 показана иллюстрация конфигурации скважины для применения раскрытых способов.

[0017] На фиг. 6 показана иллюстрация стадий гидратации цемента в сочетании с тем, как соответственно изменяется частота колебаний обсадной колонны.

[0018] На фиг. 7 показана схема испытательного устройства, применяемого для инициирования и анализа колебаний обсадной колонны с целью определения времени схватывания цемента.

[0019] На фиг. 8 показаны спектры частоты колебаний в зависимости от состояния цементного раствора в кольцевом пространстве.

[0020] На фиг. 9 показаны необработанные спектры колебаний и спектры, обработанные с помощью кепстрального анализа.

[0021] На фиг. 10 показана корреляция между кепстральным анализом и определением верхней границы цементного кольца (ТОС).

КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ СУЩНОСТИ ИЗОБРЕТЕНИЯ

[0022] В одном аспекте варианты осуществления относятся к способам определения местоположения границ раздела текучих сред в обсаженном стволе скважины. Обеспечивается обсаженный ствол скважины с образованием, тем самым, кольцевого пространства между обсадной колонной и скважиной. Более чем одна жидкость закачивается из нижней части кольцевого пространства в верхнюю часть кольцевого пространства с созданием, тем самым, границы раздела между двумя текучими средами. В трубе создаются вибрации с формированием, тем самым, колебаний в текучих средах и обсадной колонне. Колебания обнаруживаются с помощью детектора вибрации и анализируются с помощью системы сбора данных. Математическая обработка выполняется для определения глубины границ раздела между текучими средами в кольцевом пространстве.

[0023] В другом аспекте варианты осуществления относятся к способам определения времени схватывания цемента. Обеспечивается обсаженный ствол скважины

с образованием, тем самым, кольцевого пространства между обсадной колонной и скважиной. Более чем одна текучая среда закачивается из нижней части кольцевого пространства в верхнюю часть кольцевого пространства, при этом одна из текучих сред представляет собой цементный раствор. В трубе создаются вибрации с формированием, тем самым, колебаний в текучих средах и обсадной колонне. Колебания обнаруживаются с помощью детектора вибрации и анализируются с помощью системы сбора данных. Математическая обработка выполняется для определения момента схватывания цементного раствора.

ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ СУЩНОСТИ ИЗОБРЕТЕНИЯ

[0024] Вначале следует отметить, что при разработке любого такого фактического варианта осуществления осуществляют многочисленные варианты реализации - конкретные решения для достижения конкретных целей разработчика, таких как соответствие связанным с системой и деловой активностью ограничениям, которые будут варьироваться от одного варианта реализации к другому. Кроме того, следует понимать, что такие усилия по разработке могут быть сложными и длительными, но, тем не менее, будут обычным делом для специалиста в данной области техники, пользующегося преимуществом настоящего изобретения. Кроме того, композиция, применяемая/описанная в данном документе, также может содержать некоторые компоненты, отличные от указанных. В разделах «Краткое изложение сущности изобретения» и «Подробное описание сущности изобретения» каждое числовое значение следует рассматривать, как модифицированное термином «около» (кроме случаев, когда оно уже в явной форме модифицировано таким образом), а затем рассматривать, как не модифицированное таким образом, если из контекста не следует иное. Также, при прочтении разделов «Краткое изложение изобретения» и «Подробное описание сущности изобретения» следует понимать, что под диапазоном концентраций, перечисленным или описанным как применимый, подходящий и т. п., подразумевается любая и каждая концентрация в пределах указанного диапазона, включая крайние значения. Например, «диапазон от 1 до 10» следует воспринимать как описывающий все без исключения возможные числа в континууме от около 1 до около 10. Таким образом, даже если определенные значения в пределах диапазона, или ни одно из значений в пределах диапазона, в явном виде указаны или обозначены лишь несколькими конкретными значениями, следует понимать, что авторы изобретения подразумевают и понимают под этим, что любые и все значения в пределах диапазона следует рассматривать, как указанные, и что авторы настоящего изобретения имеют в виду весь диапазон и значения в пределах этого диапазона.

[0025] Настоящее изобретение относится к определению положения границ раздела текучих сред в кольцевом пространстве обсаженного ствола скважины. Настоящее изобретение также относится к определению положения верхней границы цементного кольца (ТОС) в кольцевом пространстве, и когда цементный раствор схватился и начал затвердевать.

[0026] В одном аспекте варианты осуществления относятся к способам определения местоположения границ раздела текучих сред в обсаженном стволе скважины. Обеспечивается обсаженный ствол скважины с образованием, тем самым, кольцевого пространства между обсадной колонной и скважиной. Более чем одна жидкость закачивается из нижней части кольцевого пространства в верхнюю часть кольцевого пространства с созданием, тем самым, границы раздела между двумя текучими средами. В трубе создаются вибрации с формированием, тем самым, колебаний в текучих средах и обсадной колонне. Колебания обнаруживаются с помощью детектора вибрации и анализируются с помощью системы сбора данных. Математическая обработка выполняется для определения глубины одной или более границ раздела между текучими средами в кольцевом пространстве. Способы и измерения, раскрытые в настоящем документе, могут быть выполнены в режиме реального времени во время операции цементирования.

[0027] В другом аспекте варианты осуществления относятся к способам определения времени схватывания цемента. Обеспечивается обсаженный ствол скважины с образованием, тем самым, кольцевого пространства между обсадной колонной и скважиной. Более чем одна текучая среда закачивается из нижней части кольцевого пространства в верхнюю часть кольцевого пространства, при этом одна из текучих сред представляет собой цементный раствор. В трубе создаются вибрации с формированием, тем самым, колебаний в текучих средах и обсадной колонне. Колебания обнаруживаются с помощью детектора вибрации и анализируются с помощью системы сбора данных. Математическая обработка выполняется для определения момента схватывания цементного раствора. Способы и измерения, раскрытые в настоящем документе, могут быть выполнены в режиме реального времени во время операции цементирования.

[0028] Определение ТОС с помощью отражения импульсов давления упоминается в следующей публикации. Stewart N and Graham J: «Nonintrusive Determination of Top of Cement and Wellbore Blockage Depth Using Pressure Wave Analysis, Society of Petroleum Engineers», доклад SPE-191320-MS (2018). Способ основан на искусственной генерации импульсов давления в кольцевом пространстве обсаженной скважины и обнаружении их отражений с помощью системы регистрации данных. Устройство регистрации данных, подключенное к скважине в месте, близком к генератору импульсов, регистрирует изменения давления, вызванные волной давления, отражающейся от значительных геометрических изменений в скважине, в частности, от верхней части схватившегося цемента.

