

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(21) **202091008** (13) **A1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ**

(43) Дата публикации заявки  
2020.07.29

(51) Int. Cl. *G01M 3/24* (2006.01)  
*G01M 5/00* (2006.01)

(22) Дата подачи заявки  
2018.11.14

(54) **СИСТЕМА И СПОСОБ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ЦЕЛОСТНОСТИ ТРУБ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ПРИ ПОМОЩИ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ**

(31) 102017000130593

(72) Изобретатель:

(32) 2017.11.15

Джунта Джузеппе, Бернаскони  
Джанкарло, Синьори Массимо (ИТ)

(33) ИТ

(86) РСТ/ЕР2018/081245

(74) Представитель:

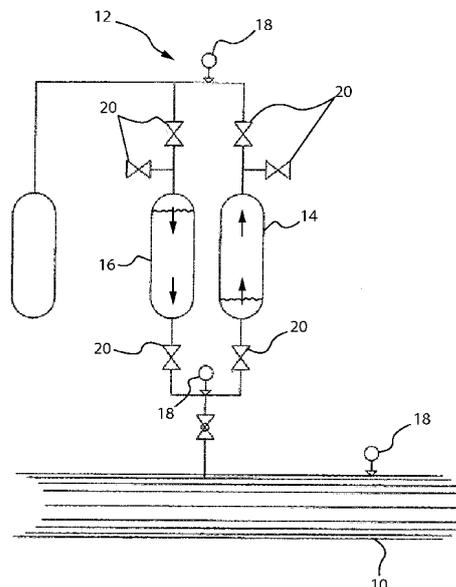
(87) WO 2019/096854 2019.05.23

Медведев В.Н. (РУ)

(71) Заявитель:

ЭНИ С.П.А. (ИТ)

(57) Дано описание системы и способа мониторинга трубы для транспортировки текучей среды с заданным значением давления. Система содержит по меньшей мере одно устройство, генерирующее импульсы давления, гидравлически соединенное с текучей средой, транспортируемой трубой. Каждое устройство, генерирующее импульсы давления, содержит по меньшей мере один первый резервуар, выполненный с возможностью вмещения текучей среды, выходящей из трубы, и поддержания ее при первом значении давления, которое меньше заданного давления текучей среды, транспортируемой трубой, и по меньшей мере один второй резервуар, выполненный с возможностью вмещения текучей среды, выходящей из трубы, и поддержания ее при втором значении давления, которое больше заданного значения давления текучей среды, транспортируемой трубой. Первый резервуар и второй резервуар генерируют соответственно отрицательный импульс давления, вызванный прохождением текучей среды из трубы в первый резервуар, и положительный импульс давления, вызванный прохождением текучей среды из второго резервуара в трубу. Каждое устройство, генерирующее импульсы давления, содержит по меньшей мере один датчик давления, выполненный с возможностью измерения значений давления текучей среды и преобразования их в соответствующие акустические сигналы. Кроме того, система мониторинга содержит по меньшей мере одну измерительную станцию, расположенную вдоль трубы и содержащую один или более виброакустических датчиков, выполненных с возможностью записи акустических сигналов, полученных с устройств, генерирующих импульсы давления.



**A1**

**202091008**

**202091008**

**A1**

## ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

2420-562976EA/042

### СИСТЕМА И СПОСОБ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ЦЕЛОСТНОСТИ ТРУБ ПОД ДАВЛЕНИЕМ ПРИ ПОМОЩИ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

Настоящее изобретение относится к системе и способу дистанционного мониторинга целостности труб под давлением посредством виброакустических источников.

Способы дистанционного мониторинга и неразрушающего контроля труб для транспортировки текучих сред известны. Эти способы мониторинга могут осуществляться, как когда трубы находятся в эксплуатации, то есть, с текучими средами, так и когда завершено опорожнение, и трубы сложены. Эти способы мониторинга обычно обеспечивают обнаружение, местоположение и разделение нижеследующих аномалий:

- засор и отложение твердых веществ;
- механические деформации и вмятины;
- отверстия, трещины и повреждения трубы;
- утечки текучей среды, также в условиях гидравлической проверки;
- соединения, изменения внутреннего диаметра трубы;
- другие геометрические дефекты трубопровода, включая водородное вспучивание;
- граница раздела между разными текучими средами;
- рабочие условия клапанов;
- отслеживание устройств для очистки/контроля, так называемых контрольных калибров трубопровода (P.I.G.).

В настоящее время способы мониторинга труб для транспортировки текучих сред могут осуществляться с помощью способов рефлектометрии. Способы рефлектометрии основаны на передачи неразрушающих сигналов на объект, подлежащий анализу, и на анализе отраженных сигналов для определения аномалии в пройденной среде. В случае труб для транспортировки текучих сред сигналы могут передаваться в виде акустических волн (акустическая импульсная рефлектометрия). Каждое изменение геометрических/упругих параметров системы текучей среды/трубы генерирует отраженный сигнал, который может быть записан и обработан для определения аномалии, которая генерировало его.

Обычно, отраженные сигналы генерируются в результате засоров, деформаций, отверстий, соединений, трещин, утечек, изменений диаметра и контактных поверхностей между различными текучими средами (жидкостями, газами и смесями). Объем исследования с точки зрения максимального расстояния, которое может быть достигнуто, и вида аномалии, является функцией термодинамических свойств текучей среды и внутреннего диаметра трубы, а также полосы частот сигнала анализа, который подан на трубу. Например, для труб под давлением для транспортировки углеводородов (с внутренним диаметром в диапазоне приблизительно 10 см - 1 м) расстояние исследования

может достигать десятки километров.

Некоторые способы мониторинга труб используют в виде сигнала анализа акустический шум, при нормальных условиях присутствующий в транспортируемой текучей среде, который обычно генерируется в результате колебаний давления, обусловленных системой нагнетания. Другие способы мониторинга используют вместо этого активные источники акустических сигналов, которые имеют преимущество (когда это возможно) калибровки для конкретного объекта, для максимизации чувствительности системы и способа мониторинга относительно данной аномалии. Кроме того, активные источники сигналов пригодны для способов периодического мониторинга труб, например, для определения необходимости в осуществлении процессов очистки/контроля при помощи контрольных калибров трубопровода.

