

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **037631**

(13) **B1**

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

(45) Дата публикации и выдачи патента  
**2021.04.23**

(51) Int. Cl. *E21B 47/12* (2006.01)

(21) Номер заявки  
**202000233**

(22) Дата подачи заявки  
**2020.07.14**

---

(54) **СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В СКВАЖИНЕ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОРЕЗОНАНСНЫХ ДАТЧИКОВ БЕЗ ЭЛЕКТРОНИКИ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ**

---

(43) **2021.04.22**

(74) Представитель:

(96) **2020000060 (RU) 2020.07.14**

**Котлов Д.В., Яремчук А.А. (RU)**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:  
**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ  
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "Тота  
Системс" (RU)**

(56) **US-A1-20030101822  
RU-C1-2474688  
RU-C1-2249690  
SU-A1-1698864  
CN-A-1570351**

(72) Изобретатель:  
**Вахитов Ильшат Дамирович, Арбузов  
Андрей Александрович, Партс Яан  
Адольфович (RU)**

---

(57) Изобретение относится к измерительной технике, а именно к приборам, используемым в промышленных скважинах для определения физических величин в одной или множестве точек. Способ включает размещение в контролируемых точках скважины одного и более низкочастотных пьезорезонансных датчиков, соединенных параллельно между собой соединительным кабелем с вынесенной электронной аппаратурой. При этом осуществляют генерацию сигнала возбуждения колебаний низкочастотных пьезорезонансных датчиков широкополосным электрическим сигналом посредством вынесенной электронной аппаратуры. После генерации сигнала возбуждения низкочастотных пьезорезонансных датчиков прекращают генерацию сигнала возбуждения колебаний низкочастотных пьезорезонансных датчиков и переключают вынесенную электронную аппаратуру на ввод. В режиме свободных колебаний низкочастотных пьезорезонансных датчиков осуществляют прием измерительного сигнала, содержащего затухающие синусоиды. Определяют спектр измерительного сигнала. Спектр содержит резонансные пики в количестве, соответствующем количеству размещенных низкочастотных пьезорезонансных датчиков. По положению максимума каждого пика определяют резонансную частоту соответствующего низкочастотного пьезорезонансного датчика. Определяют физические величины в контролируемых точках скважины по известным зависимостям резонансной частоты низкочастотных пьезорезонансных датчиков от соответствующих значений измеряемых физических величин. Вынесенная электронная аппаратура состоит из микроконтроллера, соединенного с цифроаналоговым преобразователем, который соединен с буферным усилителем, который в свою очередь соединен с аналоговым коммутатором, соединенным с входным усилителем измерительного сигнала, который соединен с аналогово-цифровым преобразователем, соединенным с упомянутым микроконтроллером. Аналоговый коммутатор посредством соединительного кабеля подключен к скважинным пьезорезонансным датчикам. Низкочастотные пьезорезонансные датчики выполнены с рабочей полосой частот, лежащей внутри рабочей полосы частот упомянутого соединительного кабеля. Использование заявленного изобретения позволяет расширить диапазон рабочих температур измерительного оборудования и увеличить максимальное расстояние между датчиком и вынесенной электроникой, а также повысить точность и помехоустойчивости измерений.

---

**B1**

**037631**

**037631**

**B1**

### Область техники

Изобретение относится к измерительной технике, а именно к приборам, используемым в промышленных скважинах для определения физических величин в одной или множестве точек. Более конкретно настоящее изобретение относится к приборам, используемым в скважине для определения давления, температуры, состава флюида, индикации расхода, определения распределения физических величин по длине скважины и измерения других величин, которые можно свести к изменению давления, температуры или импеданса.

### Уровень техники

Из уровня техники известен способ измерения пространственного распределения температуры и устройство для его осуществления (см. RLJ 2194956, G01K 7/00, опубликовано 20.12.2002). Известен способ измерения пространственного распределения температуры путем помещения в контролируемые точки множества термочувствительных датчиков, соединенных параллельно двухпроводной линией, подачи на один из входов линии сигнала переменного напряжения и регистрации входного переменного тока  $i_{bx}(t)$ . В качестве термочувствительных датчиков используют кварцевые пьезорезонансные датчики с различными резонансными частотами  $\omega_{p1}, \omega_{p2}, \dots, \omega_{pi}, \dots, \omega_{pN}$ , в качестве сигнала переменного напряжения, подаваемого на один из входов двухпроводной линии, используют сигнал со спектром, перекрывающим частотный диапазон кварцевых пьезорезонансных датчиков. Способ измерения пространственного распределения температуры (его второй вариант) осуществляется путем помещения в контролируемые точки множества термочувствительных датчиков, причем в качестве сигнала переменного напряжения, подаваемого на один из входов двухпроводной линии, используют сигнал с частотной модуляцией в диапазоне резонансных частот кварцевых пьезорезонансных датчиков. Устройство, реализующее способ измерения пространственного распределения температуры, содержит множество термочувствительных датчиков, параллельно соединенных двухпроводной линией, соединенной с регистратором, который соединен с источником переменного напряжения. В качестве термочувствительных датчиков использованы кварцевые пьезорезонансные датчики с различными резонансными частотами  $\omega_{p1}, \omega_{p2}, \dots, \omega_{pi}, \dots, \omega_{pN}$ , регистратор содержит последовательно соединенные схему согласования, регистратор амплитуды переменного тока, анализатор спектра, блока обработки и индикации, в качестве источника переменного напряжения использован генератор сигнала со спектром, перекрывающим частоты кварцевых пьезорезонансных датчиков.

