

(19)



Евразийское
патентное
ведомство

(21) 202390197 (13) A1

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

(43) Дата публикации заявки
2023.04.03

(51) Int. Cl. E21B 33/10 (2006.01)
E21B 33/14 (2006.01)
E21B 47/005 (2012.01)

(22) Дата подачи заявки
2020.07.30

(54) СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ СБРАСЫВАЕМОГО ОБЪЕКТА В СТВОЛЕ СКВАЖИНЫ

(86) PCT/RU2020/000405

(87) WO 2022/025790 2022.02.03

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

(72) Изобретатель:
Кабанник Артем Валерьевич (RU)

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

(57) Положение сбрасываемого объекта (например, цементировочной пробки или стрелы бурильной трубы) в обсаженном стволе скважины может быть определено в режиме реального времени во время операции цементирования. На буровой установлена система сбора данных о давлении, а на цементировочной головке установлен датчик давления. При перемещении сбрасываемого объекта через обсадную трубу, он сталкивается с областями с положительным или отрицательным изменением внутреннего размера поперечного сечения. Сбрасываемый объект генерирует импульс давления при прохождении через указанные области. Импульс давления и связанные с ним отражения обнаруживаются датчиком давления, и сигналы математически обрабатываются фильтром Калмана для определения текущего положения сбрасываемого объекта.

A1

202390197

202390197

A1

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

2420-577226EA/032

СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ СБРАСЫВАЕМОГО ОБЪЕКТА В СТВОЛЕ СКВАЖИНЫ

ОБЛАСТЬ ТЕХНИКИ

[0001] Настоящее изобретение относится в целом к операциям цементирования. В частности, данное изобретение относится к использованию объемных измерений, отраженных в трубах волн и импульсов давления для определения положений скребковых пробок и стрел бурильных труб внутри обсадной колонны.

УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ

[0002] При строительстве подземных скважин обычно во время и после бурения размещают трубчатый корпус, такой как хвостовик или обсадную трубу, закрепляемый цементом, закачиваемым в кольцевое пространство, вокруг наружной части трубчатого корпуса. Цемент предназначен для поддержки трубчатого корпуса и обеспечения изоляции различных зон добычи флюида, через которые проходит скважина. Эта последняя функция предотвращает перекрестное загрязнение флюидов из разных слоев. Например, цемент предотвращает попадание пластовых флюидов в уровень грунтовых вод и загрязнение питьевой воды или предотвращает попадание в скважину воды вместо нефти или газа. Кроме того, цементная оболочка помогает предотвратить коррозию трубчатого корпуса.

[0003] Способ размещения цемента известен в данной отрасли промышленности как первичное цементирование. В большинстве операций первичного цементирования используют способ размещения цемента с двумя пробками. На Фиг. 1 показана типичная конфигурация **100** буровой для операции первичного цементирования. Цементирующая головка **101** находится на поверхности, а обсадную колонну **103** опускают в ствол **102** скважины. Когда обсадную колонну **103** опускают в ствол **102** скважины, внутренняя часть обсадной колонны заполняется буровым раствором **108**. Обсадную колонну центрируют в стволе скважины с помощью центраторов **104**, прикрепленных к наружной части обсадной колонны. Центраторы устанавливают в критически важных секциях обсадной трубы для предотвращения прихвата при спуске обсадной трубы в скважину. Кроме того, они удерживают обсадную колонну в центре ствола скважины, что обеспечивает размещение однородной цементной оболочки в кольцевом пространстве между обсадной трубой и стволом скважины. Нижний конец обсадной колонны защищен направляющим башмаком **105** и муфтой **109** обсадной трубы с обратным клапаном. Направляющие башмаки представляют собой скошенные устройства с коническим концом, которые направляют обсадную трубу к центру ствола, чтобы свести к минимуму удары о зазубренные края или размывы во время установки. Направляющий башмак отличается от муфты обсадной трубы с обратным клапаном отсутствием обратного клапана. Обратный клапан в муфте обсадной трубы с обратным клапаном может предотвратить обратный поток или образование U-образных насосно-компрессорных труб

флюидов из кольцевого пространства в обсадную трубу. 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 флюидами при их закачке через внутреннюю часть обсадной колонны. Большинство цементировочных пробок изготовлены из литого алюминиевого корпуса с формованными резиновыми ребрами, что обеспечивает устойчивое перемещение по гибкой насосно-компрессорной трубе.

[0004] Цели операции первичного цементирования заключаются в удалении бурового раствора из внутренней части обсадной трубы и ствола скважины, размещении цементного раствора в кольцевом пространстве и поддержании заполнения внутренней части обсадной трубы вытесняющей жидкостью, такой как насыщенный минеральный раствор 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 загущенной или желатинизированной массы на границе раздела, которую было бы сложно удалить из ствола скважины, что могло бы препятствовать размещению однородной цементной оболочки по всему кольцевому пространству. Поэтому в дополнение к использованию скребковых пробок инженеры используют оба химических средства для поддержания разделения флюидов. Между цементным раствором и буровым раствором можно закачивать химические промывки и буферные жидкости. Дополнительным преимуществом этих флюидов является очистка поверхностей обсадной трубы и пласта, что способствует хорошему сцеплению с цементом.

[0006] На Фиг. 2 показаны химическая промывка **201** и буферная жидкость **202**, закачиваемые между буровым раствором **103** и нижней цементировочной пробкой **106**. Цементный раствор **203** следует за нижней цементировочной пробкой. Нижняя цементировочная пробка имеет мембрану, которая разрывается при посадке в нижней части обсадной колонны, обеспечивая прохождение цементного раствора через нижнюю цементировочную пробку и вхождение в кольцевое пространство (Фиг. 3).

[0007] После закачки достаточного объема цементного раствора для заполнения кольцевого пространства между обсадной колонной и стенкой ствола скважины высвобождается верхняя цементировочная пробка **107**, а затем вытесняющая жидкость **301**. Верхняя цементировочная пробка **107** не имеет мембраны; поэтому при ее посадке гидравлическое сообщение между внутренней частью обсадной трубы и кольцевым пространством отсекается (Фиг. 4). После операции цементирования инженеры ждут, пока цемент схватится и приобретет прочность, что известно как «ожидание затвердения цемента» (WOC). По истечении времени WOC могут быть начаты дальнейшие операции, такие как более глубокое бурение или перфорирование обсадной колонны.

[0008] Обычные цементируемые пробки закачивают непосредственно с поверхности, поскольку они проходят только через одну трубу с непрерывным внутренним диаметром (ID). С другой стороны, хвостовики не начинаются на поверхности; вместо этого их спускают вниз по стволу скважины на буровой колонне на заданную глубину. Хвостовики обычно имеют гораздо больший ID, чем буровая колонна; в результате одиночная цементируемая пробка не может быть закачана с поверхности. Поэтому вытеснение производят посредством двух пробок. Одна пробка, известная как стрела буровой трубы, расположена в наземном оборудовании для цементирования. Вторая пробка прикреплена 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 буровую колонну стрелу буровой трубы высвобождают из наземного оборудования для цементирования. Когда стрела буровой трубы достигает верхней части хвостовика, она защелкивается в скребковой пробке хвостовика. Затем как стрела буровой трубы, так и скребковая пробка хвостовика становятся единым разделителем между цементным раствором и вытесняющей жидкостью. Такое расположение можно увидеть в скважинах с большим отходом от вертикали и применениях многоступенчатого цементирования.

[0010] Дополнительную информацию о цементируемых пробках, стрелах буровых труб и операциях первичного цементирования можно найти в следующих публикациях. Leugemors E et al.: «Cementing Equipment and Casing Hardware», in Nelson EB and Guillot D (eds.): Well Cementing-2nd Edition, Houston, Schlumberger (2006) 343-458. Piot B and Cuvillier G: «Primary Cementing Techniques», in 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», paper SPE/IADC-173066-MS, presented at the SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, London, UK, 17-19 March 2015.

[0011] Могут иметь место отклонения от описанной выше идеализированной операции цементирования. Возможные причины включают в себя шероховатость ствола скважины, приводящую к неточным расчетам объема вытеснения, колебания производительности насоса, различия между номинальной и фактической геометрией обсадной трубы, поглощение бурового раствора, деформацию обсадной трубы и водоотдачу. С учетом этих неопределенностей операторы и инженеры заинтересованы в контроле положений цементируемой пробки в режиме реального времени, а также в определении высоты подъема цементной оболочки (ТОС) в кольцевом пространстве.

[0012] Настоящее изобретение относится к способу определения положения скважинного объекта в стволе скважины в режиме реального времени во время операций цементирования хвостовика или обсадной трубы. Как обсуждалось выше, цементирование нефтяных или газовых скважин представляет собой способ закачки цементного раствора в кольцевое пространство между стволом скважины и обсадной трубой или между двумя последовательными обсадными колоннами с целью обеспечения целостности скважины

посредством изоляции зон и укрепления ствола скважины. Во время операции первичного цементированья цементный раствор закачивают в обсадную колонну, а затем вытесняют другим флюидом. В конце вытеснения верхняя цементирующая пробка упирается в посадочную муфту на забое ствола скважины и изолирует внутреннее пространство обсадной трубы, заполненное вытесняющей жидкостью, от кольцевого пространства, заполненного цементным раствором. На этот момент может указывать повышение давления на поверхности. Операцию цементированья можно считать завершённой.