[0029] В Lorentzen RJ et al.: «Underbalanced and Low-head Drilling Operations: Real Time Interpretation of Measured Data and Operational Support, Society of Petroleum Engineers», доклад SPE-71387-MS (2001), описан контроль качества после цементирования с помощью зарегистрированных данных пульсации верхней границы цементного кольца (TCP). В этом способе небольшие гидравлические импульсы давления (обычно 100 фунтов/кв. дюйм) многократно подаются с поверхности в кольцевое пространство

обсадной колонны, начиная сразу после закачки цемента до окончания времени перехода цемента. Объемы воды, закачанной в кольцевое пространство и возвращенной обратно во время ТСП, отслеживаются и преобразуются в запись вытеснения верхней границы цементного кольца (TCDR). Затем эта запись анализируется для определения объема потерь жидкости, начального/конечного положения верхней границы цементного кольца и выявления таких проблем, как большие потери жидкости, образование перемычки и наличие высокотемпературных зон.

[0030] Способ и система для определения местоположения скважинных объектов, отражающих гидравлический сигнал, раскрыты в следующей патентной заявке. Kabannik A: «Method and System for Locating Downhole Objects Which Reflect a Hydraulic Signal», заявка № WO 2018/004369 (2018). Мониторинг скважины основан на кепстральном анализе данных о давлении, зарегистрированных на устье скважины. Он предназначен для определения местонахождения скважинных объектов, отражающих гидравлический сигнал. Гидравлический сигнал регистрируется датчиком давления, затем данные о давлении обрабатываются для получения их свойств, таких как время отражения трубных волн. Одним (но не единственным) способом получения такой информации является кепстральный анализ. Кепстральный анализ широко применяется в различных приложениях, например, для мониторинга операций гидроразрыва пласта. Кепстрограмма позволяет обнаружить объекты, отражающие гидравлический сигнал. В данном способе для операций гидроразрыва пласта применяются источники гидравлического сигнала, включая эффект гидроудара, шум от поверхностных или погружных насосов и события перфорации.

[0031] В патенте США 9546548 раскрыты устройство и способ применения для анализа цементного кольца на основе распространения акустических волн. Оно состоит из устройства для обнаружения акустических волн, содержащего оптоволоконный кабель, протянутый вниз в скважину, оптический источник и систему сбора данных. Акустический источник создает волну сжатия в обсадной колонне. Давление в кольцевом пространстве определяется по мере схватывания цементного раствора, и это давление сравнивается с максимальным пластовым давлением, что позволяет определить, схватился ли цемент до прочности, достаточной для поддержания эффективного уплотнения между пластом и обсадной колонной в кольцевом пространстве.

[0032] В патенте США 10738590 описаны методы, при которых во время закачки цементного раствора определяется положение верхней границы цементного раствора в кольцевом пространстве, и рост определенного положения верхней границы цементного раствора в кольцевом пространстве регистрируется в зависимости времени. Запись анализируется для оценки работы по цементированию. Например, анализ может показать проблему, которая решается путем корректировки плана цементирования для будущей операции цементирования, и анализ может показать необходимость ремонта места схватившегося цемента путем перфорации обсадной колонны скважины в месте, подлежащем ремонту, и закачки цементного раствора вниз по обсадной колонне

скважины для заполнения места, подлежащего ремонту.

[0033] Раскрытый способ включает создание вибраций в обсадной колонне скважины во время цементирования скважины и применение акселерометра для обнаружения вибраций. Вибрации могут генерироваться цементировочными насосами или буровыми насосами при закачке жидкости в ствол скважины или с помощью некоторых специальных вибраторов, установленных на скважине, включая молоты или пьезоэлектрические преобразователи. Сигнал акселерометра обрабатывается для определения частот колебаний обсадной колонны во время операции цементирования. Затем может быть применена математическая обработка для определения положения верхней границы цементного кольца (ТОС), а также для подтверждения схватывания цемента.

[0034] В одном варианте осуществления способа анализ вибраций обсадной колонны применяется для определения состояния цемента и подтверждения его схватывания. В раскрытом способе применяется узел, содержащий скважину, заполненную жидкостью обсадную колонну, спускаемую в скважину, детектор вибрации (акселерометр), установленный на обсадной колонне на поверхности, систему сбора данных для регистрации данных с детектора. Акселерометр может иметь один или более компонентов и работать в диапазоне частот от 1 Гц до 5,12 кГц.

[0035] В раскрытом способе применяется узел (фиг. 5А-5С), содержащий устье **101** скважины, скважину **102**, обсадную колонну **103**, спущенную в скважину, генератор **501** вибрации, установленный на устье скважины, детектор **502** вибрации и систему **503** сбора данных. На фиг. 5А цементировочная пробка **505** движется по внутренней части обсадной колонны, а разделительная жидкость **108** вытесняется в кольцевое пространство цементным раствором **203**. Буровой раствор и цементный раствор разделены границей **504** раздела. В определенный момент времени и разделительная жидкость, и цементный раствор имеют высоту (h_{spacer} и h_{cem} , соответственно) в кольцевом пространстве. Генератор вибрации формирует колебания **506** в кольцевом пространстве и вдоль обсадной колонны. По мере продвижения границы раздела текучих сред к верхней границе кольцевого пространства колебания изменяются (фиг. 5В). Наконец, после посадки цементировочной пробки (фиг. 5С) колебания стабилизируются. Позже, когда цементный раствор начинает схватываться, характер колебаний снова меняется.

[0036] В процессе схватывания цемента возникают вибрации обсадной колонны, которые регистрируются детектором вибрации (например, акселерометром). Вибрации обсадной колонны могут быть вызваны с помощью любого вибратора, физически соединенного с обсадной колонной, например, насосов или пьезоэлектрического генератора, или путем ручного удара молотом по обсадной колонне. Инициирование вибрации может осуществляться непрерывно или периодически. Сигнал от акселерометра может быть зарегистрирован системой сбора данных с компьютером и затем математически обработан для получения спектров частоты колебаний. Заключение о состоянии цемента делается на основе набора спектров, полученных в течение периода,

который ожидается для схватывания цемента. Во время схватывания и затвердевания цемент переходит из формы жидкого раствора в твердую форму; следовательно, этот переход влияет на колебания обсадной колонны. Когда цемент находится в виде раствора, колебания обсадной колонны имеют точные частоты колебаний, но по мере загустевания цемента эти частоты смещаются и затем выходят на плато, когда цемент окончательно схватывается. Момент, когда сдвиг частот достигает плато, свидетельствует о том, что цемент схватился.

[0037] Портландцемент подвергается процессу гидратации при добавлении в воду для образования раствора. Процесс гидратации можно разделить на четыре основных периода: преиндукция, индукция, ускорение и замедление (фиг. 6). Период преиндукции возникает, когда сухой цемент впервые вводится в воду. Происходит сильная гидратация с одновременным выделением тепла. После преиндукции гидратации наступает период гидратации в состоянии покоя (период индукции). В течение индукционного периода раствор находится в жидкой форме и может перекачиваться. В конце концов скорость гидратации увеличивается (период ускорения), вязкость цементного раствора возрастает и начинается схватывание. Этот период также известен как переходный период. Наконец, скорость гидратации снижается (период замедления), цементный раствор твердеет и набирает прочность.