Основные принципы и применения способов акустической импульсной рефлектометрии описаны, например,

- Sharp, D.B., «Акустическая импульсная рефлектометрия: обзор способа и некоторых будущих возможностей», Гонконг, 2001 г.;

- Papandroulou, K.A. и др., «Оценка акустической рефлектометрии для обнаружения утечки и засорения»,

Журнал науки и машиностроения, 2008 г.;

- Yunus, U. и др., «Обнаружение местоположения утечки в трубопроводе при помощи акустического сигнала», Научные труды LEICE по теоретическим принципам электроники, связи и информатики, 2008 г.;

- Gong, J., Lambert, M.F., Zecchin, A. C., и Simpson, R., «Экспериментальное подтверждение выделения амплитудно-частотной характеристики и обнаружение утечки с использованием обратного сигнала запроса о повторении», Журнал гидравлических исследований, 54(2), 2016 г.

Документ WO 2008/075066 A2 описывает устройство для определения утечек в водораспределительной сети при помощи процесса быстрого изменения давления посредством закрытия клапанов в этой водораспределительной сети.

Документ EP 2817588 A1 описывает способ определения характеристик трубы, в частности, положения ответвления центральной трубы в сети сброса газообразных и жидких отходов.

Документ WO 2014/005126 A1 описывает способ и устройство для определения рабочих условий трубы для транспортировки текучих сред. Акустический сигнал анализа имеет частоту в диапазоне приблизительно 10-150 кГц. Способ и устройство обеспечивают определение слоя или отложения вещества внутри трубы для транспортировки текучих сред, а также определяют конкретное физическое состояние этой трубы для транспортировки текучих сред.

Документ GB 2517411 A описывает способ и устройство для определения в удаленном режиме надежным и точным способом наличия и положения явлений, известных как «провисания» или «пробки» в трубе для транспортировки текучих сред.

Документ US 2012/0312078 A1 иллюстрирует неподвижное устройство, соединенное с трубой и выполненное с возможностью генерации и передачи периодических акустических сигналов внутри трубы. Подвижное устройство вместо этого вставлено в трубу и содержит или один или более датчиков, выполненных с возможностью измерения условий трубы в окружающей среде подвижного устройства, в то время как это подвижное устройство перемещается внутри трубы, и узел приема акустических сигналов, генерируемых и передаваемых неподвижным устройством.

Документ WO 2014/096019 A1 от имени того же Заявителя использует процессы быстрого изменения давления, генерируемые оборудованием для регулировки потока текучей среды, для получения в трубе для транспортировки текучих сред, параметров распространения процессов быстрого изменения давления (скорость звука и затухание) при краткосрочном и длительном действии для установки и определения места аномалий в трубе.

Документ EP 2944857 A1 от имени того же Заявителя описывает способ размещения и отслеживания устройства контрольных калибров трубопровода, которое перемещается внутри трубы. Способ выполнен с возможностью обработки виброакустического сигнала, генерируемого устройством контрольных калибров трубопровода, когда оно пересекает сварные швы между различными секциями трубы.

Другая система мониторинга (PRIMEFLO®), созданная тем же Заявителем, основана на способе общего неинвазивного способа контроля, выполненного с возможностью создания и анализа переходных процессов в жидкости в трубе для транспортировки текучих сред. Этот способ обеспечивает быструю и эффективную локализацию полного или частичного засоров в скважинах или трубах, установление наличия и внутреннего распределения органических и неорганических отложений в скважинах или трубах для жидкостей (нефтепродукта или воды), контроль скважин или труб для транспортировки газа для определения наличия скоплений жидкости, мониторинг работ по внутреннему контролю/очистке при помощи контрольных калибров трубопровода, особенно, в случае подводных линиях, и обнаружение свойств транспортируемых текучих сред.

Способы рефлектометрии, основанные на электромагнитных волнах, также используются в трубах. Документы US 6472883 B1, US 6194902 B1 и WO 2008/066904 A2 используют локализованные изменения скорости импульсов, которые распространяются вдоль проводящего элемента для установления повреждений, таких как, например, поверхностная коррозия трубы. Документ US 6751560 B1 иллюстрирует систему и способ неинвазивного контроля труб посредством электромагнитных волн.

В основном, способы рефлектометрии могут использоваться для среды/долгосрочного мониторинга труб для транспортировки текучих сред под давлением при использовании статистического и/или дифференциального способа. В этом случае акустическая характеристика трубопровода измеряется, когда известно, что система текучей среды/трубы не имеет аномалий, и затем периодически проверяется посредством

новых получений данных и и сравнения этих данных с опорными данными. Кроме того, когда имеются точные инструменты численного моделирования, измерения рефлектометрии могут быть добавлены в способах обратного преобразования для получения количественной информации о физических свойствах системы текучей среды/трубы. Во всех этих ситуациях важно иметь глубокое знание о сигнале анализа, который должен подаваться на трубу, а также о способности генерировать нужную форму сигнала, максимизируя чувствительность способа мониторинга для конкретной аномалии.

Обычно активные источники акустических волн в жидких веществах образованы посредством выпускных электромагнитных клапанов (включаемых/выключаемых). Относительно газов имеются источники так называемых сигналов с линейной частотной модуляцией, то есть, сигналов, в которых частота изменяется со временем, увеличиваясь (частотно-модулированный импульс с линейным увеличением частоты) или уменьшаясь (частотно-модулированный импульс с линейным уменьшением частоты). В основном, существует множество устройств для генерации акустических волн, пригодных для всех типов текучих сред, хотя эти устройства не могут генерировать сигналы с волновыми формами, которые могут быть выбраны пользователем.

Следовательно, целью настоящего изобретения является создание системы и способа дистанционного мониторинга целостности труб под давлением, которые обеспечивают устранение ограничений упомянутого выше известного уровня техники.

Подробно, целью настоящего изобретения является создание системы и способа дистанционного мониторинга целостности труб под давлением, которые с помощью использования устройств, генерирующих управляемые процессы быстрого изменения давления, обеспечивают генерацию сигналов с волновыми формами, которые могут быть выбраны пользователем без образования утечек текучей среды (жидкости, газа или смесей, таких как, например,  $\text{CO}_2$  или  $\text{H}_2\text{S}$ ) из трубы.

Эта цель в соответствии с настоящим изобретением достигнута посредством создания системы и способа дистанционного мониторинга целостности труб под давлением, как раскрыто в независимых пунктах формулы изобретения.

Другие признаки изобретения ясно показаны на основании зависимых пунктов формулы изобретения, которые являются неотъемлемой частью данного описания.