Из уровня техники также известен способ измерения пространственного распределения температуры и устройство для его осуществления (RU 2206878, G01K 7/00, опубликовано 20.06.2003). Способ измерения пространственного распределения температуры осуществляется путем помещения в контролируемые точки  $N$  термочувствительных датчиков, соединенных параллельно двухпроводной линией. В качестве термочувствительных датчиков используют кварцевые пьезорезонансные датчики с различными резонансными частотами. После регистрации входного переменного тока  $i_{bx}(t)$  вычисляют его амплитудно-частотный спектр  $S(\omega)$ . Далее осуществляют первое измерение резонансных частот кварцевых пьезорезонансных датчиков по положению максимумов амплитудно-частотного спектра  $S(\omega)$ . Затем регистрируют входной переменный ток  $i_{bx}(t)$  двухпроводной линии, вычисляют его амплитудно-частотный спектр  $S(\omega)$  и осуществляют второе измерение резонансных частот кварцевых пьезорезонансных датчиков по положению максимумов амплитудно-частотного спектра  $S(\omega)$ , исходя из которых определяют искомую температуру в контролируемых точках по предварительно экспериментально найденным или теоретически известным зависимостям резонансной частоты кварцевых пьезорезонансных датчиков от температуры  $\omega_{pi}(t)$ . Устройство для измерения пространственного распределения температуры содержит  $N$  термочувствительных датчиков, параллельно соединенных двухпроводной линией, регистратор и источник переменного напряжения. В качестве термочувствительных датчиков использованы кварцевые пьезорезонансные датчики с различными резонансными частотами. В качестве источника переменного напряжения использован генератор многочастотного сигнала. Технический результат, на выполнение которого направлено данное изобретение, выражается в повышении точности, помехоустойчивости и расширении температурного диапазона измерения пространственного распределения температуры.

Из уровня техники также известен скважинный кварцевый датчик с минимальным применением электроники (патент РФ № 2648390, E21B 47/06, G01L 9/00, G01L 19/00, G01H 13/00, опубликован 26.03.2018). Известное решение направлено на контроль давления, температуры и/или вибрации при неблагоприятных окружающих условиях, не требующих применения активных электронных устройств или контура генератора в таких условиях. В предлагаемой системе и способе предусматривается получение информации от резонансного датчика давления и резонансного или пассивного датчика температуры, соединенных с линией передачи и расположенных на глубине по меньшей мере 100 футов (30,48 м) от установленного на поверхности анализатора цепи. В системе и способе для определения давления, температуры и/или вибрации используются частоты отраженных сигналов от датчиков. Если датчики объединены в одну схему линией передачи или сетевым фильтром, отраженная часть энергии может содержать отраженную энергию передачи. Подаваемый сигнал и отраженная часть проходят по линии передачи, импеданс которой предпочтительно соответствует импедансу системы. При использовании много-

жильного кабеля компенсация влияния длины и температуры кабеля в условиях эксплуатации осуществляется посредством тарировки.

В приведенных выше аналогах в качестве первичного чувствительного элемента используется пьезорезонатор, резонансная частота которого связана с измеряемой величиной. При этом ввод измерительного сигнала осуществляется в режиме вынужденных колебаний. Это приводит к необходимости тщательного согласования импедансов резонаторов и кабеля, а также тарировки системы. Полное согласование невозможно, поэтому возникают дополнительные погрешности измерения, связанные с остаточным рассогласованием, которое, в свою очередь, зависит от множества факторов: температуры кабеля, градиента температуры по длине кабеля, старения кабеля и т.п. Кроме того, приходится выделять слабый отраженный сигнал резонаторов на фоне сильного сигнала возбуждения, что также приводит к дополнительным погрешностям измерения. Все эти недостатки принципиально устраняются при использовании режима свободных колебаний.

Отличительными особенностями заявленного изобретения от приведенных аналогов является разделение во времени процессов возбуждения и съема измерительного сигнала, одновременное возбуждение пьезорезонаторов в режиме вынужденных колебаний и съём измерительного сигнала в режиме свободных колебаний, использование НЧ-резонаторов.

Из уровня техники также известен резонансный датчик давления и температуры (патент US 7299678 B2, 2007) или набор параллельно соединённых резонансных датчиков, различающихся по используемой полосе частот. Каждый резонансный датчик содержит (металлический) вибрирующий элемент, возбуждение и съём измерительного сигнала которого осуществляется с помощью пьезоэлектрических элементов. Съём измерительного сигнала осуществляется в режиме свободных колебаний, но одновременно возбуждается только один из резонаторов, поиск резонансных частот осуществляется с фиксированным шагом, при этом на каждом шаге проверяется одна фиксированная частота.