[0013] Традиционно положение пробки можно отследить путем разделения объема вытесненного флюида на площадь поперечного сечения обсадной трубы. Вытесненный объем можно измерить наземным расходомером или путем подсчета ходов цементирующего насоса. Площадь поперечного сечения обсадной трубы может быть рассчитана по внутреннему диаметру обсадной трубы. Этот способ контроля цементной пробки, основанный на отслеживании закачки, в дальнейшем будет называться объемным способом.

[0014] Способы закачки и вытеснения цемента могут стать проблематичными из-за неверных расчетов объема вытеснения, неточного контроля скорости закачки, различий между номинальной и фактической геометрией обсадной трубы, поглощения бурового раствора, деформации обсадной трубы, перепуска флюида и т. д. В результате фактические положения цементирующей пробки и верхней части цемента могут отличаться от теоретических прогнозов. Соответственно, в данной области техники существует потребность в способах контроля положений цементирующей пробки и верхней части цемента во время операции цементированья для своевременного выявления возможных проблем и принятия соответствующих мер по исправлению положения.

[0015] Способ и система обнаружения устойчивых скважинных объектов, отражающих гидравлический сигнал, раскрыты в заявке на патент WO 2018/004369. Контроль скважины основан на кепстральном анализе данных о давлении, зарегистрированных в устье скважины. Он предназначен для обнаружения устойчивых скважинных объектов, отражающих гидравлический сигнал. Гидравлический сигнал обнаруживается датчиком давления, затем данные о давлении обрабатывают для получения их свойств, таких как отрезки времени отражения волн в трубах. Одним (но не единственным) способом получения такой информации является кепстральный анализ. Кепстральный анализ широко используют в различных применениях, например, для контроля операций гидравлического разрыва пласта. Как описано в заявке на патент WO 2018/004369, упомянутой выше, кепстр является результатом обратного преобразования Фурье (IFT) логарифма расчетного спектра сигнала. Кепстрограмма позволяет обнаруживать объекты, отражающие гидравлический сигнал. В данном способе для операций гидравлического разрыва пласта используют источники гидравлических сигналов, включая эффект гидравлического удара, шум от наземных или погружных насосов и события перфорирования.

[0016] В патенте США 6401814 В1 раскрыт способ обнаружения цементирующей пробки в подземной скважине во время операций цементирования с использованием отражений импульсов давления. После генерирования импульсы давления передаются через вытесняющую жидкость, отражаются от цементирующей пробки и, наконец, принимаются датчиком давления. Местоположение пробки рассчитывают по времени отражения и скорости импульса давления в данной среде. Способ генерирования и передачи импульса давления через флюид в обсадной колонне включает в себя мгновенное открытие клапана, установленного на отводной линии скважины. Другие способы генерирования импульсов давления включают в себя пневматическую пушку, изменение скорости двигателя насоса или отключение насоса.

[0017] В патенте США 4819726 раскрыт способ определения положения цементной скребковой пробки до ее поступления в забой. Он включает в себя устройство, которое содержит секцию колонны труб с внутренними срезными временными средствами, ограничивающими движение цементной скребковой пробки через секцию колонны труб. Поступление цементирующей пробки в срезное временное ограничительное средство в колонне труб определяется путем увеличения давления в колонне труб на поверхности и контролируется датчиком давления.

[0018] В патенте США 9546548 раскрыты устройство и способ использования для анализа цементной оболочки на основе распространения акустических волн. Он состоит из устройства обнаружения акустических волн, содержащего протянутый в скважине оптоволоконный кабель, оптический источник и систему сбора данных. Акустический источник создает волну сжатия в обсадной колонне. Давление в кольцевом пространстве определяют по мере схватывания цементного раствора, и это давление сравнивают с максимальным пластовым давлением, что указывает на то, достиг ли цемент прочности, достаточной для поддержания эффективного уплотнения пласта с обсадной трубой по всему кольцевому пространству.

[0019] Способы отслеживания пробок, основанные на анализе распространения в трубе сигнала волны в стволе скважины, раскрыты в РСТ/RU2019/000600.

1. Определение положения скважинного объекта путем корреляции импульса давления с визуальной инспекцией обсадных труб. Импульсы определяют посредством спектрального анализа данных давления цементирующей головки с высоким разрешением.

2. Определение положения скважинного объекта путем измерения времени отражения. Отрезки времени отражения определяют по кепстрограмме давления.

[0020] Эти способы основаны на анализе сигнала давления, регистрируемого с высоким разрешением на цементирующей головке, и потенциально обладают большей точностью, чем объемный способ. Однако сигнал волны в трубе не всегда наблюдается на датчике цементирующей головки во время операции цементирования. Например, в начале вытеснения цемента более плотный цементный раствор под пробкой может привести к сбросу давления в части ствола скважины над пробкой, препятствуя

распространению сигнала волны в трубе. Это называется «эффектом U-образной насосно-компрессорной трубы». Кроме того, импульсы давления могут не генерироваться при перемещении пробки с низкой скоростью.

[0021] Концепцию объединения данных датчиков или данных, полученных из различных источников, использовали в таких применениях, как автомобильная, космическая или авиационная навигация, системы мониторинга дорожного движения и автономное вождение. Этот подход называется «объединением данных» и может привести к более низкой неопределенности измерений, чем это было бы возможно, если бы эти источники использовали по отдельности.

[0022] Данное изобретение относится к обнаружению пробки в стволе скважины во время операций цементирования путем объединения данных различных измерений положения пробки с помощью алгоритма фильтра Калмана. Это приводит к более точной оценке положения объекта, чем в случае анализа на основе одиночного измерения. Это достигается путем оценки совместного распределения вероятностей по результатам измерений для каждого периода времени.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ГРАФИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

[0023] На Фиг. 1 показана типичная конфигурация буровой во время операции цементирования.

[0024] На Фиг. 2 показано выполнение операции цементирования. Нижняя цементирующая пробка была высвобождена, отделив цементный раствор от химических промывок, буферных жидкостей и бурового раствора.

[0025] На Фиг. 3 показано выполнение операции цементирования. Нижняя цементирующая пробка была посажена на муфту обсадной трубы с обратным клапаном. Мембрана в нижней цементирующей пробке разрывается, позволяя цементному раствору попасть в кольцевое пространство между обсадной колонной и стенкой ствола скважины.

[0026] На Фиг. 4 показана завершенная операция цементирования. Цементный раствор заполняет кольцевое пространство, обе цементирующие пробки были посажены на муфту обсадной трубы с обратным клапаном, а внутренняя часть обсадной колонны заполнена вытесняющей жидкостью.

[0027] На Фиг. 5 представлена блок-схема, иллюстрирующая отслеживание положения сбрасываемого объекта с помощью фильтра Калмана.

[0028] На Фиг. 6 представлена блок-схема, иллюстрирующая этап прогнозирования отслеживания сбрасываемого объекта с помощью фильтра Калмана.

[0029] На Фиг. 7 представлена блок-схема, иллюстрирующая этап обновления отслеживания сбрасываемого объекта с помощью фильтра Калмана.

[0030] На Фиг. 8 проиллюстрировано измерение положения верхней пробки на основе корреляции импульсов муфты.

[0031] На Фиг. 9 проиллюстрировано измерение диаметра обсадной трубы на основе согласования скорости.

[0032] На Фиг. 10 проиллюстрирован пример отслеживания пробки в режиме реального времени. Производительность насоса и давление цементирующей головки (a); спектрограмма давления (b); согласование скорости перемещения пробки со скоростью перемещения пробки, полученной на основе скорости потока (c); траектории пробки и их неопределенности, полученные путем согласования скорости, корреляции импульсов и фильтра Калмана (d); внутренние диаметры обсадных труб и их неопределенности, полученные путем согласования скорости, корреляции импульсов и фильтра Калмана (e); коэффициенты усиления Калмана для положения пробки и диаметра обсадной трубы (f); корреляция импульсов муфты с прогнозируемыми импульсами (g); положения пробки и их неопределенности, определенные посредством согласования скорости, корреляции импульсов и фильтра Калмана в истинное время установки пробки (h).

СУЩНОСТЬ ИЗОБРЕТЕНИЯ

[0033] В одном аспекте варианты осуществления изобретения относятся к способам определения положения сбрасываемого объекта внутри обсадной колонны. Сбрасываемый объект может представлять собой цементирующую пробку или стрелу бурильной трубы. В дальнейшем термины «сбрасываемый объект», «пробка» и «стрела» могут использоваться взаимозаменяемо. Обсадную колонну устанавливают в ствол скважины, заполненный жидкостью, при этом флюид в стволе скважины поступает во внутреннюю часть обсадной колонны и заполняет ее. Обсадная колонна содержит по меньшей мере одну область с отрицательным или положительным изменением внутреннего размера поперечного сечения. На буровой установлена система сбора данных о давлении, а на обсадной колонне установлен по меньшей мере один датчик давления. Сбрасываемый объект размещают внутри обсадной колонны. За сбрасываемым объектом закачивают вытесняющую жидкость, что приводит к прохождению сбрасываемого объекта через внутреннюю часть обсадной колонны и его прохождению по меньшей мере через одну область с отрицательным или положительным изменением внутреннего размера поперечного сечения, что таким образом генерирует импульс давления. По меньшей мере один датчик давления используют для обнаружения и регистрации импульса давления и передачи данных о давлении в систему сбора данных о давлении. Данные о давлении включают в себя импульсы давления, генерируемые сбрасываемым объектом, проходящим через муфты обсадной колонны, отраженные импульсы давления или их комбинацию. Данные о давлении обрабатывают математически, и определяют положение сбрасываемого объекта. Математическая обработка включает в себя объединение данных о давлении с помощью фильтра Калмана.