Признаки и преимущества системы и способа дистанционного мониторинга целостности труб под давлением в соответствии с настоящим изобретением будут более ясно показаны за счет нижеследующего описания, данного в качестве неограничивающего примера, и ссылок на сопроводительные схематичные чертежи, на которых

фиг. 1a - схематичный вид устройства, генерирующего импульсы давления, относящегося к системе дистанционного мониторинга целостности труб под давлением в соответствии с настоящим изобретением;

фиг. 1b - перспективный вид устройства, генерирующего импульсы давления;

фиг. 2 - изображение в виде функции времени волновой формы, генерируемой посредством нарушения, вызванного в промежуточной точке C секции А-В трубы;

фиг.3 - графическое представление способа дистанционного мониторинга целостности труб под давлением в соответствии с настоящим изобретением;

фиг.4 - диаграмма импульсов давления, генерируемых текучей средой, направленной в резервуар низкого давления устройства, генерирующего импульсы, на фиг.1;

фиг.5 - диаграмма импульсов давления, генерируемых текучей средой, удаленной из резервуара высокого давления устройства, генерирующего импульсы, на фиг.1;

фиг.6 - вид типовой трубы под давлением для транспортировки текучих сред, к которой могут применяться система и способ мониторинга в соответствии с настоящим изобретением;

фиг.7 - график процесса быстрого изменения давления, который возникает в точках V22, V20 и V19 трубы на фиг.6 в условиях выпуска текучей среды из устройства, генерирующего импульсы, расположенного в точке V22 трубы на фиг.6;

фиг.8 - график, который показывает в виде функции времени акустические сигналы  $s(t)$ , измеренные и обработанные в точках V20 (над) и V22 (под) трубы на фиг.6;

фиг.9 - график, который показывает в увеличенном виде акустические сигналы  $s(t)$ , измеренные и обработанные в точке V22 трубы на фиг.6;

фиг.10 - график, который показывает процессы быстрого изменения давления, записанные в двоичном коде, например, применения системы и способа мониторинга в соответствии с настоящим изобретением;

фиг.11 - схематичный вид трубы, на которой осуществлялись контрольные испытания, получая значения на фиг.10;

фиг.12 - график, который показывает первый ряд значений величин энергии, полученных из примера применения системы и способа мониторинга, как показано на фиг.10 и 11; и

фиг.13 - график, который показывает ряд значений величин энергии, полученных из примера применения системы и способа мониторинга, как показано на фиг.10 и 11.

Ссылаясь конкретно на фиг.1, изображена система дистанционного мониторинга целостности труб под давлением в соответствии с настоящим изобретением. Система мониторинга применима к обычной трубе 10 для транспортировки текучей среды с заданным значением  $P$  давления. Текучая среда может быть образована жидкостью, газом или смесью жидкости/газа.

Система мониторинга содержит, по меньшей мере, одно устройство 12, генерирующее импульсы давления, гидравлически соединенное с текучей средой, транспортируемой трубой 10. Каждое устройство 12, генерирующее импульсы давления, содержит, по меньшей мере, один первый резервуар 14, выполненный с возможностью вмещения первого заданного количества текучей среды, выходящей из трубы 10, и поддержания этого первого заданного количества текучей среды при первой значении  $P_1$  давления, которое ниже заданного значения  $P$  давления текучей среды, транспортируемой трубой 10. Следовательно, каждое устройство 12, генерирующее импульсы давления,

содержит, по меньшей мере, один второй резервуар 16, выполненный с возможностью вмещения второго заданного количества текучей среды, выходящей из трубы 10 и для поддержания этого второго заданного количества текучей среды при втором значении  $P_2$  давления, которое выше заданного значения  $P$  давления текучей среды, транспортируемой трубой 10.

Первый резервуар 14 низкого давления и второй резервуар 16 высокого давления генерируют, соответственно, отрицательный импульс давления, вызванный за счет прохождения текучей среды из трубы 10 в первый резервуар 14, и положительный импульс давления, вызванный за счет прохождения текучей среды из второго резервуара 16 в трубу 10. Кроме того, каждое устройство 12, генерирующее импульсы давления, содержит, по меньшей мере, один датчик 18 давления, выполненный с возможностью измерения значений давления текучей среды и преобразования этих значений давления в соответствующие сигналы  $s(t)$ , и множество электромагнитных клапанов 20, выполненных с возможностью управления перемещениями текучей среды из трубы 10 в устройство 12, генерирующее импульсы давления, и наоборот.

Следовательно, каждое устройство 12, генерирующее импульсы давления, работает в качестве бинарного и активного источника управляемых импульсов давления противоположного знака для любого типа текучей среды (жидкостей, газов и смесей) со следующими конкретными признаками:

- возможностью генерации бинарных и/или многоуровневых последовательностей отрицательных и положительных импульсов давления способом, который может быть выбран пользователем, и для использования усовершенствованных способов кодирования с целью увеличения отношения сигнала/шума и обнаружения акустических сигналов  $s(t)$ ;

- повторного использования резервуаров, когда первый резервуар 14 заполнен текучей средой, он становится резервуаром высокого давления для обеспечения подачи текучей среды в трубу 10. Одновременно, давление текучей среды во втором резервуаре 16 уменьшается, и этот второй резервуар 16 становится резервуаром низкого давления, который всасывает текучую среду из трубы 10. Это техническое решение предотвращает любой контакт между текучей средой, транспортируемой трубой 10, и окружающей средой, делая устройство, генерирующее акустические сигналы, полностью водонепроницаемым;

- незначительного нарушения гидравлического баланса внутри трубы 10, компенсируя отрицательные и положительные импульсы давления за счет нулевого среднего значения без возможности изменения статических условий текучей среды в трубе и соответствующих акустических постоянных распространения.

Предпочтительно, устройство 12, генерирующее импульсы, может генерировать двоичные сигналы с отрицательными и положительными импульсами с преимуществом использования усовершенствованных схем кодирования волны источника для увеличения отношения сигнала/шума и чувствительности для обнаружения аномалий.

Источник не изменяет гидравлическое равновесие системы текучей среды/трубы в

статических условиях, компенсируя отрицательные и положительные импульсы. Система мониторинга трубы является «замкнутой» и не образует утечку текучей среды в окружающую среду. Кроме того, посредством одновременного использования нескольких устройств 12, оснащенных разгрузочными/загрузочными электромагнитными клапанами, получают дискретное число амплитуд импульсов давления, даже больше двух, увеличивая диапазон последовательности акустических сигналов до многоуровневых кодов.