Существенным отличием нашего подхода является использование пьезорезонаторов, в которых вибратор и цепи возбуждения и съёма измерительного сигнала объединены в один конструктивный элемент. Пьезорезонансные датчики по сравнению с резонансными имеют более высокую добротность, что позволяет при том же разрешении по измеряемой величине соединить однопроводным кабелем большее число датчиков.

### **Сущность изобретения**

Задачей, решаемой заявленным изобретением, является удаление электроники, необходимой для получения и обработки измерительного сигнала, из зоны повышенных температур и расширение диапазона рабочих температур датчика, увеличение максимального расстояния между датчиком и упомянутой электроникой, повышение точности и помехоустойчивости измерений.

Технический результат заявленного изобретения заключается в расширении диапазона рабочих температур, в увеличении максимального расстояния между датчиком и вынесенной электроникой, а также в повышении точности и помехоустойчивости измерений.

Указанный технический результат достигается тем, что размещают в контролируемые точки скважины один и более низкочастотных пьезорезонансных датчиков, соединённых параллельно между собой соединительным кабелем с вынесенной электронной аппаратурой, осуществляют генерацию сигнала возбуждения колебаний низкочастотных пьезорезонансных датчиков широкополосным электрическим сигналом посредством вынесенной электронной аппаратуры, после генерации сигнала возбуждения низкочастотных пьезорезонансных датчиков прекращают генерацию сигнала возбуждения колебаний низкочастотных пьезорезонансных датчиков и переключают вынесенную электронную аппаратуру на ввод, в режиме свободных колебаний низкочастотных пьезорезонансных датчиков осуществляют прием измерительного сигнала, содержащего затухающие синусоиды, и определяют спектр измерительного сигнала, при этом спектр содержит резонансные пики в количестве, соответствующем количеству размещённых низкочастотных пьезорезонансных датчиков, и по положению максимума каждого пика определяют резонансную частоту соответствующего низкочастотного пьезорезонансного датчика, определяют физические величины в контролируемых точках скважины по известным зависимостям резонансной частоты низкочастотных пьезорезонансных датчиков от соответствующих значений измеряемых физических величин.

В частном случае реализации заявленного изобретения вынесенную электронную аппаратуру размещают на устье скважины или размещают в зоне скважины, свободной от воздействия повышенных температур.

В частном случае реализации заявленного изобретения соединение низкочастотных пьезорезонансных датчиков с вынесенной электронной аппаратурой осуществляют посредством одножильного соединительного кабеля или посредством соединительного кабеля, выполненного в виде экранированной витой пары.

В частном случае реализации заявленного изобретения дополнительно осуществляют диагностику обрыва и замыкания соединительного кабеля.

В частном случае реализации заявленного изобретения разделяют на несколько диапазонов общую полосу частот, занимаемую датчиками, и осуществляют последовательное возбуждение и съём измери-

тельного сигнала последовательно диапазон за диапазоном, при этом в каждом диапазоне все резонаторы возбуждаются одновременно.

В частном случае реализации заявленного технического решения дополнительно контролируют работоспособность низкочастотных пьезорезонансных датчиков по уровню и затуханию полезного сигнала.

В частном случае реализации заявленного изобретения физические величины измеряют в одной точке скважины.

В частном случае реализации заявленного изобретения физические величины измеряют в разных точках скважины.

В частном случае реализации заявленного изобретения в качестве физических величин измеряют давление и температуру.

В частном случае реализации заявленного изобретения измеряют поле температуры по рабочему интервалу скважины с использованием множества датчиков температуры, расположенных с заданным шагом в этом интервале.

В частном случае реализации заявленного изобретения по измеренному полю температуры на разных режимах работы скважины вычисляют профили притока и приемистости.

В частном случае реализации заявленного изобретения дополнительно устанавливаются опорные низкочастотные пьезорезонансные датчики в качестве идентификатора системы скважинных датчиков.

Указанный технический результат также достигается тем, что устройство определения физических величин в скважине содержит размещенные в скважине множество соединенных параллельно низкочастотных пьезорезонансных датчиков и вынесенную электронную аппаратуру получения и обработки измерительного сигнала, соединенную с упомянутыми датчиками посредством соединительного кабеля, при этом вынесенная электронная аппаратура состоит из микроконтроллера, соединенного с цифроаналоговым преобразователем, который соединен с буферным усилителем, который в свою очередь соединен с аналоговым коммутатором, соединенным с входным усилителем измерительного сигнала, который соединен с аналого-цифровым преобразователем, соединенным с упомянутым микроконтроллером, а аналоговый коммутатор посредством соединительного кабеля подключен к скважинным пьезорезонансным датчикам, причем низкочастотные пьезорезонансные датчики выполнены с рабочей полосой частот, лежащей внутри рабочей полосы частот упомянутого соединительного кабеля.