[0038] На фиг. 6 также показано, как схватывание цемента может повлиять на колебания обсадной колонны, регистрируемые детектором вибрации. Спектры колебаний могут реагировать изменением частоты, в конце концов заканчивающимся плато. Плато может быть свидетельством того, что цемент схватился.

[0039] В другом варианте осуществления измерение колебания обсадной колонны применяется для определения местоположения границ раздела текучих сред в кольцевом пространстве. Оно применяется по меньшей мере для двух последовательно закачиваемых в кольцевое пространство жидкостей, которые могут иметь различные свойства, такие как плотность, скорость звука или вязкость. Практический интерес способа заключается в определении положения ТОС в кольцевом пространстве во время операции цементирования скважины, как показано на фиг. 5. Обычно разделительная жидкость закачивается впереди цементного раствора и имеет меньшую плотность, чем цемент, поэтому на границе их раздела наблюдается различие свойств жидкостей. Положение границы раздела этих жидкостей (h_{cem} и h_{spacer}) при вытеснении перемещается вверх и может быть соотнесено с режимом колебаний обсадной колонны. В процессе закачки высота каждой жидкости в кольцевом пространстве изменяется, и граница раздела текучих сред служит «критической точкой» обсадной колонны (из-за более высокой плотности цемента) и отражателем волн колебаний, распространяющихся по обсадной колонне. Эта волна может быть инициирована с помощью вибратора, дополнительно установленного на поверхностной части обсадной колонны, или за счет собственных колебаний обсадной колонны, генерируемых работающими цементировочными или буровыми насосами.

[0040] Глубина до границы раздела текучих сред рассчитывается по времени, необходимому для прохождения волны от поверхности, где установлен детектор колебаний, до границы раздела текучих сред (точки отражения) и обратно.

[0041] В одном варианте осуществления детектор представляет собой акселерометр, установленный на поверхностной части обсадной колонны и применяемый для сбора данных о колебаниях обсадной колонны. Способ включает размещение по меньшей мере двух жидкостей в кольцевом пространстве и их закачку вверх с помощью обычного процесса вытеснения при операциях цементирования скважины - закачку вытесняющей жидкости через внутреннее пространство обсадной колонны. Текучие среды в кольцевом пространстве имеют различные свойства, например, плотность, вязкость или скорость звука. Этими текучими средами могут быть рассол, вода, разделительная жидкость, химическая промывочная жидкость, буровой раствор или цементный раствор. Акселерометр с системой сбора данных устанавливается на поверхностной части обсадной колонны, и колебания обсадной колонны регистрируются во время операции цементирования. Колебания могут быть вызваны рабочими насосами или дополнительными вибраторами, такими как молоты или пьезоэлектрические устройства, установленные на обсадной колонне. Затем к данным, полученным с помощью акселерометра, отражениям волн колебаний и времени отражения от границы раздела текучих сред, применяется математическая обработка. Время отражения получается путем кепстрального анализа зарегистрированных данных. Как описано в патентной заявке WO 2018/004369, кепстр - это результат взятия обратного преобразования Фурье (IFT - англ.: inverse Fourier transform) логарифма оцененного спектра сигнала. Расстояние (H) от детектора до точки отражения рассчитывается по следующему уравнению.

$$H = \frac{1}{2}V \cdot \tau,$$

Где τ - время отражения, а V - скорость распространения волны. V может быть оценена на основе скорости, полученной в результате измерений при цементировании предыдущего участка или соседней скважины с аналогичными характеристиками, оценена теоретически или измерена любым другим доступным способом.

[0042] В другом варианте осуществления определение расстояния выполняется в реальном времени в процессе вытеснения цемента.

Примеры

[0043] Следующие примеры служат для дополнительной иллюстрации изобретения.

Пример 1

[0044] Данный пример иллюстрирует применение раскрытого способа для подтверждения схватывания цемента при цементировании подземной скважины. Испытательная установка (фиг. 7) представляла собой стальную трубу **701** длиной 4,5 м и наружным диаметром 60 мм, которая была вставлена в пластиковую трубу **702** длиной 4 м

и внутренним диаметром 100 мм. Стальная труба была подвешена на подвеске **703** и оснащена двумя центраторами **704** для обеспечения concentричности внутренней и наружной труб. Пластиковая труба представляла ствол скважины, а стальная труба представляла обсадную колонну, спущенную в скважину. Акселерометр **705** был установлен на верхней стороне стальной трубы для измерения ее колебаний. Кольцевое пространство установки заливали быстросхватывающимся раствором **706** на 3/4 ее объема, а затем колебания стальной трубы периодически вызывали с помощью молота. Раствор состоял из 1,5 кг сухого гипса и 10 мл молочной кислоты на литр чистой воды. Молочная кислота присутствовала в качестве замедлителя. Компьютер **707** анализировал колебания.

[0045] Спектры частоты колебаний собирали с помощью акселерометра и системы сбора данных до полного схватывания цемента. Параллельно наблюдали время загустевания и схватывания цемента путем анализа его консистенции в стакане. Спектры колебаний представлены на фиг. 8. В начале эксперимента на спектрах четко видны несколько частот колебаний (гармоник), например, при 140, 210, 280 и 350 Гц. Спектры существенно не изменялись, пока цемент оставался в виде жидкого раствора. Когда началось загустевание цементного раствора, частоты поднялись до ряда более высоких значений и, наконец, достигли плато, когда произошло схватывание цемента (180, 250, 320 и 390 Гц соответственно). Таким образом, момент, когда частоты колебаний достигают плато, указывает на момент схватывания цемента и начала развития прочности на сжатие.

Пример 2

[0046] Этот пример иллюстрирует применение измерений колебаний обсадной колонны для определения положения верхней границы цементного кольца (ТОС) в кольцевом пространстве во время обычной операции цементирования скважины. Обсадная колонна с наружным диаметром 324 мм была спущена в подземную скважину на глубину 300 м и затем зацементирована. Акселерометр был установлен на поверхностной части обсадной колонны ниже цементировочной головки с помощью магнита. Колебания обсадной колонны, вызванные закачкой жидкости, регистрировали с частотой 5,12 кГц на этапе вытеснения цемента и затем анализировали в соответствии с положением ТОС в кольцевом пространстве. Анализ данных представлял синхронизацию по времени данных акселерометра и данных о цементировании, применение кратковременного преобразования Фурье (STFT - англ.: short-time Fourier transform) к данным акселерометра с последующей кепстральной обработкой. На фиг. 9 показаны спектры STFT в конце этапа вытеснения цемента. На спектре четко видна схема в виде сдвига частоты (со многими гармониками) в область высоких значений по мере вытеснения цемента. Однако корреляция сдвига с положением верхней границы цементного кольца вряд ли может быть выполнена из-за сложности схемы и вклада гармоник колебаний.