Система мониторинга содержит, по меньшей мере, одну измерительную станцию 22 или 24 (фиг.2), расположенную вдоль трубы и содержащую один или более виброакустических датчиков, выполненных с возможностью обнаружения акустических сигналов  $s_A(t)$  или  $s_B(t)$ , полученных с одного или более устройств 12, генерирующих импульсы давления. Предпочтительно, система мониторинга содержит, по меньшей мере, одну пару измерительных станций 22 и 24, расположенных на заданном расстоянии друг от друга вдоль трубы 10. Каждая измерительная станция 22 и 24 содержит соответствующие виброакустические датчики, выполненные с возможностью записи акустического сигнала  $s_A(t)$  и  $s_B(t)$ . Непосредственное прохождение на каждую измерительную станцию 22 и 24 акустического сигнала, излучаемого устройствами 12, генерирующими импульсы давления, используется для расчета скорости распространения (скорости звука) и эквивалентной акустической передаточной функции секции А-В трубы 10, расположенной между измерительными станциями 22 и 24.

Труба 10 функционирует подобно волноводу для обеспечения процессов быстрого изменения давления, которые проходят внутри текучей среды под давлением, транспортируемой той же трубой 10. Дискретная схема виброакустических датчиков, таких как, например, датчики давления, гидроакустические (гидрофонические) датчики, датчики ускорения и т.д., относящиеся к соответствующим измерительным станциям 22 и 24, расположенным вдоль трубы 10, записывают как акустические волны, непосредственно генерируемые устройствами 12, генерирующими импульсы давления, так и акустические волны, возможно генерируемые в результате аномалий, которые возникают вдоль трубы 10.

Как показано на фиг.2, и как описано в документе WO 2014/096019 A1 от имени того же Заявителя, пары измерительных станций 22 и 24, расположенных соответственно в точках А и В трубы 10, используются для измерения эффективных параметров распространения (скорости звука и затухания) для осуществления точных стандартных модернизаций рефлектометрии, таких как, например, триангуляции числа раз поступления одной и той же волновой формы акустических сигналов  $s_A(t)$  или  $s_B(t)$ . Данные обрабатываются централизованным блоком обработки данных системы мониторинга.

Основным принципом обработки данных является принцип, в соответствии с которым в трубе 10 колебания режимов перекачивания, регулировки потока через клапаны и наличие активных генераторов давления являются основными источниками процессов быстрого изменения давления, обычно на наконечниках трубы 10. С другой стороны, вдоль трубы 10 также генерируются другие шумы (изменения давления).

Некоторые примеры этих шумов образованы механическими действиями, осуществляемыми рядом с трубой 10, которые передают вибрации этой трубе 10, и/или посредством рассеяния акустических сигналов в процессе перемещения в трубе 10 в соответствии с локализованными уменьшениями диаметра, трубными соединениями, ответвлениями и т.д. Эти «вторичные источники», которые отражают акустические сигналы в процессе перемещения в трубопроводе, могут быть активированы с помощью использования устройств 12, генерирующих импульсы давления.

Способ дистанционного мониторинга целостности труб под давлением в соответствии с настоящим изобретением основан на нижеследующих предположениях:

- труба 10 разделена и проанализирована для множества секций А-В, причем каждая секция А-В трубы 10 находится между парами соседних измерительных станций 22 и 24;

- сигналы, измеренные в А и в В, соответственно,  $s_A(t)$  или  $s_B(t)$ , используются для расчета акустической энергии, излучаемой/рассеянной дискретным множеством точек вдоль секции А-В трубы 10, а не обрабатываются для получения их мгновенной амплитуды;

- если секция А-В трубы 10 содержит точку рассеяния акустических сигналов в процессе перемещения, соответствующая «сигнатура» содержится в записях этих акустических сигналов  $s_A(t)$  и  $s_B(t)$ , выполненных измерительными станциями 22 и 24. «Сигнатура» является замедленным и затухающим вариантом исходной волновой формы, выдаваемой устройствами 12, генерирующими импульсы давления;

- предполагается, что скорость  $v$  звука и коэффициент  $\alpha$  поглощения внутри трубы 10 известны и/или могут быть получены с помощью вычислительных модулирующих устройств. Как описано в документе WO 2014/096019 A1 от имени того же Заявителя, параметры распространения рассчитываются непрерывно, таким образом, что они могут быть непосредственно использованы способом мониторинга.

С другой стороны, акустические сигналы, которые распространяются непосредственно от устройств 12, генерирующих импульсы давления, и измерительных станций 22 и 24, также могут быть использованы для расчета параметров распространения:

- $s_A(t)$  или  $s_B(t)$  обозначают акустические сигналы, записанные измерительными станциями 22 и 24, соответственно, в точках А и В секции А-В трубы 10, где (t) - время;

- $s_A(f)$  или  $s_B(f)$  обозначают преобразования Фурье, соответственно, акустического сигнала  $s_A(t)$  и акустического сигнала  $s_B(t)$ , где (f) - частота этих сигналов;

- $H_{AB}(f)$  обозначает передаточную функцию процесса быстрого изменения давления, который распространяется от точки А до точки В секции А-В трубы 10;

- $v$  обозначает скорость звука внутри текучей среды, которая проходит в трубе 10 от точки А до точки В соответствующей секции А-В трубы 10;

$$\hat{S}_{CA}(f) = \frac{|x_A - x_C| / |x_A - x_B|}{|H_{AB}|} S_A(f) e^{j2\pi f |x_A - x_C| / v}$$

-  $\hat{S}_{CA}(f)$  представляет собой преобразование

Фурье рассчитанного сигнала, который сгенерирован в промежуточной точке С (фиг.9) секции А-В трубы 10 с помощью обратного распространения акустического сигнала  $S_A(t)$ , измеренного в точке А;

-  $\hat{s}_{CA}(t)$  - обратное преобразование Фурье  $\hat{s}_{CA}(f)$  ;

-  $\hat{s}_{CB}(f) = \frac{|x_B - x_C| / |x_A - x_B|}{|H_{AB}|} S_B(f) e^{j2\pi f |x_B - x_C| / v}$  - преобразование Фурье рассчитанного

сигнала, который сгенерирован в промежуточной точке С (фиг.2) секции А-В трубы 10 с помощью обратного распространения акустического сигнала  $S_B(t)$ , измеренного в точке В;

-  $\hat{s}_{CB}(t)$  - обратное преобразование Фурье  $\hat{s}_{CB}(f)$  ;

-  $E_C(x, t) = \int \left[ \int_{t_1}^{t_2} \hat{s}_{CA}(\tau) \cdot \hat{s}_{CB}(t - \tau) d\tau \right] dt$  - интеграл в общем положении  $x$  (общая

промежуточная точка С на фиг.2) вдоль трубы 10 взаимной корреляции временного окна от

$t_1$  до  $t_2$   $\hat{s}_{CA}(t)$  и  $\hat{s}_{CB}(t)$  .