В частном случае реализации заявленного изобретения соединительный кабель выполнен одножильным или выполнен в виде экранированной витой пары.

В частном случае реализации заявленное изобретение выполнено с возможностью эксплуатации при температурах до 500-1000°C.

В качестве первичных чувствительных элементов используются низкочастотные пьезорезонансные датчики, рабочая полоса частот которых лежит внутри рабочей полосы частот соединительного кабеля, длина которого может составлять несколько километров, съём измерительного сигнала осуществляется в режиме свободных колебаний, что исключает из спектра измерительного сигнала спектр сигнала возбуждения, что в свою очередь устраняет влияние соединительного кабеля на результаты измерения (за исключением ослабления сигнала) и повышает точность измерений.

#### **Краткое описание чертежей**

Детали, признаки, а также преимущества настоящего изобретения следуют из нижеследующего описания вариантов реализации заявленного технического решения с использованием чертежей, на которых показано:

фиг. 1 - структурно-функциональная схема измерительной системы;

фиг. 2 - пример измерительной системы на параллельно соединённых пьезорезонансных датчиках (ПРД):

а) характеристика преобразования;

б) амплитудно-частотная характеристика (спектр);

в) схема соединений.

На фигурах цифрами обозначены следующие позиции:

1 - вынесенная аппаратура; 2 - соединительный кабель; 3 - скважинные пьезорезонансные датчики; 4 - микроконтроллер; 5 - АЦП; 6 - ЦАП; 7 - буферный усилитель; 8 - аналоговый коммутатор; 9 - входной усилитель.

#### **Раскрытие изобретения**

Устройство определения физических величин в скважине состоит из вынесенной аппаратуры (1) получения и обработки измерительного сигнала пьезорезонансных датчиков (3), скважинных пьезорезонансных датчиков (3), соединённых параллельно, и соединительного кабеля (2), соединяющего вынесенную аппаратуру (1) и упомянутые пьезорезонансные датчики (3), размещенные в скважине.

Вынесенная аппаратура (1) состоит из микроконтроллера (4) вынесенной аппаратуры. Выходы микроконтроллера (4) соединены со входом цифроаналогового преобразователя (6). Выходы цифроаналогового преобразователя (6) соединены с входом буферного усилителя (7), выходы которого соединены с аналоговым коммутатором (8).

Выходы аналогового коммутатора (8) посредством соединительного кабеля (2) подключены к скважинным пьезорезонансным датчикам (3). Пьезорезонансные датчики (3) соединены параллельно.

Аналоговый коммутатор (8) также соединен с входным усилителем (9) измерительного сигнала, выходы которого соединены с входами аналого-цифрового преобразователя (5), выходы которого соединены с входами микроконтроллера (4).

Работает устройство следующим образом. Микроконтроллер (4) формирует сигнал возбуждения, который преобразуется в аналоговый вид при помощи цифроаналогового преобразователя (6), усиливается буферным усилителем (7) и через аналоговый коммутатор (8) подается в кабель (2).

По завершении интервала возбуждения кабель (2) отсоединяется от буферного усилителя (7) и подключается ко входному усилителю (9) измерительного сигнала.

Измерительный сигнал представляет собой сумму затухающих синусоид с частотами собственных колебаний пьезорезонансных датчиков (3).

Усиленный измерительный сигнал оцифровывается при помощи аналого-цифрового преобразователя (5) и поступает в микроконтроллер (4). Микроконтроллер (4) записывает реализацию измерительного сигнала, вычисляет спектр этого сигнала, по максимумам спектра определяет частоты собственных колебаний пьезорезонансных датчиков (3), далее по измеренным значениям частоты и известным характеристикам преобразования датчиков определяются оценки измеряемых физических величин.

При этом точность измерений повышается за счёт использования пьезорезонансных датчиков, включения вклада сигнала возбуждения в измерительный сигнал, упрощения цепи ввода сигнала (исключения схем согласования), использования на входе малошумящего усилителя, упрощения модели измерительного сигнала и использования связанных с ним точных методов оценки частоты, всё это обеспечивается в конечном итоге за счёт использования режима свободных колебаний.

В качестве пьезорезонансных датчиков использованы низкочастотные пьезорезонаторы камертонного типа с колебаниями изгиба. Используемые низкочастотные резонаторы согласованы с полосой пропускания соединительного кабеля.

Помехоустойчивость дополнительно может быть улучшена за счёт использования вместо одножильного кабеля (жила плюс броня) экранированной "витой пары".

Низкочастотные резонаторы имеют, как правило, частоты от 30 до 70 кГц. Это позволяет значительно увеличить максимально возможную длину кабеля. Так, при применении высокочастотных пьезорезонаторов возможная длина кабеля составляет от 30 до 600 м. При использовании низкочастотных резонаторов возможно использование кабеля с длиной порядка 3 км, и имеется потенциальная возможность увеличения длины кабеля до 6-10 км. Увеличение длины кабеля возможно за счёт использования пьезорезонаторов с меньшими рабочими частотами и/или соединительного кабеля с более широкой полосой частот, что, в свою очередь, достигается снижением погонного сопротивления кабеля, например, за счёт увеличения его диаметра, за счет использования проводников с меньшим удельным сопротивлением, снижения потерь в изоляторе, а также переходом от одножильного кабеля к двухжильному на основе витой пары, что дополнительно снижает уровень помех.