[0034] В дополнительном аспекте варианты осуществления изобретения относятся к способам цементирования ствола скважины, проникающего в подземный пласт. Обсадную колонну устанавливают в ствол скважины, заполненный жидкостью, при этом флюид в стволе скважины поступает во внутреннюю часть обсадной колонны и заполняет ее. Обсадная колонна содержит по меньшей мере одну область с отрицательным или положительным изменением внутреннего размера поперечного сечения. На буровой

установлена система сбора данных о давлении, а на обсадной колонне установлен по меньшей мере один датчик давления. Цементный раствор закачивают во внутреннюю часть обсадной колонны. Цементирующую пробку размещают внутри обсадной колонны. За цементирующей пробкой закачивают вытесняющую жидкость, что приводит к прохождению цементирующей пробки через внутреннюю часть обсадной колонны и ее прохождение по меньшей мере через одну область с отрицательным или положительным изменением внутреннего размера поперечного сечения, что таким образом генерирует импульс давления. По меньшей мере один датчик давления используют для обнаружения и регистрации импульса давления и передачи данных о давлении в систему сбора данных о давлении. Данные о давлении включают в себя импульсы давления, генерируемые цементирующей пробкой, проходящей через муфты обсадной колонны, отраженные импульсы давления или их комбинацию. Данные о давлении обрабатывают математически, и определяют положение сбрасываемого объекта. Математическая обработка включает в себя объединение данных о давлении с помощью фильтра Калмана.

ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

[0035] Прежде всего, следует заметить, что при разработке какого-либо подобного фактического варианта осуществления изобретения необходимо принять многочисленные варианты реализации изобретения - конкретные решения для достижения конкретных целей разработчика, таких как соблюдение связанных с системой и связанных с бизнесом ограничений, которые будут изменяться в зависимости от вариантов реализации изобретения. Кроме того, следует понимать, что такие усилия по разработке могут быть сложными и трудоемкими, но, тем не менее, будут обычным делом для специалиста в данной области техники, пользующегося преимуществом настоящего изобретения. Кроме того, композиция, используемая/раскрытая в данном документе, также может содержать некоторые компоненты, отличные от приведенных. В сущности изобретения и настоящем подробном описании каждое числовое значение следует вначале рассматривать как модифицированное термином «около» (если оно уже явно не модифицировано), а затем снова рассматривать как не модифицированное таким образом, если в контексте не указано иное. Кроме того, следует понимать, что в сущности изобретения и подробном описании изобретения диапазон концентраций, указанный или описанный как применимый, приемлемый и т. п., подразумевает, что любая и каждая концентрация в пределах диапазона, включая конечные значения, должна рассматриваться как заявленная. Например, «диапазон от 1 до 10» следует воспринимать как описывающий все возможные числа в непрерывности от около 1 до около 10. Таким образом, даже если конкретные частные значения в пределах диапазона, или ни одно из частных значений в пределах диапазона, в явном виде (не) указаны или обозначены лишь несколькими конкретными точками, следует понимать, что авторы изобретения подразумевают и понимают под этим, что все возможные значения в пределах диапазона следует рассматривать как указанные, и что авторы изобретения имеют в виду весь диапазон и все значения в пределах

указанного диапазона.

[0036] Данное изобретение относится к способам обнаружения в режиме реального времени положения сбрасываемых объектов в обсадной колонне или хвостовике во время операции цементирования скважины. Сбрасываемые объекты могут представлять собой цементируемые пробки или стрелы буровых труб. В данном изобретении термины «пробка» и «стрела» могут использоваться взаимозаменяемо с термином «сбрасываемый объект».

[0037] Указанный способ основан на использовании фильтра Калмана для выполнения объединения данных различных измерений положения пробки с прогнозами объемной модели, в результате чего оценка положения является более точной, чем оценки положения, основанные на единственном измерении. Это достигается путем оценки совместного распределения вероятностей по результатам измерений для каждого периода времени.

[0038] Список возможных измерений может включать в себя, но не ограничиваться этим: (1) определение положения пробки и диаметра обсадной трубы путем согласования скорости со скоростью перемещения объекта, определяемой объемными способами; (2) определение положения пробки путем корреляции импульсов давления с визуальной инспекцией обсадных труб; и (3) определение положения пробки путем обработки отраженного сигнала с помощью кепстрального анализа. Импульсы могут быть определены посредством спектрального анализа данных давления цементируемой головки с высоким разрешением.

[0039] Алгоритм работает в двухэтапном способе (Фиг. 5). На этапе прогнозирования фильтр Калмана производит *априорное* измерение состояния системы вместе с его неопределенностью. Прогнозирование выполняется посредством объемной

модели. Вектор состояния системы $\dot{x} = \begin{bmatrix} h \\ d \end{bmatrix}$ оценивает положение пробки h и внутренний диаметр обсадной трубы d .

[0040] Когда наблюдается какое-либо из вышеприведенных измерений (возможно, искаженное шумом измерения), оценки постоянно обновляются с использованием средневзвешенного значения, причем больший вес придается оценкам с меньшей неопределенностью. Способ повторяют на каждом временном шаге n .

[0041] Этапы прогнозирования и обновления измерений модели более подробно представлены ниже.

Этап прогнозирования

[0042] Этап прогнозирования отслеживания пробки с помощью фильтра Калмана проиллюстрирован на Фиг. 6. Нелинейная объемная модель отслеживания пробки $\dot{x}_{n,n-1} = f(\dot{x}_{n-1,n-1}, u_n)$ прогнозирует новый *априорный* вектор состояния системы $\dot{x}_{n,n-1}$

$$u_n = \begin{bmatrix} 4v_n \\ \pi d^2 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

как сумму предыдущей оценки $\hat{x}_{n-1,n-1}$ и вектора управления

[0043] Первый элемент вектора управления, u_n , определяет расстояние, на которое пробка перемещается вдоль скважины, вытесняемая объемом вытесняющей жидкости v_n . Для простоты внутренний диаметр обсадной трубы d считается постоянным на каждом этапе алгоритма Калмана, поэтому второй элемент вектора управления равен 0. В случае изменения внутреннего диаметра обсадной трубы второй элемент будет равен приращению или уменьшению диаметра обсадной трубы. Член вектора управления u_n вводит нелинейность в уравнение модели. Модификация фильтра Калмана, применяемая к нелинейным задачам, называется расширенным фильтром Калмана.

[0044] Неопределенность состояния системы описывается ковариационной матрицей:

$$P = \begin{bmatrix} \sigma_h^2 & \sigma_{hd} \\ \sigma_{hd} & \sigma_d^2 \end{bmatrix}.$$

Диагональные элементы ковариационной матрицы σ_h^2 и σ_d^2 представляют собой вариации положения пробки h и внутреннего диаметра обсадной трубы d . Недиагональные элементы σ_{hd} представляют собой их ковариации.

[0045] В соответствии с алгоритмом расширенного фильтра Калмана предыдущую оценку ковариации $P_{n-1,n-1}$ экстраполируют на новую оценку $P_{n,n-1}$ с помощью следующего уравнения:

$$P_{n,n-1} = F P_{n-1,n-1} F^T + Q.$$

F представляет собой матрицу Якоби с частными производными от f по h и d в качестве элементов:

$$F = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_h}{\partial h} & \frac{\partial f_h}{\partial d} \\ \frac{\partial f_d}{\partial h} & \frac{\partial f_d}{\partial d} \end{bmatrix}.$$

[0046] В данном случае f_h и f_d представляют собой два выходных результата объемной модели отслеживания пробки f . Q представляет собой ковариацию технологического шума. Ковариация технологического шума описывает входные данные прогнозируемой неопределенности положения пробки из-за вариации измерения перекачиваемого объема σ_v .

Этап обновления

[0047] Вектор измерения z_n также представляет собой двухэлементный вектор, содержащий положение пробки и внутренний диаметр обсадной трубы: $z = \begin{bmatrix} h \\ d \end{bmatrix}$. Неопределенность измерения определяют посредством ковариационной матрицы R , которая имеет ту же структуру, что и оценка ковариации P , определенная ранее. Измерение z_n объединяют с прогнозируемым состоянием $\hat{x}_{n,n-1}$ в форме их средневзвешенного значения, что приводит к оценке текущего состояния $\hat{x}_{n,n}$ (Фиг. 7).

$$\hat{x}_{n,n} = \hat{x}_{n,n-1} + K_n(z_n - \hat{x}_{n,n-1}).$$

[0048] В данном случае средневзвешенное значение определяют посредством матрицы усиления Калмана:

$$K_n = \frac{P_{n,n-1}}{P_{n,n-1} + R_n}.$$

[0049] Диагональные элементы матрицы усиления Калмана находятся в диапазоне от 0 до 1. Низкая неопределенность измерения R_n относительно неопределенности прогнозирования модели $P_{n,n-1}$ увеличит коэффициент усиления Калмана до 1. В результате оценка текущего состояния $\hat{x}_{n,n}$ будет ближе к измерению z_n . И наоборот, низкая неопределенность прогнозирования модели $P_{n,n-1}$ относительно неопределенности измерения R_n уменьшит коэффициент усиления Калмана до 0. В результате оценка текущего состояния $\hat{x}_{n,n}$ будет ближе к прогнозируемому состоянию $\hat{x}_{n,n-1}$.