Следовательно, способ дистанционного мониторинга целостности труб под давлением в соответствии с настоящим изобретением включает в себя следующие этапы:

- генерации одного или более акустических сигналов  $s(t)$  одним или более устройствами 12, генерирующими импульсы давления;

- приема двумя соседними измерительными станциями 22 и 24, расположенными, соответственно, в точках А и В трубы 10, акустических сигналов  $S_A(t)$  и  $S_B(t)$ ;

- фильтрации при помощи полосового фильтра и ширины  $W$  полосы пропускания акустических сигналов  $S_A(t)$  и  $S_B(t)$  для поддержания этих акустических сигналов  $S_A(t)$  и  $S_B(t)$  в заданном диапазоне частот, используемых для получения энергии этих акустических сигналов  $S_A(t)$  и  $S_B(t)$ . Для акустических сигналов  $S_A(t)$  и  $S_B(t)$  могут использоваться способы адаптированной фильтрации и обращения свертки, а также алгоритмы адаптивного ослабления шума на основании направления прохождения этих сигналов;

- акустические сигналы  $S_A(t)$  и  $S_B(t)$  обратно распространяются, соответственно, из точки А в точку В и из точки В в точку А секции А-В трубы 10 для дискретного множества точек вдоль этой секции А-В трубы 10 (фиг.3). Расстояние между соседними точками, полученное таким образом, представляет собой, по существу, ожидаемое разрешение. Процесс обратного распространения компенсирует распространение, и он осуществляется с использованием изменения эквивалентной акустической передаточной функции секции А-В трубы 10, которая рассчитывается с использованием акустических сигналов  $S_A(t)$  и  $S_B(t)$ , например, обработки непосредственных прохождений от акустических источников на измерительные станции 22 и 24;

- для каждой точки вдоль секции А-В взаимная корреляция осуществляется в скользящем временном окне между обратно распространёнными акустическими

сигналами  $S_A(t)$  и  $S_B(t)$  с целью выделения потенциальной когерентности. Идеально, акустический сигнал, поступивший из одной точки множества точек, проанализированный и распространенный в точку А и в точку В, правильно «скорректирован» в фазе обратного распространения. Взаимная корреляция просто извлекает соответствующее значение энергии из него. В «бесшумной» точке трубы 10, фактически, обычно не обнаруживается явный сигнал, получающийся в результате ничтожного значения энергии. Продолжительность времени скользящего окна взаимной корреляции может быть приспособлена для периода работы устройства 12, генерирующего импульсы давления;

- для каждой точки множества интеграл определен как функция дискретизированного времени, получая затем матрицу значений энергии. Координаты матрицы являются положениями точек секции трубы между А и В и временем расчета энергии. Множество значений энергии, интегрированных в виде функции времени, образуют карту в зависимости от времени и положения вдоль трубы, на которой возможные аномалии трубы 10 представлены пиками упомянутых значений энергии.

Критерий порогового значения для значения энергии применяется для запуска возможного аварийного сигнала. Пороговое значение необходимо для установки после фазы калибровки системы. Кроме того, поскольку распределение энергии вдоль трубы 10 может отличаться вследствие разных рабочих условий одной и той же трубы, фаза тренировки системы также необходима. Интегрирование энергии осуществляется в ограниченном временном окне и затем повторяется в виде функции длительности временного интервала волновых форм, генерируемых устройством 12, генерирующим импульсы давления (например, от периода времени в диапазоне от десятков минут до нескольких часов), для предотвращения эффектов маскировки или поляризации для будущих событий.

Энергия, рассчитанная на основании акустических сигналов  $S_A(t)$  и  $S_B(t)$ , также может использоваться при помощи дифференциального способа, то есть, посредством вычитания из текущего значения энергии для опорного сценария.

В этом процессе тщательные знания первичной волновой формы являются основными для осуществления надежного способа обращения свертки и адаптивного вычитания.

Множество интегрированных значений энергии в виде функции времени и пространства образует карту, на которой представлены возможные аномалии трубы 10, такие как, например, деформации, трубные соединения, ответвления и т.д., посредством пиков этих значений энергии. Способ мониторинга также может применяться к одному отдельному акустическому сигналу, например,  $S_A(t)$ , записанному во время использования одного устройства 12, генерирующего импульсы давления. Акустический сигнал  $S_A(t)$  автоматически коррелируется после компенсации переменной во времени компенсации распространения, что и в способе адаптированной фильтрации. Результат распространяется обратно и затем интегрируется в виде функции времени. Возможно,

распределение энергии вдоль трубы 10 может сравниваться дифференциальным способом с одним и тем же распределением опорного сценария.

Способ мониторинга, основанный на расчете энергии акустических сигналов, также может применяться для определения внешних помех, действующих на трубу 10, или любого другого действия, обеспечивающего генерацию виброакустических сигналов в конкретном положении вдоль этой трубы 10. В этих случаях не нужно использовать активные источники шума, так как процессы быстрого изменения давления генерируются за счет взаимодействий с трубой 10.

На фиг.4 и 5, соответственно, изображены графики импульса давления в примере применения системы и способа дистанционного мониторинга целостности труб под давлением в соответствии с настоящим изобретением. Устройство 12, генерирующее импульсы давления, оснащенное двумя резервуарами 14 и 16, используется для генерации отрицательного импульса давления (фиг.4) и положительного импульса давления (фиг.5) в трубе 10. Эти импульсы давления могут регулироваться относительно как продолжительности времени, так и амплитуды давления. Двоичное кодирование этих импульсов давления может осуществляться, например, с помощью способов передачи с расширенным спектром (LABS: малые двоичные последовательности автокорреляции или последовательности Голея) и/или многоуровневой модуляции (например, m-РАМ: многоуровневая импульсно-амплитудная модуляция).

На фиг.6 показано применение системы и способа мониторинга в соответствии с настоящим изобретением к секции V16-V23, длиной 33 км трубы с внутренним диаметром, равным 24 дюйма для транспортировки газа под давлением. Вдоль секции V16-V23 установлены четыре станции генерации и записи виброакустических сигналов, обозначенных, соответственно, V17, V19, V20 и V22. На станции V22 генерируется короткий отрицательный импульс давления. На фиг.7 изображены сигналы давления, измеренные на трех станциях V19, V20 и V22. Исходный сигнал (V22) является ясно видимым в течение времени около 5 секунд, и сопровождается в течение около 25 секунд отраженным эхо из-за непроходимости секции V16-V23 трубы в месте расположения клапана в точке V23. Акустическая волна, генерируемая импульсом давления на станции V22, также записывается другими станциями V19 и V20, и соответствующие сигналы давления показаны на фиг.7.