Также в заявленном изобретении применяют высокотемпературные пьезорезонансные датчики. За счёт использования высокотемпературных пьезорезонансных датчиков и удаления электроники из зоны повышенных температур расширяется диапазон рабочих температур заявленного устройства.

Достигается возможность эксплуатации заявленного устройства в широком диапазоне рабочих температур (от -270 до 500-1000°C) и в других сложных условиях.

Существуют другие пьезоматериалы, например лангасит, расширяющие потенциальный диапазон температур до примерно 1000°C. Перечень сложных условий этим не ограничивается. Например, пьезорезонансные датчики также устойчиво работают при повышенном уровне радиации, при пониженных (криогенных) температурах (вплоть до -269°C).

Кроме того, низкочастотные резонаторы характеризуются намного более чистым моночастотным спектром в широкой полосе частот в отличие от высокочастотных резонаторов, спектр которых изобилует множеством трудно контролируемых побочных резонансов в области рабочих частот, в результате чего трудно подобрать несколько резонаторов, которые могут быть подключены к одному и тому же кабелю. На низкочастотных резонаторах, напротив, можно строить системы, в которых к одному и тому же одножильному кабелю подключены 100 и более резонаторов.

Другая полезная особенность пьезорезонансных датчиков заключается в том, что информация об измеряемой величине заключена в значении резонансной частоты датчика, причём относительное изменение этой частоты в диапазоне измеряемых величин, как правило, невелико (1-10% от номинальной частоты). Это позволяет соединить множество датчиков с разными частотами параллельно при помощи одного и того же кабеля.

Вынесенная электронная аппаратура может располагаться на устье скважины (наземный вариант) или в зоне скважины, свободной от воздействия повышенных температур (скважинный вариант).

Принцип действия измерительной системы на основе параллельно соединённых низкочастотных пьезорезонансных датчиков поясняется на фиг. 2. Частота каждого резонатора в цепочке связана со своей измеряемой величиной. Зависимость определяется на этапе калибровки.

Предполагается, что диапазоны изменения частот не перекрываются, что позволяет однозначно идентифицировать каждый резонанс. Цикл измерения включает возбуждение колебаний в резонаторах с помощью широкополосного электрического сигнала, оценку резонансных частот (например, по положению максимумов амплитудного спектра суммарного выходного сигнала) и восстановление значений измеряемых величин.

Базовая концепция получения и обработки измерительного сигнала вместе с исходными свойствами пьезорезонансных датчиков, их потенциальными возможностями и дополнительными улучшениями позволяет получить набор ключевых свойств измерительной системы, в том числе следующие:

возможна эксплуатация в широком диапазоне рабочих температур (от -270 до 500-1000°C) и в других сложных условиях;

высокая точность и стабильность пьезорезонансных датчиков позволяют выполнять точные измерения длительное время без промежуточных проверок и калибровок;

длина соединительного кабеля может составлять несколько (3 и более) км;

параллельно можно соединить множество датчиков (100 и более);

опрос всех пьезорезонансных датчиков осуществляется одновременно;

не требуется использование многожильного кабеля;

можно единообразно измерять множество различных физических величин (давление, температуру, состав флюида, расход и другие величины, которые можно свести к изменению давления, температуры или импеданса);

не требуется специальное согласование импедансов резонаторов и кабеля и принятие специальных мер по подавлению вспомогательных сигналов (возбуждения);

возможно точное измерение как частоты, так и добротности резонаторов, что, в частности, позволяет различать полезные резонансы и периодические помехи;

возможен контроль работоспособности датчиков по уровню и затуханию полезного сигнала;

как показала практика, работоспособность системы сохраняется при нарушении герметизации (протекании) прибора и/или кабеля и уменьшении параллельного сопротивления (короткого замыкания) до 50-100 Ом;

имеются способы диагностики обрывов и замыкания кабеля, защиты от замыканий в нижнем сегменте кабеля подключённых к нему датчиков, что сохраняет частичную работоспособность измерительной системы.

Простейшая диагностика на обрыв или замыкание кабеля может быть осуществлена измерением сопротивления между проводниками на конце кабеля. Для диагностики обрыва на конце кабеля устанавливается резистор с сопротивлением, превышающим суммарное сопротивление кабеля. В случае обрыва сопротивление на конце кабеля возрастает, а в случае замыкания - уменьшается.

Для защиты от замыкания в нижнем сегменте кабеля и подключённых к нему датчиков они отделяются от верхнего сегмента кабеля и подключённых к нему датчиков резисторами с сопротивлением порядка 100 Ом. Это, с одной стороны, не приводит к значительному уменьшению полезного сигнала от датчиков, подключённых к верхнему сегменту кабеля, с другой стороны, позволяет получить измерительный сигнал от датчиков, подключённых к верхнему сегменту кабеля в случае замыкания в нижнем сегменте.