[0050] Ковариация текущей оценки $P_{n,n}$ представляет собой комбинацию неопределенности прогнозирования модели $P_{n,n-1}$ и неопределенности измерения R_n :

$$P_{n,n} = (I - K_n)P_{n,n-1}(I - K_n)^T + K_n R_n K_n^T.$$

В данном случае I представляет собой единичную матрицу.

Объединение измерения импульсов муфты

[0051] В заявке на патент PCT/RU2019/000600 «Methods for Determining a Position of a Droppable Object in a Wellbore» описаны следующие этапы определения верхней цементировочной пробки (Фиг. 8).

1. Вычисление оконного преобразования Фурье (STFT) сигнала давления цементировочной головки.
2. Определение импульсов муфты на нормализованном графике спектральной плотности энергии.
3. Сопоставление импульсов муфты из шкалы времени с расчетной шкалой глубин.
4. Корреляция измеренных импульсов муфты с прогнозируемыми.
5. Применение поправки на глубину к расчетной глубиной пробки.

[0052] Чтобы иметь возможность ввести измерения корреляции импульсов муфты в алгоритм фильтра Калмана, определяют вектор измерения $z = \begin{bmatrix} h \\ d \end{bmatrix}$ и его ковариацию R_{hd} . Неизвестный внутренний диаметр обсадной трубы d , требуемый алгоритмом Калмана, можно вычислить на основе объемного уравнения:

$$d = \sqrt{\frac{4v}{\pi h}}.$$

В данном случае v представляет собой объем вытеснения со среднеквадратичным отклонением σ_v и h представляет собой измеренное положение пробки со среднеквадратичным отклонением σ_h .

[0053] Для алгоритма фильтра Калмана требуется гауссово распределение данных измерений, что может быть неверным для способа корреляции импульсов муфты, если у всех соединений обсадной трубы почти одинаковая длина. Однако распределения положения пробки h и внутреннего диаметра обсадной трубы d можно считать гауссовыми, если выполняются два условия.

1. Исходное положение пробки, определенное по объему, достаточно близко к истинному положению.
2. Сдвиг корреляционной функции небольшой: например, менее половины длины соединения обсадной колонны.

[0054] Вектор измерения z можно определить как результат функции объема вытеснения v и положения пробки h :

$$z = g(v, h) = \begin{bmatrix} g_h \\ g_d \end{bmatrix}.$$

[0055] Их ковариация в линейном приближении может быть выражена следующим образом:

$$R_{hd} = GR_{vh}G^T,$$

с матрицей Якоби

$$G = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_h}{\partial v} & \frac{\partial g_h}{\partial h} \\ \frac{\partial g_d}{\partial v} & \frac{\partial g_d}{\partial h} \end{bmatrix}$$

и ковариационной матрицей R_{vh} входных параметров объема вытеснения v и положения пробки h .

Объединение измерений согласования скорости

[0056] В способе согласования скорости используют аналогичную идею

использования импульсов, индуцируемых пробкой, проходящей через муфту обсадной трубы, но он не включает в себя негауссово распределение погрешностей измерения, присущее способу корреляции импульсов муфты (Фиг. 9).

[0057] Способ согласования скорости включает в себя следующее.

1. Вычисление оконного преобразования Фурье (STFT) сигнала давления.
2. Определение импульсов муфты на нормализованном графике спектральной плотности энергии.
3. Определение частоты пульсации $f_{pls}(t)$ путем применения STFT к графику импульсов муфты.

4. Определение скорости перемещения пробки $v_{пробка}(t)$ путем умножения частоты пульсации $f_{pls}(t)$ на среднюю длину соединения $\bar{h}_{jnt}$.

5. Определение внутреннего диаметра обсадной трубы путем согласования измеренной скорости потока $Q(t)$ со скоростью потока, определенной по скорости перемещения пробки:

$$d = \arg\min \|Q(t) - 4\pi d^2 v_{пробка}(t)\|^2.$$

6. Расчет положения пробки по внутреннему диаметру обсадной трубы d и общему измеренному объему вытеснения v .

$$h = \frac{4v}{\pi d^2}.$$

[0058] В отличие от способа корреляции импульсов муфты, который определяет местоположение пробки, а затем пересчитывает внутренний диаметр обсадной трубы, способ согласования скорости перемещения пробки сначала определяет внутренний диаметр, а затем определяет положение пробки на основе объемного уравнения.

[0059] Вектор измерения z , требуемый алгоритмом Калмана, можно определить как результат функции объема вытеснения v и внутреннего диаметра обсадной трубы d :

$$z = g(v, d) = \begin{bmatrix} g_h \\ g_d \end{bmatrix}.$$

[0060] Их ковариация в линейном приближении может быть выражена следующим образом:

$$R_{hd} = G R_{vd} G^T,$$

с матрицей Якоби:

$$G = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_h}{\partial v} & \frac{\partial g_h}{\partial d} \\ \frac{\partial g_d}{\partial v} & \frac{\partial g_d}{\partial d} \end{bmatrix},$$

и ковариационной матрицей R_{vd} входных параметров объема вытеснения v и

внутреннего диаметра обсадной трубы d .

[0061] Алгоритм может работать в режиме реального времени путем рекурсивного использования только текущих данных измерений и ранее прогнозированного состояния. Никакой дополнительной предшествующей информации не требуется.

[0062] Специалистам в данной области техники будет понятно, что раскрытые способы могут дополнительно включать в себя размещение нижней цементирующей пробки внутри обсадной колонны. Цементный раствор может быть закачан за нижней цементирующей пробкой. Нижняя цементирующая пробка может перемещаться через внутреннюю часть обсадной колонны и проходить по меньшей мере через одну область с отрицательным или положительным изменением внутреннего размера поперечного сечения, таким образом создавая импульс давления. По меньшей мере один датчик давления можно использовать для обнаружения импульса давления и передачи данных о давлении в систему сбора данных о давлении. Данные о давлении могут быть обработаны математически, и может быть определено положение нижней цементирующей пробки. Контроль нижней цементирующей пробки можно и дальше осуществлять по меньшей мере до запуска верхней цементирующей пробки.

Примеры

[0063] Пример отслеживания верхней цементирующей пробки во время работы цементировки обсадной трубы диаметром 13-3/8 дюйма с помощью фильтра Калмана показан на Фиг. 10. Давление цементирующей головки и скорость потока показаны на Фиг. 10(a). Спектрограмма давления показана на Фиг. 10(b). В начале указанной работы от 0 до около 1000 секунд сигнал давления отсутствовал из-за эффекта U-образной насосно-компрессорной трубы. В этот период времени положение пробки отслеживалось только на основе объемной модели. Траектория пробки как функция времени показана на Фиг. 10(d). Среднеквадратичное отклонение местоположения пробки показано заштрихованной областью. Среднеквадратичное отклонение местоположения пробки, прогнозированное посредством объемной модели, увеличилось с 0 до 8 метров из-за технологического шума, связанного с шумом измерения расходомера и неопределенностью внутреннего диаметра обсадной трубы. Измерения внутреннего диаметра обсадной трубы со среднеквадратичными отклонениями нанесены на график в виде заштрихованных областей на Фиг. 10(e). Внутренний диаметр обсадной трубы не изменился по сравнению с его исходным значением, а его среднеквадратичное отклонение было постоянным в соответствии с прогнозом объемной модели.

[0064] Объединение измерений согласования скорости началось с 1453 с. Спектрограмма импульса давления, построенная по шкале скорости перемещения пробки, и согласованная скорость перемещения пробки, вычисленная на основе скорости потока, показаны на Фиг. 10(c). Хотя среднеквадратичное отклонение местоположения пробки, определенное путем согласования скорости, варьировалось от 33,1 до 81,1 м, его объединение с фильтром Калмана эффективно уменьшило расчетное среднеквадратичное отклонение местоположения пробки с 8 до 2 метров. Кроме того, объединение

согласования скорости изменило расчетный внутренний диаметр обсадной трубы с исходного значения 314,9 мм на 314,0 мм. Опять же, хотя среднеквадратичное отклонение внутреннего диаметра обсадной трубы, измеренное путем согласования скорости, колебалось около 19 мм, среднеквадратичное отклонение оценки Калмана было эффективно уменьшено с 4,7 мм до 0,8 мм. Значения коэффициента усиления Калмана как для положения пробки, так и для диаметра обсадной трубы показаны на Фиг. 10(f). Когда началось объединение измерений согласования скорости, коэффициент усиления Калмана быстро упал со значения по умолчанию, равного 1, почти до нуля, что указывает на то, что прогнозу модели придается большее значение, чем измерению.

[0065] Для подтверждения алгоритма расчетную глубину пробки сравнивают с глубиной посадки в истинное время посадки. Истинная глубина посадки равна глубине муфты обсадной трубы с обратным клапаном (в данном случае 586,3 м). Истинное время посадки определяется как время набора давления, вызванное посадкой пробки.