На фиг.8 изображены некоторые меньшие отражения (обозначенные жирными стрелками), которые не должны возникать в трубе с постоянным сечением (диаметром). Общая акустическая характеристика затем использовалась в способе итеративной инверсии. Секция V16-V23 трубы была параметризована в виде последовательности сегментов трубы с неизвестным сечением (диаметром). Начиная от модели с постоянным сечением (диаметром), моделирующее устройство рассчитало соответствующую искусственную акустическую характеристику, которая сравнивалась с реальными измерениями. Модель была усовершенствована итеративным способом, пока разность между рассчитанными сигналами давления и эффективно измеренными сигналами

давления не стала ниже заданного порогового значения. Окончательная перевернутая модель не выделила следующие аномалии в секции V16-V23 трубы:

- северный терминал секции V16-V23 трубы расположен около 50 м вниз по потоку от клапана V23. Инспектирование в данном положении показало, что труба была закрыта приваренной крышкой на этом проложенном в грунте участке;

- аномалия P1 была установлена на расстоянии 10315 м от точки V16. Эта аномалия генерировала отрицательное отражение (увеличение эквивалентного сечения). Положение аномалии P1 совпадает с точкой V19, и аномальное отражение было связано с несквозным ответвлением трубы;

- другая аномалия P2 была установлена на расстоянии 19815 м от точки V16, в то время как другая аномалия P3 была установлена на расстоянии 31305 м от точки V16. Эти аномалии, которые не могут быть проверены, относились к деформациям, заглубленной в грунт трубы.

Эквивалентная окончательная модель правильно объясняет также меньшее эхо подобно коэффициентам более высокого порядка (фиг.9). Важно отметить, что моделирующее устройство должно моделировать все эффекты распространения, включая затухание и рассеяние, которые являются функциями частоты.

На фиг.10 изображены процессы быстрого изменения давления, закодированные в двоичном коде, другого примера применения системы и способа мониторинга в соответствии с настоящим изобретением. В этом примере применение способа рефлектометрии осуществлялась для трубы длиной 1896 м и с внутренним диаметром, равным 12 дюймам. Труба была заполнена водой под давлением 5 бар.

Труба, схематично изображенная на фиг.11, закрыта на обоих концах. На первом конце (станция А) расположено устройство 12, генерирующее импульсы давления, которое генерирует двоичную последовательность процессов быстрого изменения давления типа «низкочастотной двоичной последовательности автокорреляции» или «LABS». Этот соответствующий график показан на фиг.10.

Труба имеет две аномальных ситуации, схематично изображенные на фиг.11:

- клапан частично закрыт в точке «Положение 5»;
- короткое ответвление с закрытым концом (20 м в длину с внутренним диаметром, равным 1/4 дюйма) соединено с трубой в точке «Положение 2». Выпуск воды не происходит в этом ответвлении.

На фиг.12 показаны результаты в виде значений энергии способа рефлектометрии, осуществленной для трубы на фиг.11 в точке «Положение 5». Результаты были получены путем расчета разности между 40 минутами данных, записанных в нормальных условиях, то есть, с клапаном, открытым в «Положении 5», и 40 минутами данных, записанных в «аномальных» условиях, то есть, с клапаном, закрытым на 50%. Дифференциальный энергетический пик в точке «Положение 5», расположенной на расстоянии 1145 м от станции А, коррелируется до эффекта рассеяния энергии при частичном закрытии трубы.

В спектральной диаграмме с диапазоном частот 0-250 Гц акустического сигнала,

записанного на станции А трубы возможно обнаружение изменения эквивалентного акустического канала трубы посредством сравнения условия до приведения в действие клапана с условием после частичного закрытия клапана. Вертикальные полосы с высоким значением энергии соответствуют приведению в действие источников давления. Внезапное приведение в действие выпускных/впускных клапанов и использование последовательностей в двоичном коде позволяют увеличивать ширину полосы сигнала.

На фиг.13 показаны результаты в виде значений энергии способа рефлектометрии, осуществленной для трубы на фиг.11, для обнаружения аномалии в точке «Положение 2». Результаты были получены путем получения разности между 40 минутами данных, записанных в нормальных условиях, то есть, с ответвлением, отсоединенным от трубы, и 40 минутами данных, зарегистрированных в «аномальных» условиях, то есть, с ответвлением, соединенным с трубой. Пик в точке «Положение 2», расположенной на расстоянии 680 м от станции А, коррелируется до энергии, рассеивающейся на соединении с ответвлением.

Таким образом, понятно, что система и способ дистанционного мониторинга целостности труб под давлением в соответствии с настоящим изобретением достигают цели, раскрытые ранее.

Система и способ дистанционного мониторинга целостности труб под давлением настоящего изобретения, выполненные таким образом, могут в любом случае подвергаться множеству изменений и модификаций, причем все соответствуют одной и той же идеи изобретения. Следовательно, объем защиты изобретения определена прилагаемой формулой изобретения.

## ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Система мониторинга трубы (10) для транспортировки текучей среды с заданным значением (P) давления, причем система содержит, по меньшей мере, одно устройство (12), генерирующее импульсы давления, гидравлически соединенное с текучей средой, транспортируемой трубой (10), причем каждое устройство (12), генерирующее импульсы давления, содержит

- по меньшей мере, один первый резервуар (14), выполненный с возможностью вмещения первого заданного количества текучей среды, выходящей из трубы (10), и поддержания первого заданного количества текучей среды при первом значении (P1) давления, которое меньше заданного значения (P) давления текучей среды, транспортируемой трубой (10);

- по меньшей мере, один второй резервуар (16), выполненный с возможностью вмещения заданного количества текучей среды, выходящей из трубы (10), и поддержания упомянутого второго заданного количества текучей среды при втором значении (P2) давления, которое больше заданного значения (P) давления текучей среды, транспортируемой трубой (10), причем упомянутый первый резервуар (14) и упомянутый второй резервуар (16) генерируют, соответственно, отрицательный импульс давления, вызванный прохождением текучей среды из трубы (10) в упомянутый первый резервуар (14), и положительный импульс давления, вызванный прохождением текучей среды из упомянутого второго резервуара (16) в трубу (10);

- по меньшей мере, один датчик (18) давления, выполненный с возможностью измерения значений давления текучей среды и преобразования упомянутых значений давления в соответствующие записанные акустические сигналы (s(t)),

причем система мониторинга, кроме того, содержит, по меньшей мере, одну измерительную станцию (22, 24), расположенную вдоль трубы и содержащую один или более виброакустических датчиков, выполненных с возможностью записи акустических сигналов ( $S_A(t)$ ,  $S_B(t)$ ), генерируемых одним или более устройствами (12), генерирующими импульсы давления.