В отличие от многих других датчиков, таких как термометр сопротивления, термомпара, тензопреобразователь давления и т.п., в пьезорезонансных датчиках выходная величина недоступна для непосредственного измерения (омметром, вольтметром и т.п.), а является параметром измерительного сигнала.

Таким образом, возникает задача получения и обработки этого сигнала. Сигнал представляет собой электрические колебания с частотой, близкой к собственной частоте пьезорезонансного датчика. Если к одному кабелю подключено множество датчиков, то выходным сигналом будет сумма колебаний с разными частотами. Помимо полезного сигнала следует иметь в виду наличие помех и шумов, которые, в свою очередь, разделяются на внешние и внутренние. К числу (неизбежно возникающих) внутренних помех относится сигнал возбуждения пьезорезонаторов. Для его подавления осуществляют тарировку кабеля, включающую определение его амплитудно-частотной характеристики, определяют математическую или физическую модель кабеля и/или сигнала возбуждения для его вычитания из измерительного сигнала и т.п.

Различают три режима работы пьезорезонатора:

- а) автоколебательный;
- б) вынужденных колебаний;
- в) свободных колебаний.

В автоколебательном режиме пьезорезонатор включается в контур обратной связи усилителя. Режим автоколебаний создаёт наиболее мощный (помехоустойчивый) и удобный для дальнейшей обработки измерительный сигнал, но наименее пригоден для рассматриваемой системы, поскольку связан с двумя существенными ограничениями:

а) требует сравнительно близкого размещения электроники (в большинстве случаев расстояние между усилителем и резонатором не может превышать 1 м);

б) имеются сложности с одновременным возбуждением колебаний на нескольких частотах.

В режиме вынужденных колебаний источником сигнала возбуждения является внешний генератор качающейся частоты, а пьезорезонатор играет роль полосового фильтра, изменяющего амплитуду и фазу сигнала на частотах вблизи собственной резонансной частоты. Он позволяет заметно (в сотни раз) увеличить длину соединительного кабеля. При этом требуется тщательное согласование импедансов кабеля и пьезорезонатора либо использование других методов снижения влияния кабеля на выходной измерительный сигнал.

В режиме свободных колебаний пьезорезонатор выполняет свободные затухающие колебания, т.е. резонатор играет роль активного источника измерительного сигнала. Предварительно возбуждают данные колебания, для чего может использоваться режим автоколебаний или вынужденных колебаний. В режиме свободных колебаний осуществляют разделение во времени процессов возбуждения колебаний в пьезорезонансных датчиках и съём выходного измерительного сигнала, возбуждение в режиме вынужденных колебаний, съём в режиме свободных колебаний.

Заявленный способ характеризуется разделением во времени процессов возбуждения и съёма измерительного сигнала, одновременным возбуждением пьезорезонаторов в режиме вынужденных колебаний и съёмом измерительного сигнала в режиме свободных колебаний.

Заявленный способ позволяет осуществлять измерение физических полей (температуры, давления и других) по длине скважины или контролируемого интервала скважины. Для этого в контролируемом интервале скважины с требуемым шагом по глубине размещается множество пьезорезонансных датчиков, измеряющих требуемую физическую величину. Контролируемый интервал скважины и шаг по глубине выбирается исходя из условий измерительной задачи и требуемого разрешения по глубине. В простейшем случае выбирается постоянный шаг по глубине. Может быть также реализован переменный шаг по глубине, что позволяет увеличить разрешение по глубине в интервалах, представляющих наибольший интерес по условию измерительной задачи.

По результату измерения поля температур можно судить о герметичности скважинных труб (в месте негерметичности возникают аномалии температурного профиля), интервалах протока скважинной жидкости. По измеренным распределениям температур на разных режимах работы скважины (работающая скважина, кратковременно и длительно остановленная скважина) с учётом теплопроводности и теплоемкости пород и по аналитическим формулам либо при помощи термомоделирования можно вычислить профили притока и приемистости.

При этом существенно, что измерение профилей давления и температуры осуществляются при помощи множества параллельно соединённых пьезорезонансных датчиков изложенным выше способом. Измерения производятся на разных режимах работы скважины (при разном дебите скважины). В результате определяются два или более набора измерений профилей давлений и температур при разном дебите скважины. Далее в термогидродинамическом симуляторе изменением модельных параметров скважины добиваются воспроизведения полученных профилей давления и температуры. Значения модельных параметров (профиля притока или приемистости) являются итоговыми результатами.

Рассмотрим конкретные примеры реализации способа измерения.