[0066] Положения пробки и их распределения вероятностей в истинное время посадки, определяемые посредством согласования скорости, корреляции импульсов муфты и фильтра Калмана, показаны на Фиг. 10(h).

[0067] Разности между расчетными положениями пробки и истинными глубинами посадки, а также их среднеквадратичные отклонения приведены в таблице 1.

	Объемная	Согласование скорости	Корреляция импульсов муфты	Фильтр Калмана
Разность, м	3,53	9,11	-0,41	-0,52
Среднеквадратичное отклонение	16,4	81,1	1,2	0,43

Таблица 1. Различия и среднеквадратичные отклонения между положениями пробки, определенными способами объемных измерений, согласования скорости, корреляции импульсов муфты и фильтра Калмана.

Хотя выше были подробно описаны только несколько приведенных в качестве примера вариантов осуществления изобретения, для специалистов в данной области техники будет очевидно, что в приведенных в качестве примера вариантах осуществления изобретения возможны многие модификации без существенного отклонения от данного изобретения. Соответственно, все такие модификации должны быть включены в объем данного изобретения, определенный формулой изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

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

(i) установку обсадной колонны в заполненном жидкостью стволе скважины, во время которой флюид в стволе скважины поступает во внутреннюю часть обсадной колонны и заполняет ее, при этом обсадная колонна содержит по меньшей мере одну область с отрицательным или положительным изменением внутреннего размера поперечного сечения;

(ii) установку системы сбора данных о давлении на буровой и по меньшей мере одного датчика давления на обсадной колонне;

(iii) размещение сбрасываемого объекта внутри обсадной колонны;

(iv) закачку вытесняющей жидкости за сбрасываемым объектом, приводящую к прохождению сбрасываемого объекта через внутреннюю часть обсадной колонны и его прохождение по меньшей мере через одну область с отрицательным или положительным изменением внутреннего размера поперечного сечения, что таким образом генерирует импульс;

(v) применение по меньшей мере одного датчика давления для обнаружения и регистрации импульса давления и передачи данных о давлении в систему сбора данных о давлении, причем данные о давлении содержат импульсы давления, генерируемые сбрасываемым объектом, проходящим через муфты обсадной трубы, отраженные импульсы давления или их комбинацию;

(vi) математическую обработку данных о давлении и определение положения сбрасываемого объекта,

при этом математическая обработка включает объединение данных о давлении посредством фильтра Калмана.

2. Способ по п. 1, в котором фильтр Калмана включает этап прогнозирования модели и этап объединения измерений.

3. Способ по п. 2, в котором этап прогнозирования модели включает объемный способ определения положения сбрасываемого объекта.

4. Способ по п. 2, в котором этап объединения измерений включает измерение согласования скорости, измерение корреляции импульсов муфты, или измерение кепстрального анализа, или их комбинацию.

5. Способ по п. 1, в котором сбрасываемый объект содержит цементирующую пробку или стрелу.

6. Способ цементирования ствола скважины, проникающего в подземный пласт, включающий:

(i) установку обсадной колонны в заполненном жидкостью стволе скважины, во время которой флюид в стволе скважины поступает во внутреннюю часть обсадной колонны и заполняет ее, при этом обсадная колонна содержит по меньшей мере одну область с отрицательным или положительным изменением внутреннего размера

поперечного сечения;

(ii) установку системы сбора данных о давлении на буровой и по меньшей мере одного датчика давления на обсадной колонне;

(iii) закачку цементного раствора во внутреннюю часть обсадной колонны;

(iv) размещение цементирующей пробки внутри обсадной колонны;

(v) закачку вытесняющей жидкости за цементирующей пробкой, приводящую к прохождению цементирующей пробки через внутреннюю часть обсадной колонны и ее прохождение по меньшей мере через одну область с отрицательным или положительным изменением внутреннего размера поперечного сечения, что таким образом генерирует импульс;

(vi) применение по меньшей мере одного датчика давления для обнаружения и регистрации импульса давления и передачи данных о давлении в систему сбора данных о давлении, причем данные о давлении содержат импульсы давления, генерируемые цементирующей пробкой, проходящей через муфты обсадной трубы, отраженные импульсы давления или их комбинацию;

(vii) математическую обработку данных о давлении и определение положения цементирующей пробки,

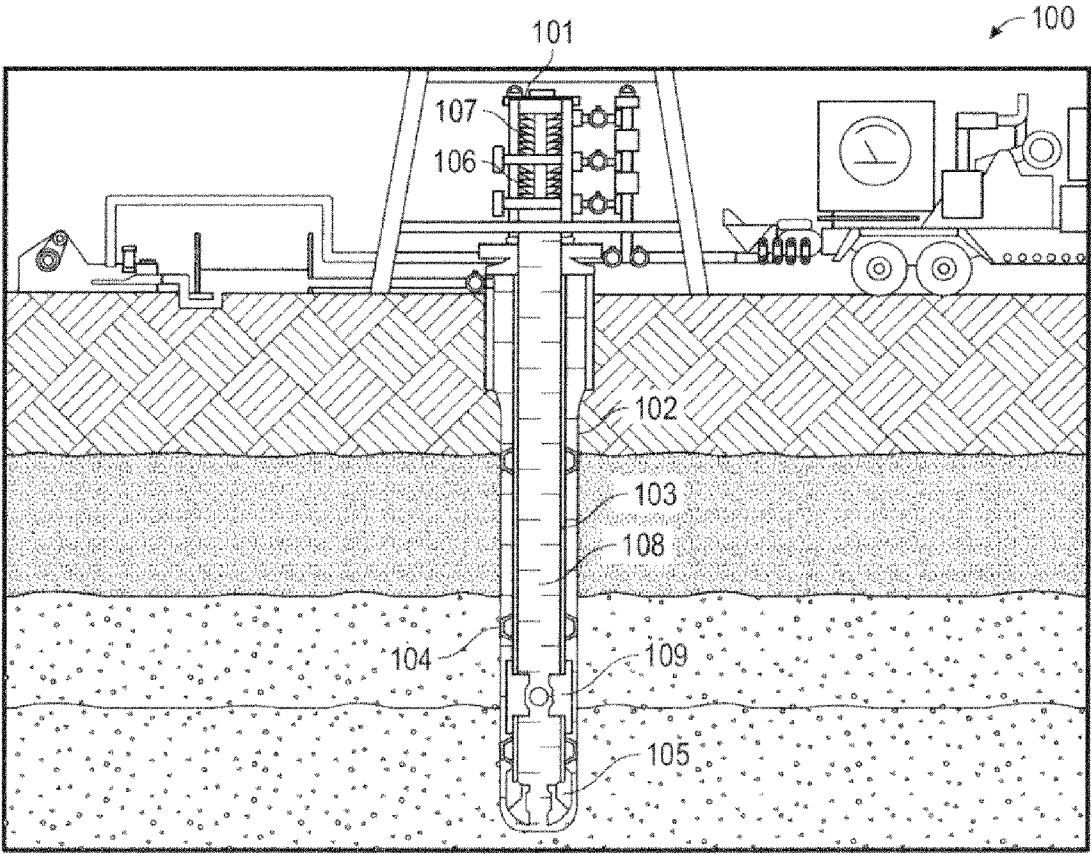
при этом математическая обработка включает объединение данных о давлении посредством фильтра Калмана.

7. Способ по п. 6, в котором фильтр Калмана включает этап прогнозирования модели и этап объединения измерений.

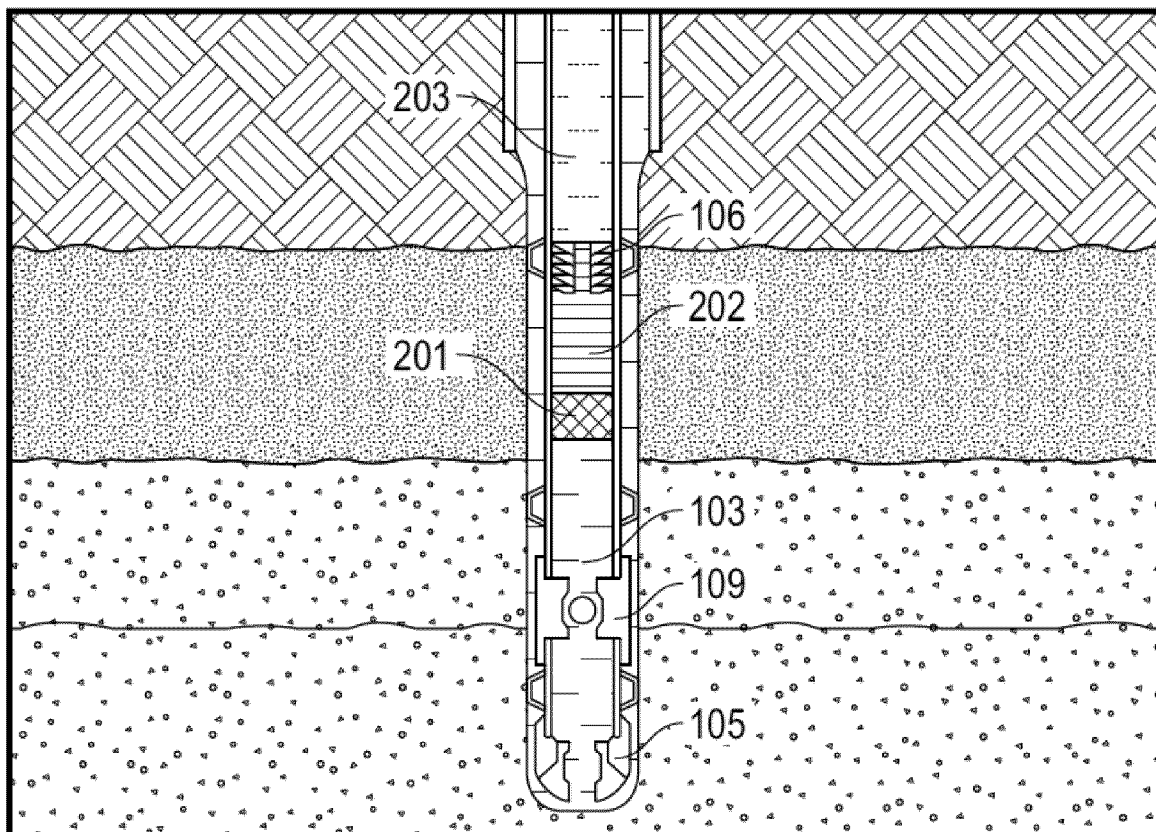
8. Способ по п. 7, в котором этап прогнозирования модели включает объемный способ определения положения цементирующей пробки.