2. Система по п.1, содержащая, по меньшей мере, одну пару измерительных станций (22, 24), расположенных на заданном расстоянии друг от друга вдоль трубы (10).

3. Система по п.1 или 2, в которой каждое устройство (12), генерирующее импульсы давления, содержит множество электромагнитных клапанов (20), выполненных с возможностью управления перемещениями текучей среды в трубе (10) к устройству (12), генерирующему импульсы давления, и наоборот.

4. Система по любому из п.1-3, содержащая централизованный блок обработки данных, выполненный с возможностью обработки данных, поступающих с упомянутого, по меньшей мере, одного устройства (12), генерирующего импульсы давления, и упомянутой, по меньшей мере, одной измерительной станции (22, 24).

5. Способ мониторинга трубы (10), использующий систему по любому из предыдущих пунктов, причем способ включает в себя этапы:

- генерации, по меньшей мере, одного акустического сигнала соответствующим устройством (12), генерирующим импульсы давления;
- получения, по меньшей мере, одной измерительной станцией (22, 24) упомянутого, по меньшей мере, одного акустического сигнала ( $S_A(t)$ ,  $S_B(t)$ );
- фильтрации упомянутого, по меньшей мере, одного акустического сигнала ( $S_A(t)$ ,  $S_B(t)$ ) для поддержания упомянутого, по меньшей мере, одного акустического сигнала ( $S_A(t)$ ,  $S_B(t)$ ) в заданном диапазоне частот, используемых для получения энергии упомянутого, по меньшей мере, одного акустического сигнала ( $S_A(t)$ ,  $S_B(t)$ );
- обратного распространения упомянутого, по меньшей мере, одного акустического сигнала ( $S_A(t)$ ,  $S_B(t)$ ) для соответствующего множества точек вдоль трубы (10);
- для каждой точки множества выполнения взаимной корреляции в скользящем временном окне для упомянутого, по меньшей мере, одного обратно распространённого акустического сигнала ( $S_A(t)$ ,  $S_B(t)$ ), таким образом, для извлечения из него значения энергии;
- для каждой точки множества получения интеграла в виде функции времени значения энергии, полученной в фазе взаимной корреляции и применения критерия порогового значения для запуска возможного тревожного сигнала, причем множество значений энергии, интегрированных в виде функции времени, образует карту как функцию от времени и положения вдоль трубы, на которой возможные аномалии трубы (10) представлены пиками упомянутых значений энергии.

6. Способ по п.5, в котором два отчетливых акустических сигнала ( $S_A(t)$ ,  $S_B(t)$ ) записаны двумя измерительными станциями (22, 24) после приведения в действие устройств (12), генерирующих импульсы давления, причем упомянутые два акустических сигнала ( $S_A(t)$ ,  $S_B(t)$ ) получены двумя соседними измерительными станциями (22, 24), расположенными, соответственно, на двух противоположных концах А и В секции (А-В) трубы (10) заданной длины.

7. Способ по п.6, в котором упомянутые два акустических сигнала ( $S_A(t)$ ,  $S_B(t)$ ) распространяются обратно, соответственно, из точки А в точку В и из точки В в точку А упомянутой секции (А-В) трубы 10 для соответствующего множества точек вдоль упомянутой секции (А-В) трубы (10).

8. Способ по п.6 или 7, в котором интеграл в виде функции времени значения энергии в общем положении ( $x$ ) вдоль упомянутой секции (А-В) трубы (10) представляет собой

$$E_C(x, t) = \int \left[ \int_{t_1}^{t_2} \hat{s}_{CA}(\tau) \cdot \hat{s}_{CB}(t - \tau) d\tau \right] dt$$

, где

$$\hat{s}_{CA}(f) = \frac{|x_A - x_C| / |x_A - x_B|}{|H_{AB}|} S_A(f) e^{j2\pi f |x_A - x_C| / v}$$

- преобразование Фурье рассчитанного сигнала, который сгенерирован в упомянутом общем положении ( $x$ ) за счет обратного распространения акустического сигнала  $S_A(t)$ , измеренного в точке А;

-  $S_A(f)$  - преобразование Фурье акустического сигнала  $S_A(t)$ , where (f) - частота;

-  $\hat{S}_{CA}(t)$  - обратное преобразование Фурье  $\hat{S}_{CA}(f)$  ;

$$\hat{S}_{CB}(f) = \frac{|x_B - x_C| / |x_A - x_B|}{|H_{AB}|} S_B(f) e^{j2\pi f |x_B - x_C| / v}$$

- преобразование Фурье рассчитанного сигнала, который сгенерирован в упомянутом общем положении (x) за счет обратного распространения акустического сигнала ( $S_B(t)$ ), измеренного в точке В;

-  $S_B(f)$  - преобразование Фурье акустического сигнала  $S_B(t)$ , где  $S_B(t)$ , где (f) - частота;

-  $\hat{S}_{CB}(t)$  - обратное преобразование Фурье  $\hat{S}_{CB}(f)$  ;

-  $H_{AB}(f)$  - передаточная функция для процессов быстрого изменения давления, которые распространяются от точки А до точки В упомянутой секции (А-В) трубы (10); и

- v - скорость звука внутри текучей среды, которая проходит от точки А до точки В упомянутой секции (А-В) трубы (10).