Пример 1. Скважинный датчик давления и температуры, содержащий пьезорезонансные чувствительные элементы давления (один резонатор с диапазоном частот 50.0-52.4 кГц в диапазоне давлений 0-60 МПа), температуры (два резонатора, один из которых выполняет функцию горячего резерва, с номинальными частотами 32.5 и 33.5 кГц и диапазоном изменения частоты 210 Гц в диапазоне температур 0-100°C), а также один опорный резонатор (используемый для идентификации скважинного датчика с частотой 35.7 кГц). Датчик устанавливается на глубине 2 км. Для возбуждения колебаний вынесенная электронная аппаратура генерирует сигнал с частотой, изменяющейся в интервале частот от 32 до 53 кГц. После возбуждения резонаторов вынесенная электронная регистрирующая аппаратура переключается на ввод и оцифровку измерительного сигнала. Измерительный сигнал включает четыре затухающие синусоиды и шум измерения. Определяется спектр реализации измерительного сигнала. Спектр содержит четыре резонансных пика по числу резонаторов. По положению максимума каждого пика определяется резонансная частота соответствующего резонатора. По известной характеристике преобразования определяются значения измеряемых величин.

Пример 2. Сборка из двух скважинных датчиков давления и температуры. Каждый датчик содержит по 4 резонатора так же, как в примере 1. Первый датчик содержит резонатор давления с диапазоном частот 46.7-49.4 кГц в диапазоне давлений 0-60 МПа, резонаторы температуры с номинальными частотами 32.0 и 33.0 кГц, опорный резонатор с частотой 34.4 кГц. Второй датчик содержит резонатор давления с диапазоном частот 50.0-52.4 кГц в диапазоне давлений 0-60 МПа, резонаторы температуры с номинальными частотами 32.5 и 33.5 кГц, опорный резонатор с частотой 35.7 кГц. Датчики устанавливаются на глубине 2 км. Один из датчиков используется для определения параметров флюида внутри насосно-компрессорной трубы, второй - снаружи насосно-компрессорной трубы. Получение и обработка измерительного сигнала осуществляется так же, как в примере 1.

Пример 3. Сборка скважинных датчиков, включающая два резонатора давления и 100 резонаторов температуры, расположенных с шагом 1 м по длине контролируемого участка ствола скважины (100 м).

Первый резонатор давления имеет диапазон частот 46.7-49.4 кГц в диапазоне давлений 0-60 МПа, второй резонатор давления имеет диапазон частот 50.0-52.4 кГц в диапазоне давлений 0-60 МПа, номинальные частоты резонаторов температуры распределены в полосах частот 30-46 кГц, и 53-70 кГц с постоянным отношением номинальных частот соседних резонаторов. Первый резонатор давления устанавливается на глубине 1.1 км, второй резонатор давления устанавливается на глубине 1.0 км, между ними с шагом 1 м устанавливаются резонаторы температуры в порядке увеличения их номинальных частот. Получение и обработка измерительного сигнала осуществляется так же, как в примере 1.

Пример 4. Сборка скважинных датчиков, включающая два резонатора давления и 100 резонаторов температуры, расположенных в эксплуатационной скважине, добывающей нефть из пласта, расположенного на глубинах от 1050 (кровля пласта) до 1070 м, с шагом 1 м в интервале глубин от 1.1 км (забой скважины) до 1.0 км, как в примере 3. Получение и обработка измерительного сигнала осуществляется так же, как в примере 1, при этом определяются забойное давление, давление на кровле пласта и профиль температур. На первом режиме с дебитом 50 м<sup>3</sup>/сут. скважина работает постоянно. На втором режиме скважина временно (на 3 суток) переводится на повышенный дебит 70 м<sup>3</sup>/сут. В результате определяются два набора измерений профилей температур и повышенный на разных дебитах в установленном режиме работы скважины. В термогидродинамическом симуляторе, на основе полученных данных, оцениваются относительные дебиты нефти совместно работающих пластов.

Пьезорезонансные датчики могут быть классифицированы по занимаемой области частот. Для достижения заявленного технического результата используются низкочастотные (НЧ) резонаторы, позволяющие (по сравнению с высокочастотными резонаторами) использовать более длинный соединительный кабель, характеризующийся более узкой полосой рабочих частот (рабочая полоса частот кабеля уменьшается при увеличении его длины). Дополнительное преимущество НЧ-резонаторов заключается в том, что они имеют чистый спектр, что упрощает параллельное соединение множества пьезорезонансных датчиков.

Собственно возможность разделить во времени процессы возбуждения и съема колебаний также обусловлена применением низкочастотных резонаторов (для высокочастотных такое разделение осложняется тем, что переходные процессы при переходе от одного режима к другому сравнимы по длительности с временем затухания собственных колебаний).