[0047] В этом случае оказалось полезным применение кепстральной обработки. На

кепстральной диаграмме в нижней части фиг. 10 схема преобразуется в линию по значению времени отражения. Как видно, время отражения смещается в более низкий диапазон значений по мере продолжения операции по вытеснению цемента. Эта линия объясняется отражением от границы раздела между цементным раствором и закачиваемой вперед разделительной жидкостью, которые имеют значительное различие по плотности (1,80 и 1,02 г/см³, соответственно). Затем положение верхней границы цементного кольца было соотнесено со временем отражения следующим образом:

$$ТОС = \frac{1}{2} V \cdot \tau,$$

где $V=1170$ [м/с] - скорость распространения волны колебаний, а τ [с] - время ее отражения (линия на кепстральной диаграмме). Подтверждение того, что линия отражения соответствует ТОС, проводилось путем сопоставления со скоростью закачивания и геометрией скважины (т. е. объемным методом), а также прямым визуальным наблюдением. Результат был построен в виде кепстральной диаграммы (фиг. 10). Очевидно, что график соответствует линии времени отражения.

[0048] Хотя выше подробно были описаны только несколько иллюстративных вариантов осуществления, специалистам в данной области техники будет очевидно, что в иллюстративных вариантах осуществления возможны многие модификации без существенного отступления от сути настоящего изобретения. Соответственно, все такие модификации предназначены для включения в объем настоящего изобретения, который определен в следующей формуле изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ определения местоположения границ раздела текучих сред в обсаженном стволе скважины, включающий:

обеспечение обсаженного ствола скважины с образованием, тем самым, кольцевого пространства между обсадной колонной и скважиной;

закачивание более чем одной текучей среды из нижней части кольцевого пространства в верхнюю часть кольцевого пространства с созданием границы раздела между двумя текучими средами;

генерирование в обсадной колонне вибраций с формированием, тем самым, колебаний в текучих средах и обсадной колонне;

обнаружение колебаний с помощью детектора вибрации;

анализ колебаний с помощью системы сбора данных; и

выполнение математической обработки для определения глубины границ раздела между текучими средами в кольцевом пространстве.

2. Способ по п. 1, в котором генератор вибрации включает насос, молот, пьезоэлектрический преобразователь или их комбинацию.

3. Способ по п. 1, в котором детектор вибрации представляет собой акселерометр.

4. Способ по п. 3, в котором акселерометр работает в диапазоне частот от 1 Гц до 5,12 кГц.

5. Способ по п. 3, в котором акселерометр содержит один или более компонентов.

6. Способ по п. 1, в котором граница раздела образована между двумя текучими средами, имеющими разницу в плотности, скорости звука или вязкости, или их комбинации.

7. Способ по п. 1, в котором генерирование вибраций осуществляют непрерывно или периодически.

8. Способ по п. 1, в котором текучие среды включают рассол, воду, разделительную жидкость, химическую промывочную жидкость, буровой раствор или цементный раствор.

9. Способ по п. 1, в котором математическая обработка включает применение данных акселерометра, отражений волн колебаний и времен отражения от одной или более границ раздела текучих сред.

10. Способ по п. 9, в котором времена отражения получают посредством кепстрального анализа зарегистрированных данных, где кепстр является результатом обратного преобразования Фурье логарифма оцененного спектра сигнала.

11. Способ определения времени схватывания цемента, включающий:

обеспечение обсаженного ствола скважины с образованием, тем самым, кольцевого пространства между обсадной колонной и скважиной;

закачивание более чем одной текучей среды с границей раздела между двумя текучими средами из нижней части кольцевого пространства в верхнюю часть кольцевого пространства, при этом одна из текучих сред представляет собой цементный раствор;

генерирование в трубе вибраций с формированием, тем самым, колебаний текучих сред и трубы;

обнаружение колебаний с помощью детектора вибрации, содержащего акселерометр;

анализ колебаний с помощью системы сбора данных; и

выполнение математической обработки для определения момента схватывания цементного раствора.

12. Способ по п. 11, в котором генератор вибрации включает насос, молот, пьезоэлектрический преобразователь или их комбинацию.

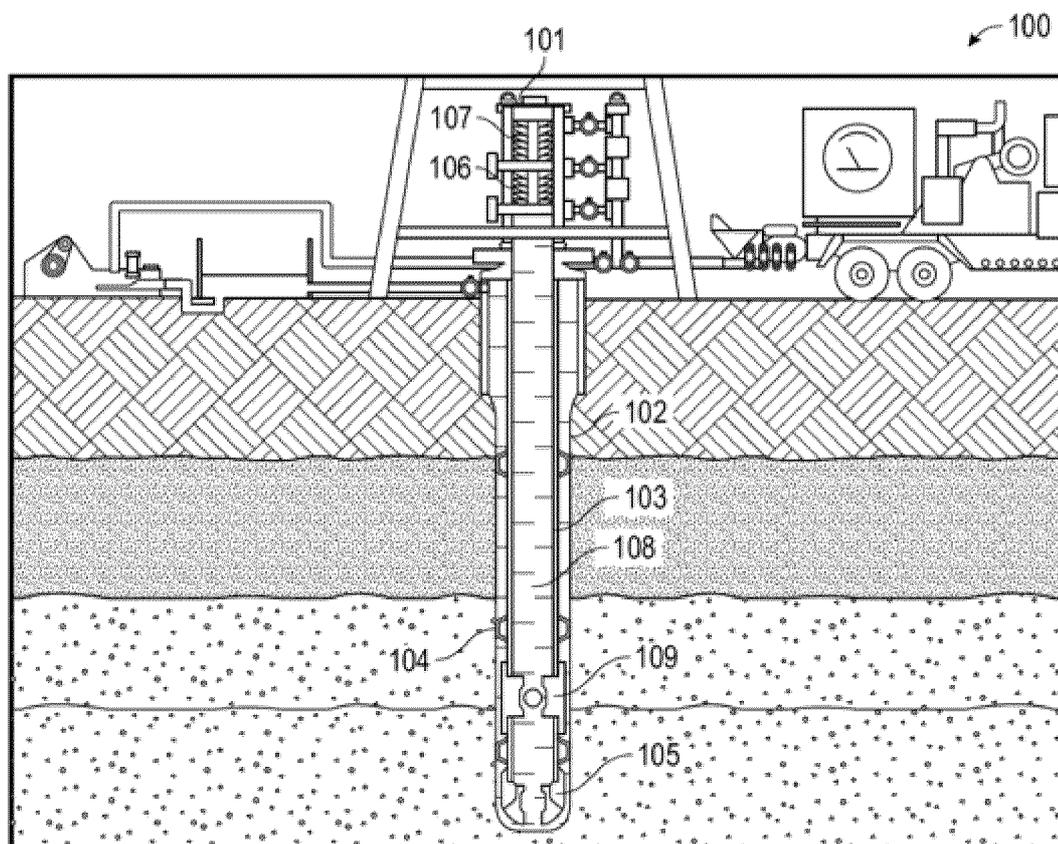
13. Способ по п. 11, в котором генерирование вибраций осуществляют непрерывно или периодически.