9. Способ по п. 7, в котором этап объединения измерений включает измерение согласования скорости, измерение корреляции импульсов муфты, или измерение кепстрального анализа, или их комбинацию.

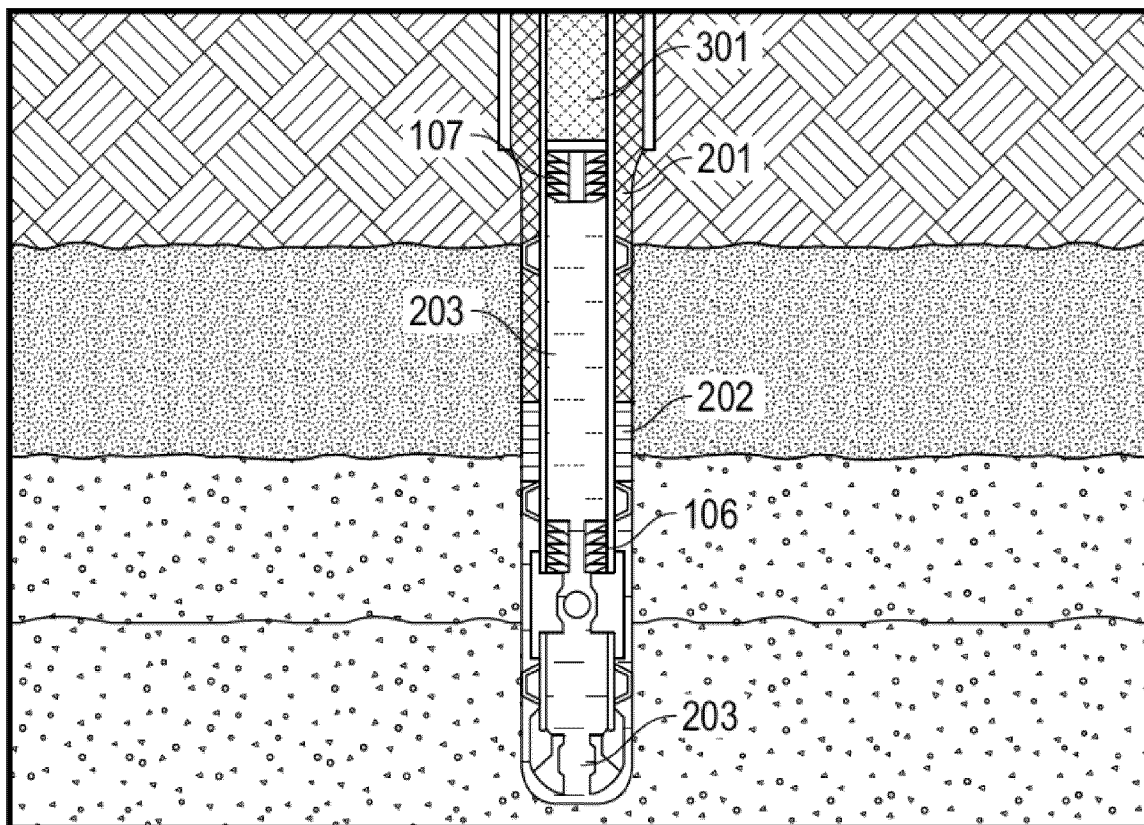
По доверенности



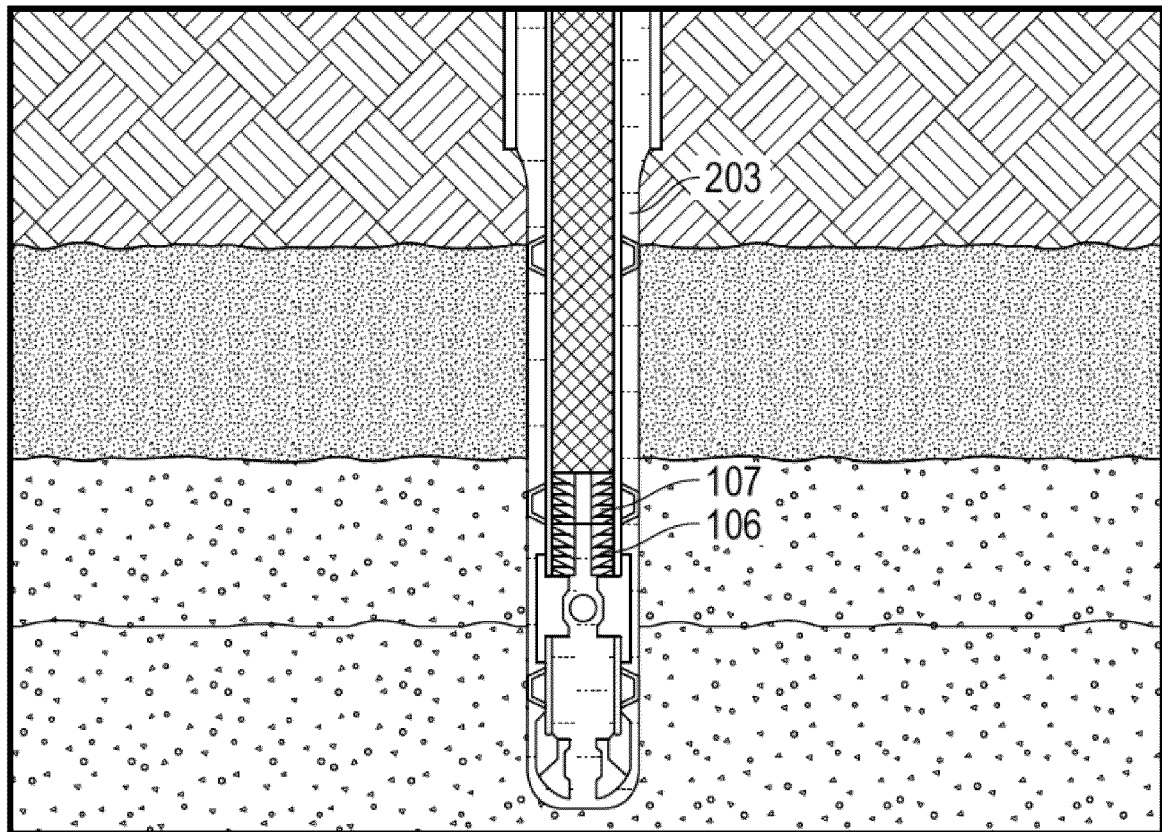
Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4