#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ определения физических величин в скважине, в котором размещают в контролируемые точки скважины один и более низкочастотных пьезорезонансных датчиков, соединенных параллельно между собой и соединенных соединительным кабелем с вынесенной электронной аппаратурой;

осуществляют генерацию сигнала возбуждения колебаний низкочастотных пьезорезонансных датчиков широкополосным электрическим сигналом посредством вынесенной электронной аппаратуры;

после генерации сигнала возбуждения низкочастотных пьезорезонансных датчиков прекращают генерацию сигнала возбуждения колебаний низкочастотных пьезорезонансных датчиков и переключают вынесенную электронную аппаратуру на ввод;

в режиме свободных колебаний низкочастотных пьезорезонансных датчиков осуществляют прием измерительного сигнала, содержащего затухающие синусоиды; и

определяют спектр измерительного сигнала, при этом спектр содержит резонансные пики в количестве, соответствующем количеству размещенных низкочастотных пьезорезонансных датчиков; и

по положению максимума каждого пика определяют резонансную частоту соответствующего низкочастотного пьезорезонансного датчика;

определяют физические величины в контролируемых точках скважины по известным зависимостям резонансной частоты низкочастотных пьезорезонансных датчиков от соответствующих значений измеряемых физических величин.

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что вынесенную электронную аппаратуру размещают на устье скважины или размещают в зоне скважины, свободной от воздействия повышенных температур.

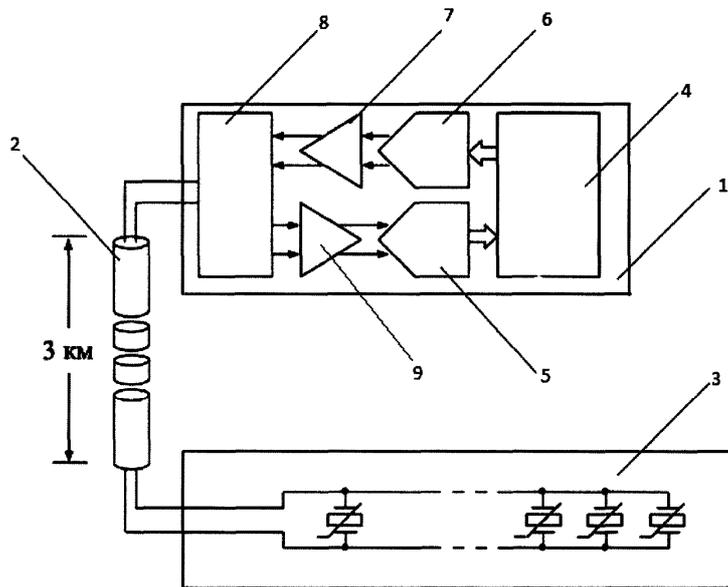
3. Способ по п.1, отличающийся тем, что соединение низкочастотных пьезорезонансных датчиков с вынесенной электронной аппаратурой осуществляют посредством одножильного соединительного кабеля или посредством соединительного кабеля, выполненного в виде экранированной витой пары.

4. Способ по п.1, отличающийся тем, что дополнительно осуществляют диагностику обрыва и замыкания соединительного кабеля.

5. Способ по п.1, отличающийся тем, что разделяют на несколько диапазонов общую полосу частот, занимаемую датчиками, и осуществляют последовательное возбуждение и съём измерительного сигнала последовательно диапазон за диапазоном, при этом в каждом диапазоне все резонаторы возбуждаются одновременно.

6. Способ по п.1, отличающийся тем, что дополнительно контролируют работоспособность низкочастотных пьезорезонансных датчиков по уровню и затуханию полезного сигнала.

7. Способ по п.1, отличающийся тем, что физические величины измеряют в одной точке скважины.
8. Способ по п.1, отличающийся тем, что физические величины измеряют в разных точках скважины.
9. Способ по п.1, отличающийся тем, что в качестве физических величин измеряют давление и температуру.
10. Способ по п.1, отличающийся тем, что измеряют поле температуры по рабочему интервалу скважины с использованием множества датчиков температуры, расположенных с заданным шагом в этом интервале.
11. Способ по п.10, отличающийся тем, что по измеренному полю температуры на разных режимах работы скважины вычисляют профили притока и приемистости.
12. Способ по п.1, отличающийся тем, что дополнительно устанавливаются опорные низкочастотные пьезорезонансные датчики в качестве идентификатора системы скважинных датчиков.
13. Устройство определения физических величин в скважине, содержащее размещенные в скважине множество соединенных параллельно низкочастотных пьезорезонансных датчиков и вынесенную электронную аппаратуру получения и обработки измерительного сигнала, соединенную с упомянутыми датчиками посредством соединительного кабеля,
- при этом вынесенная электронная аппаратура состоит из микроконтроллера, соединенного с цифро-аналоговым преобразователем, который соединен с буферным усилителем, который, в свою очередь, соединен с аналоговым коммутатором, соединенным с входным усилителем измерительного сигнала, который соединен с аналого-цифровым преобразователем, соединенным с упомянутым микроконтроллером,
- а аналоговый коммутатор посредством соединительного кабеля подключен к скважинным пьезорезонансным датчикам,
- причем низкочастотные пьезорезонансные датчики выполнены с рабочей полосой частот, лежащей внутри рабочей полосы частот упомянутого соединительного кабеля.
14. Устройство по п.13, отличающееся тем, что соединительный кабель выполнен одножильным или выполнен в виде экранированной витой пары.
15. Устройство по п.13, отличающееся тем, что выполнено с возможностью эксплуатации при температурах до 500-1000°C.



Фиг. 1