14. Способ по п. 11, в котором одна или более текучих сред включают рассол, воду, разделительную жидкость, химическую промывочную жидкость, буровой раствор или цементный раствор, или их комбинацию.

15. Способ по п. 11, в котором математическая обработка включает применение данных акселерометра и получение спектров частоты.

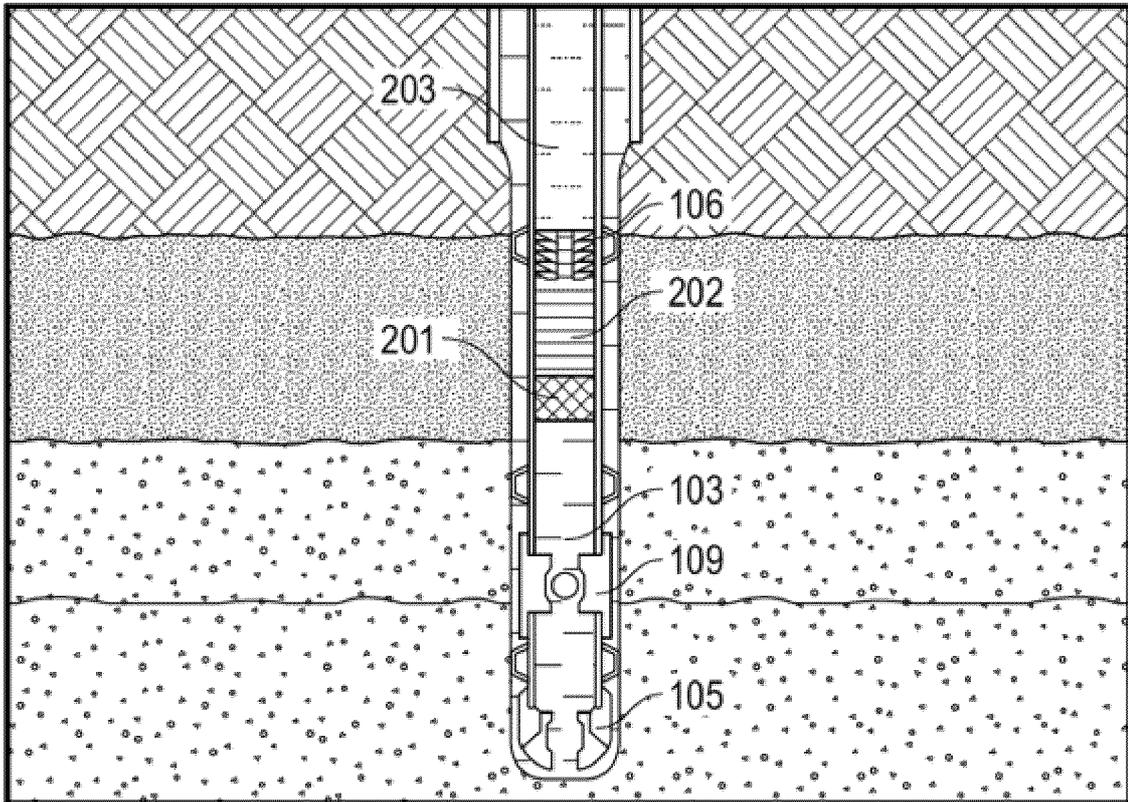
16. Способ по п. 11, в котором частота колебаний изменяется по мере схватывания и затвердевания цементного раствора.