Исходная оценка: $\hat{x}_{1,0}, P_{1,0}$

Прогнозирование

- Экстраполяция состояния

$$\hat{x}_{n,n-1} = f(\hat{x}_{n-1,n-1}, u_n)$$

- Экстраполяция неопределенности

$$P_{n,n-1} = F P_{n-1,n-1} F^T + Q$$

Обновление

- Вычисление коэффициента усиления Калмана

$$K_n = P_{n,n-1} H^T (H P_{n,n-1} H^T + R_n)^{-1}$$

- Обновление оценки измерением

$$\hat{x}_{n,n} = \hat{x}_{n,n-1} + K_n(z_n - H\hat{x}_{n,n-1})$$

- Обновление неопределенности оценки

$$P_{n,n} = (I - K_n H) P_{n,n-1} (I - K_n H)^T + K_n R_n K_n^T$$

Единичная задержка: $n = n + 1$

Предыдущая оценка

$$\hat{x}_{n-1,n-1}$$

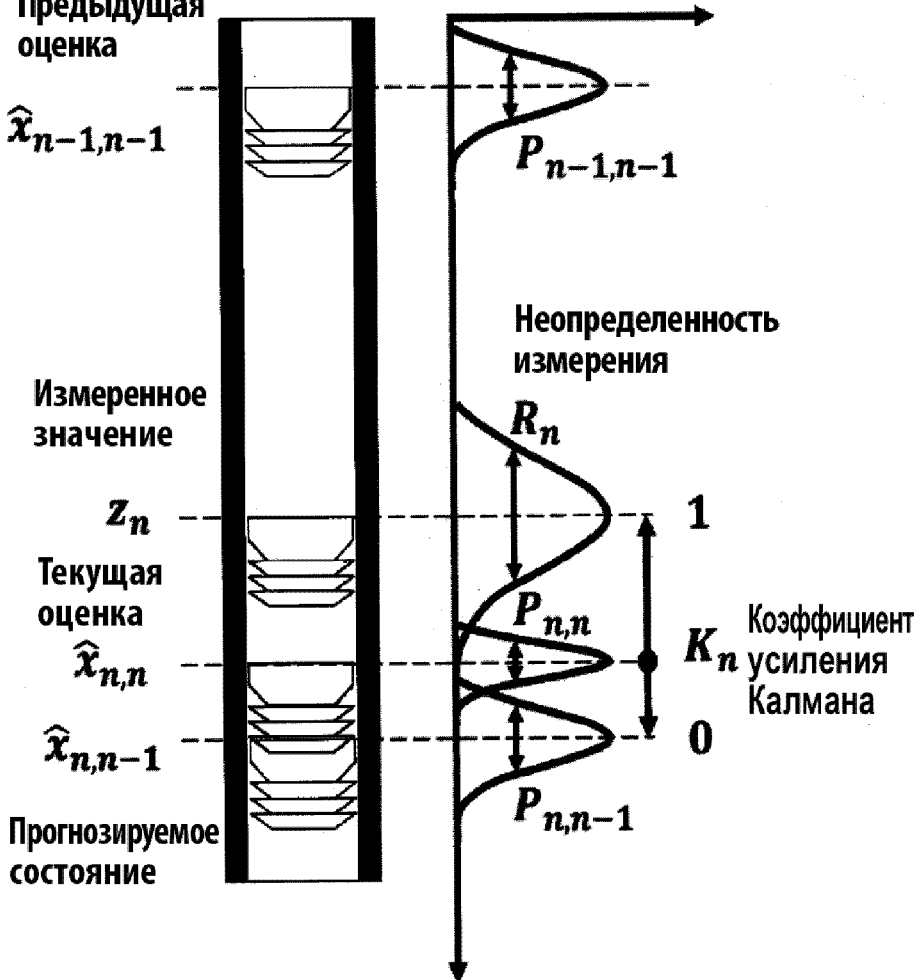
Измеренное значение

$$\mathbf{Z}_n$$

Текущая оценка

 $\hat{x}_{n,n}$ $\hat{x}_{n,n-1}$

Прогнозируемое состояние



Фиг. 5

Уравнение нелинейного состояния

$$\hat{x}_{n,n-1} = f(\hat{x}_{n-1,n-1}, u_n)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} h \\ d \end{bmatrix}}_{\hat{x}_{n,n-1}} = \underbrace{\begin{bmatrix} h \\ d \end{bmatrix}}_{\hat{x}_{n-1,n-1}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{4v_n}{\pi d^2} \\ 0 \end{bmatrix}}_{u_n}$$

Векторы состояния Вектор управления

Ковариационная экстраполяция

$$P_{n,n-1} = F P_{n-1,n-1} F^T + Q$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_h^2 & \sigma_{hd} \\ \sigma_{hd} & \sigma_d^2 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 & -\frac{8v_n}{\pi d^3} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \left(\frac{4\sigma_v}{\pi d^2}\right)^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Ковариация
оценки

Переходы
состояний Якоби

Технологический
шум

Предыдущая
оценка

$\hat{x}_{n-1,n-1}$

Вытесненный
объем

v_n

ID обсадной трубы

d

$\hat{x}_{n,n-1}$

Прогнозируемое
состояние

$P_{n-1,n-1}$

h

Глубина
пробки

$P_{n,n-1}$

Фиг. 6

Вычисление коэффициента усиления Калмана

$$K_n = \frac{P_{n,n-1}}{P_{n,n-1} + R_n}$$

Обновление оценки измерением

$$\hat{x}_{n,n} = \hat{x}_{n,n-1} + K_n(z_n - \hat{x}_{n,n-1})$$

Измерения:

- Согласование отражательной способности
- Корреляция импульса муфты
- Определение скорости перемещения пробки