По доверенности



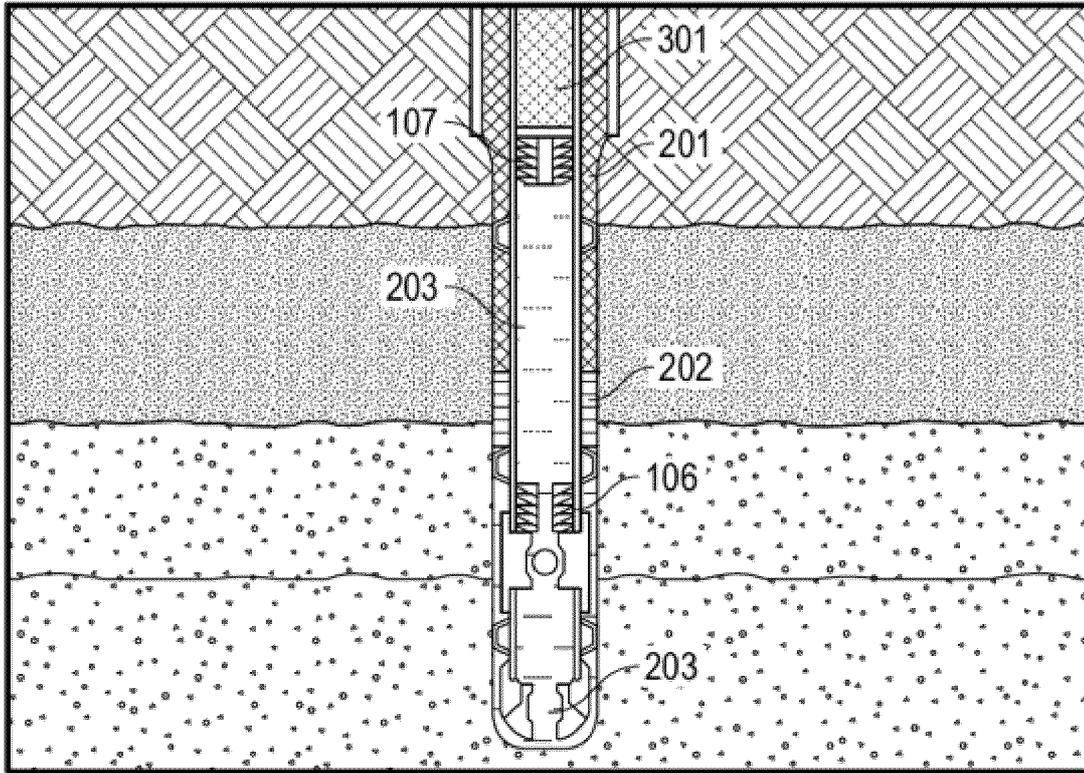
Фиг. 1

УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ



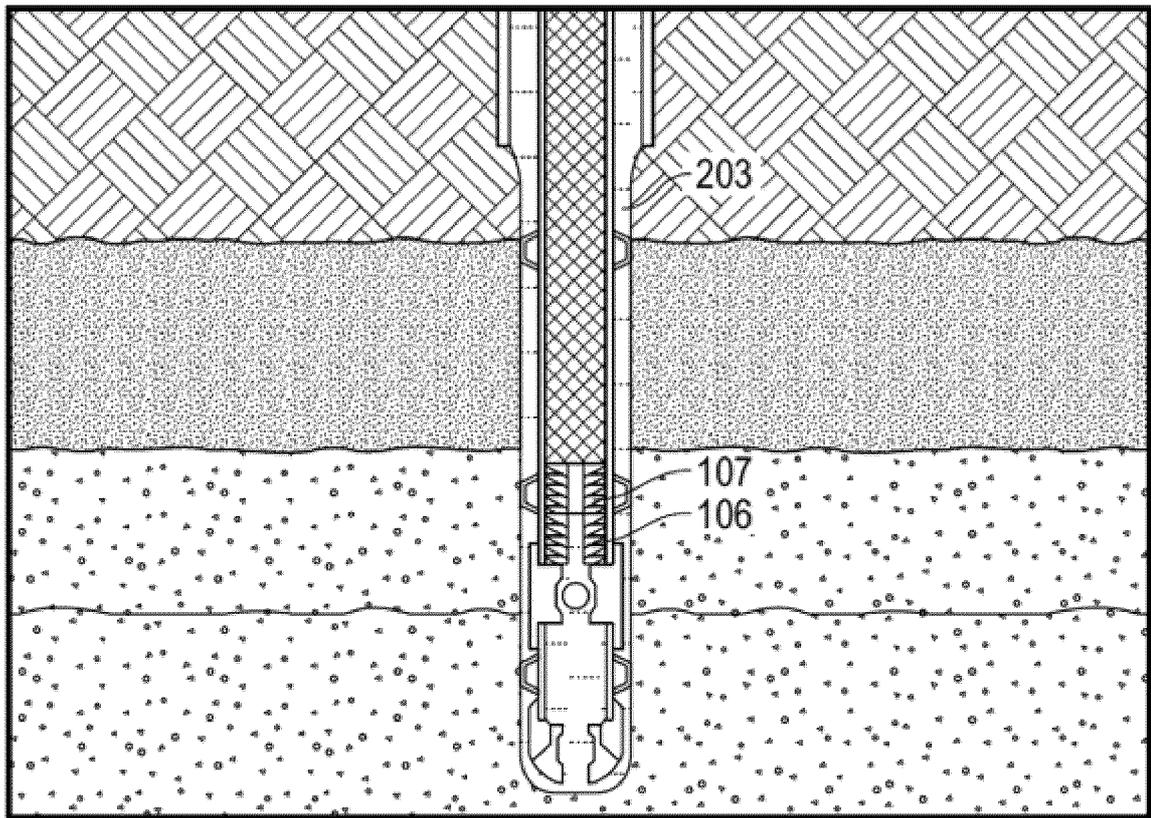
Фиг. 2

УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ



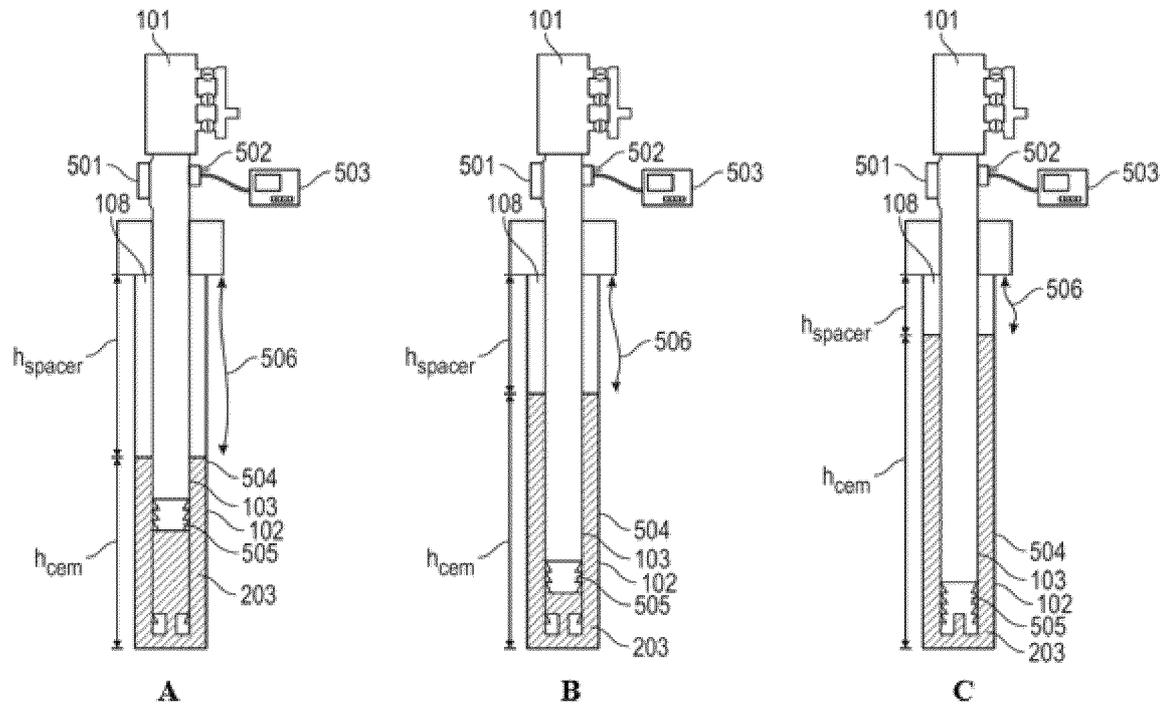
Фиг. 3

УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ

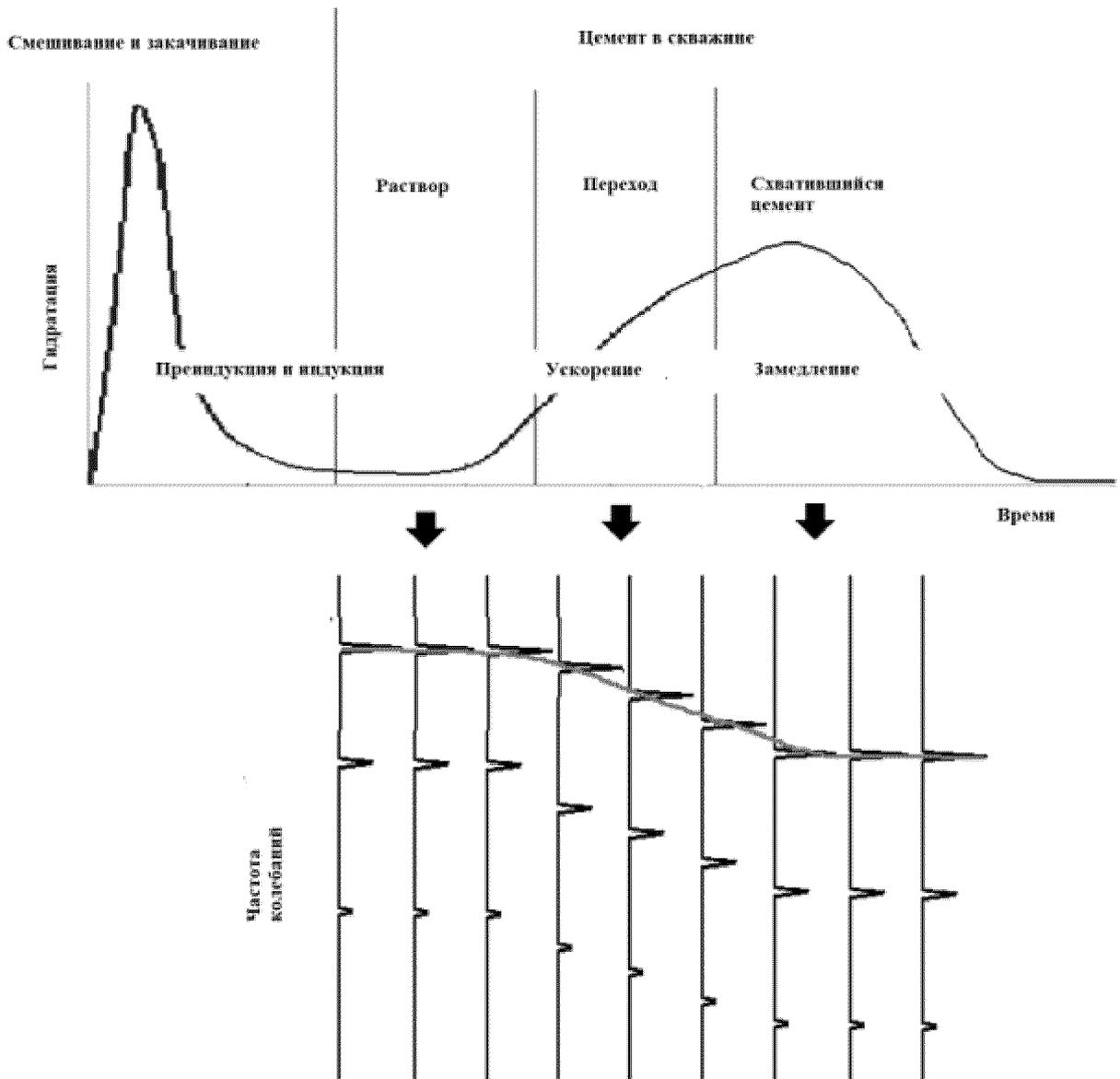


Фиг. 4

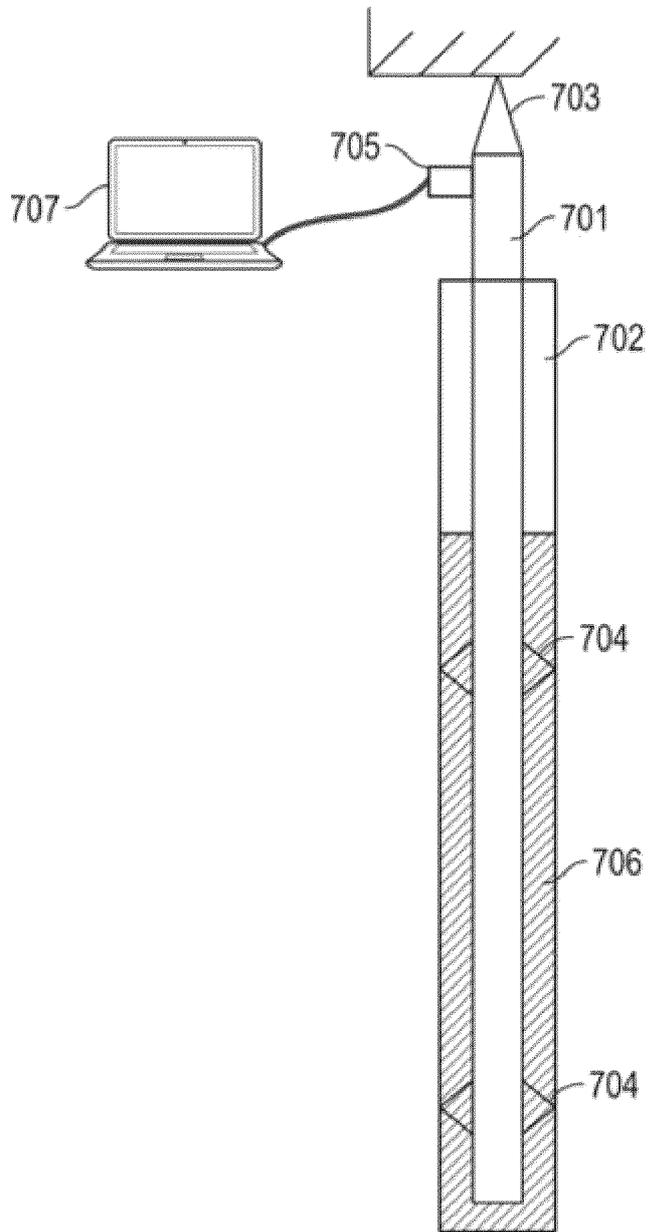
УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ



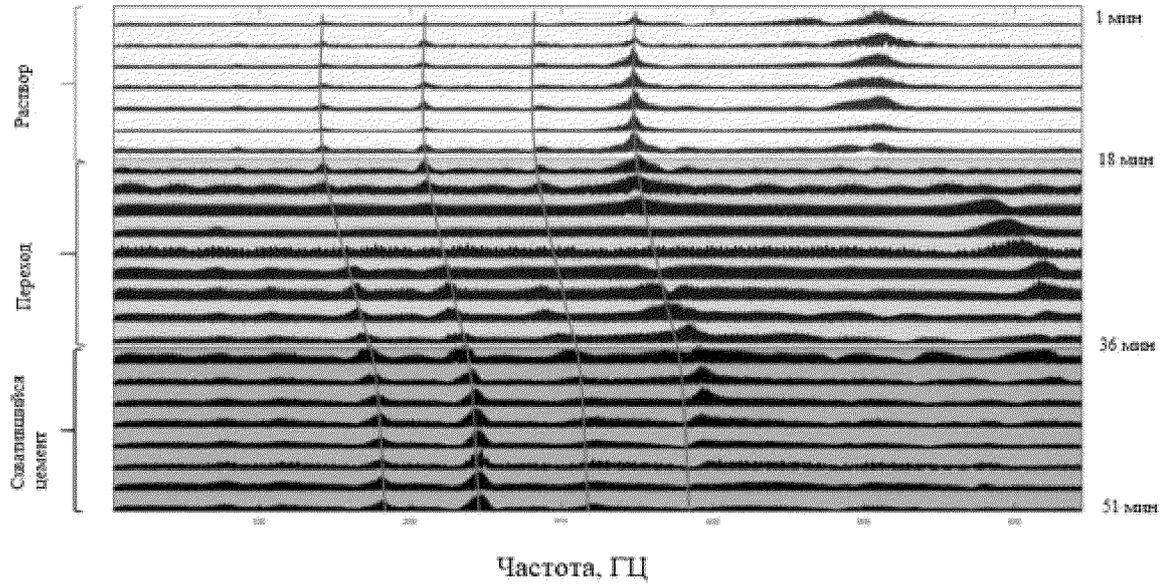
Фиг. 5



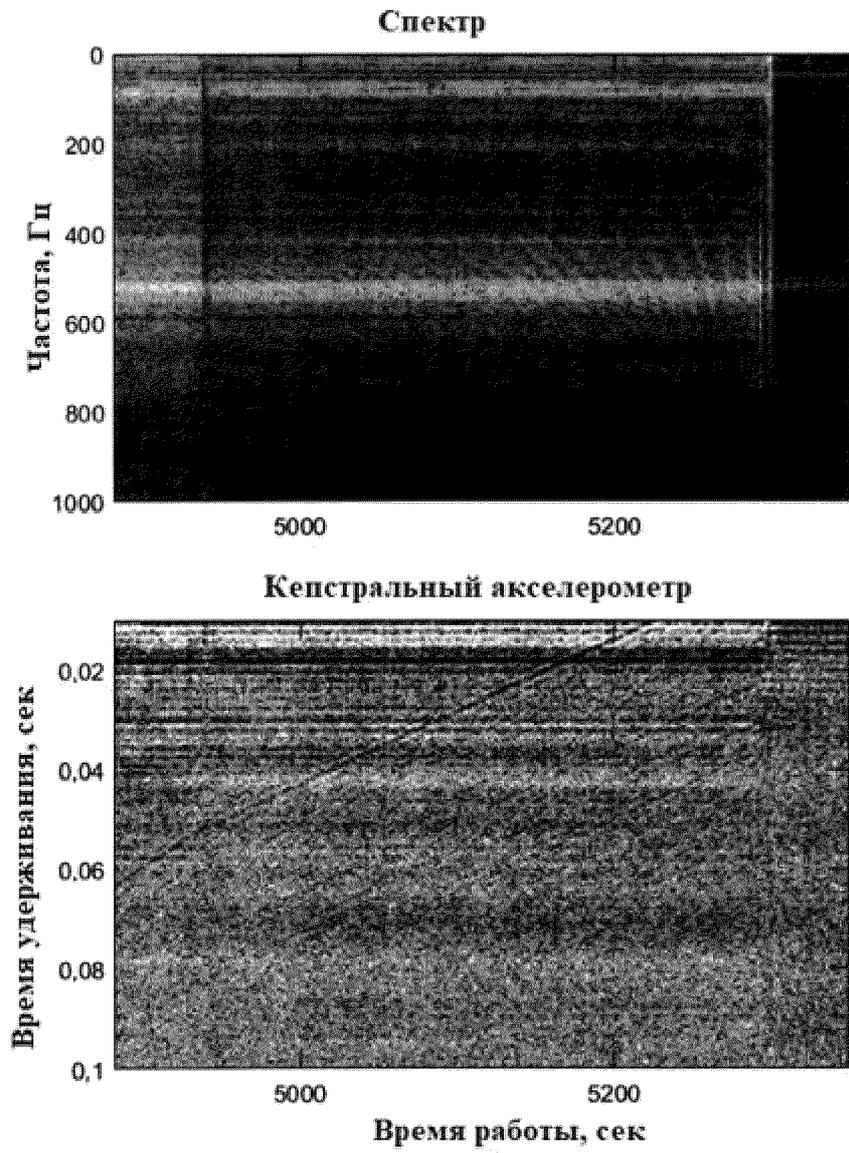
Фиг. 6



Фиг. 7

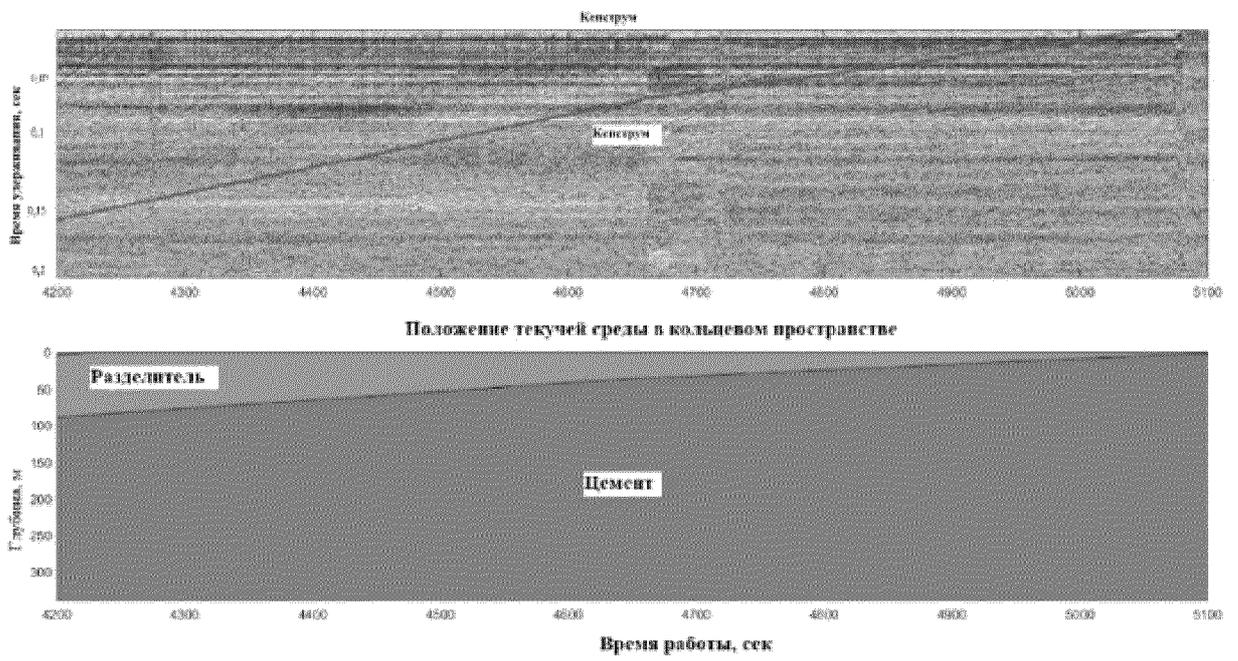


Частота, Гц
Фиг. 8



Фиг. 9

10/10



Фиг. 10