$\begin{bmatrix} h \\ d \end{bmatrix}_n$

Обновление неопределенности оценки

$$P_{n,n} = (I - K_n)P_{n,n-1}(I - K_n)^T + K_n R_n K_n^T$$

Измеренное значение

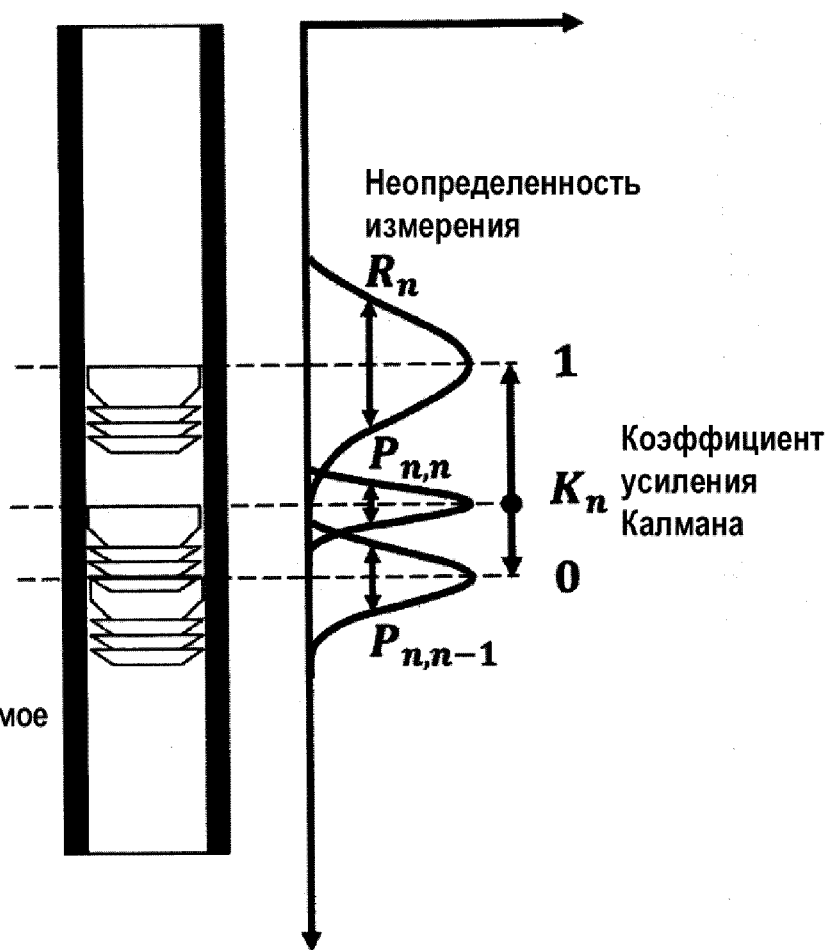
z_n

Текущая оценка

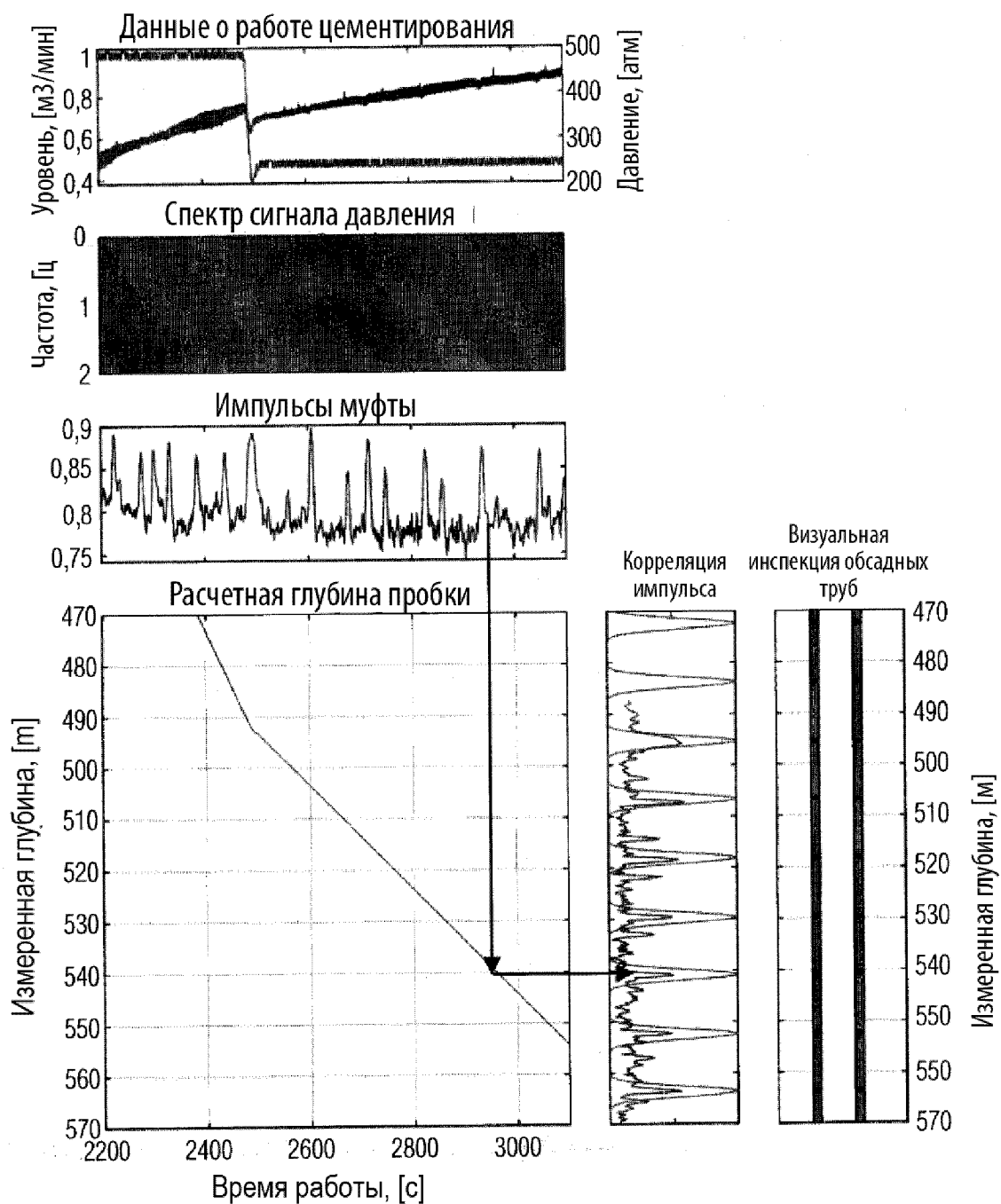
$\hat{x}_{n,n}$

$\hat{x}_{n,n-1}$

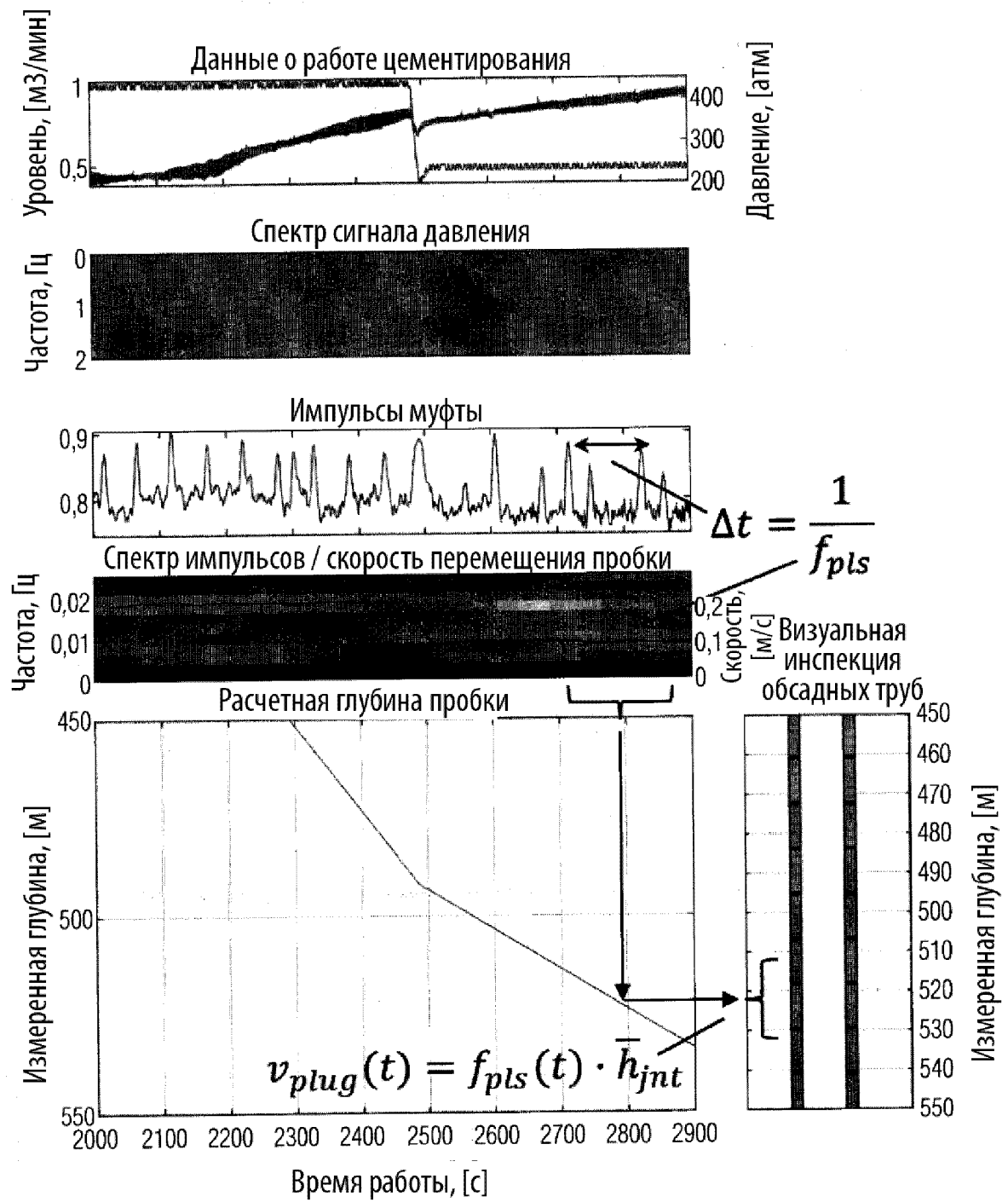
Прогнозируемое состояние



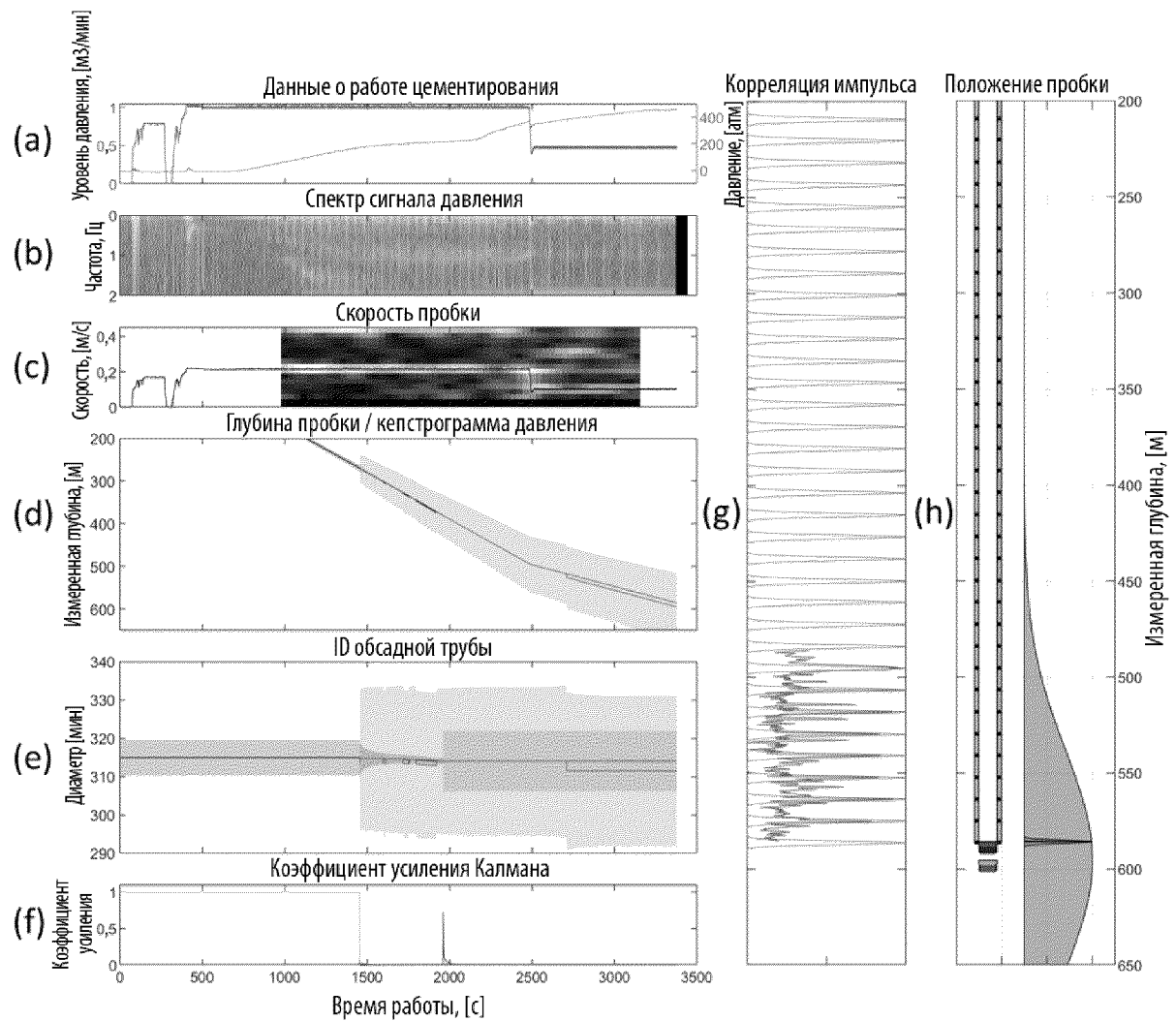
Фиг. 7



Фиг. 8



Фиг. 9



Фиг. 10