9. Способ по любому из п.5-8, в котором для упомянутого, по меньшей мере, одного акустического сигнала ( $S_A(t)$ ,  $S_B(t)$ ), по меньшей мере, один из следующих способов применяется на основании направления поступления упомянутого, по меньшей мере, одного акустического сигнала ( $S_A(t)$ ,  $S_B(t)$ ):

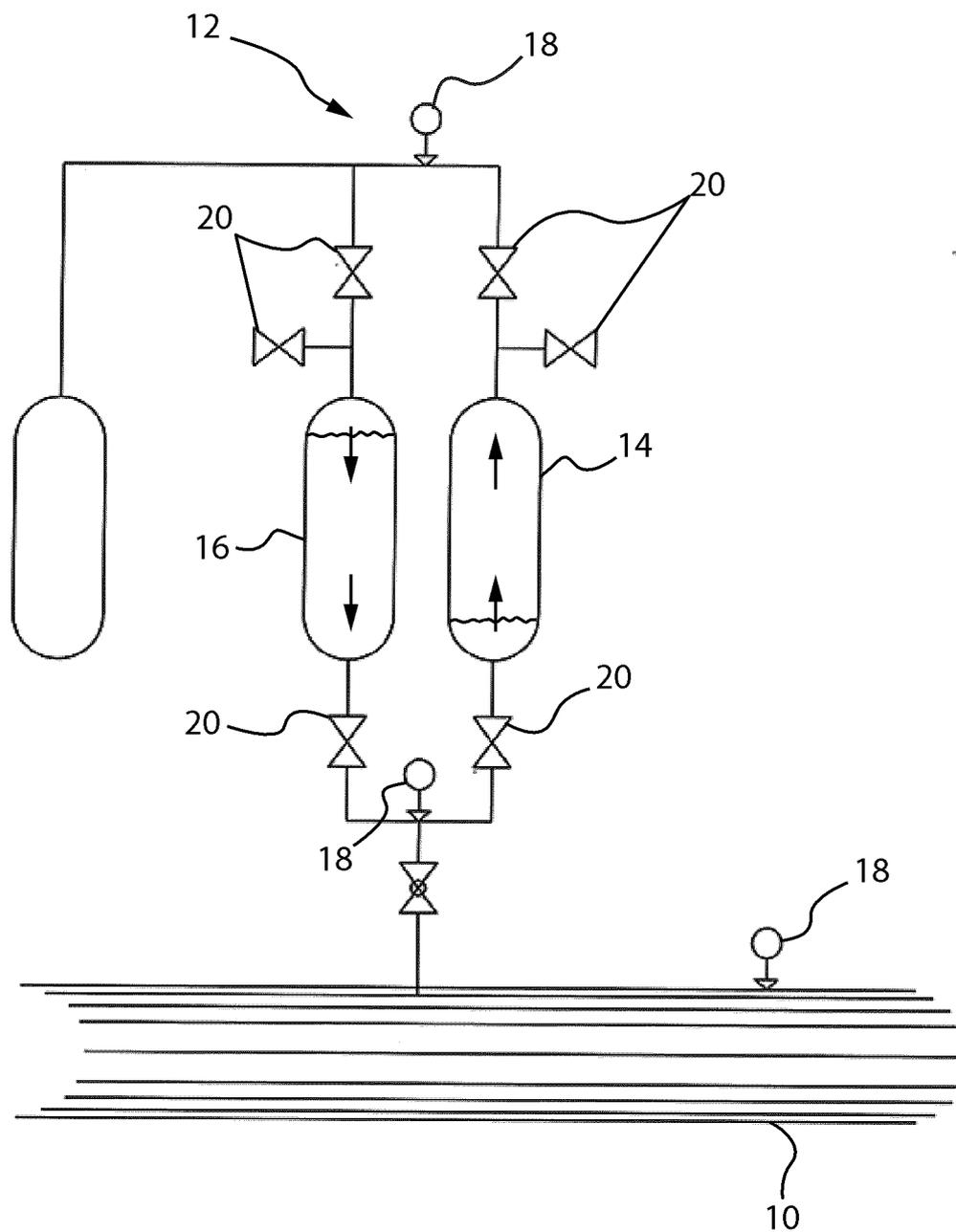
- адаптированная фильтрация;

- обращение свертки;

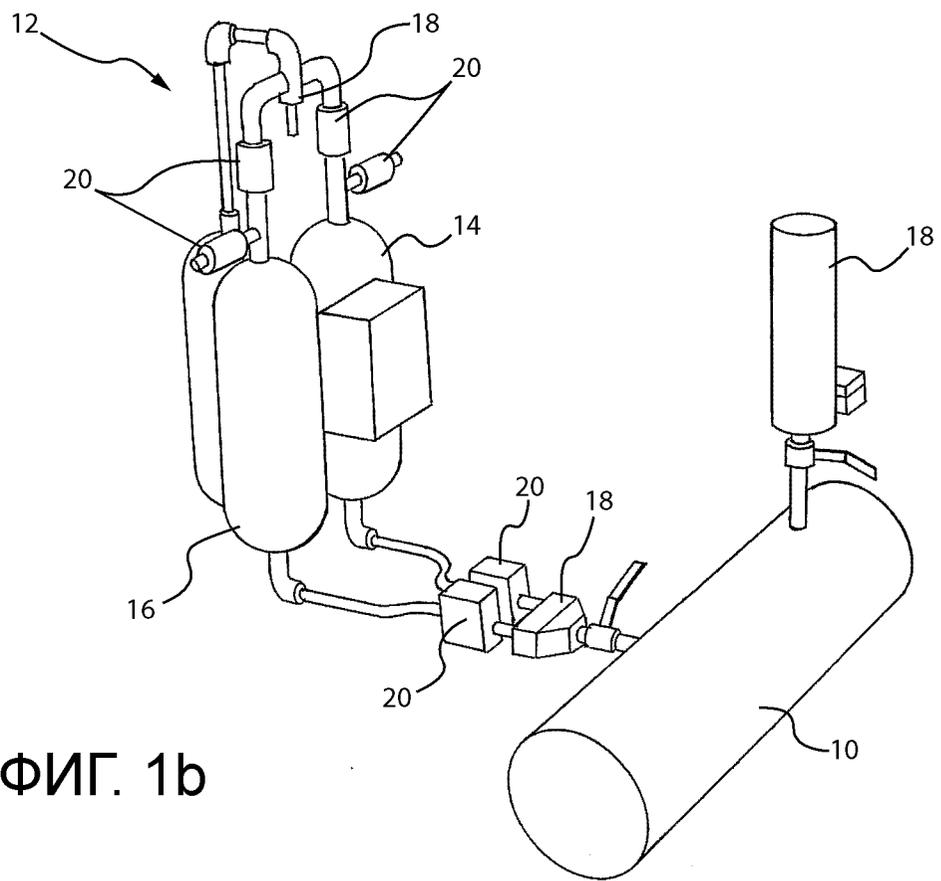
- адаптивное ослабление шума.

10. Способ по любому из п.5-9, включающий в себя этап калибровки системы для установки порогового значения для применения упомянутого критерия порогового значения.

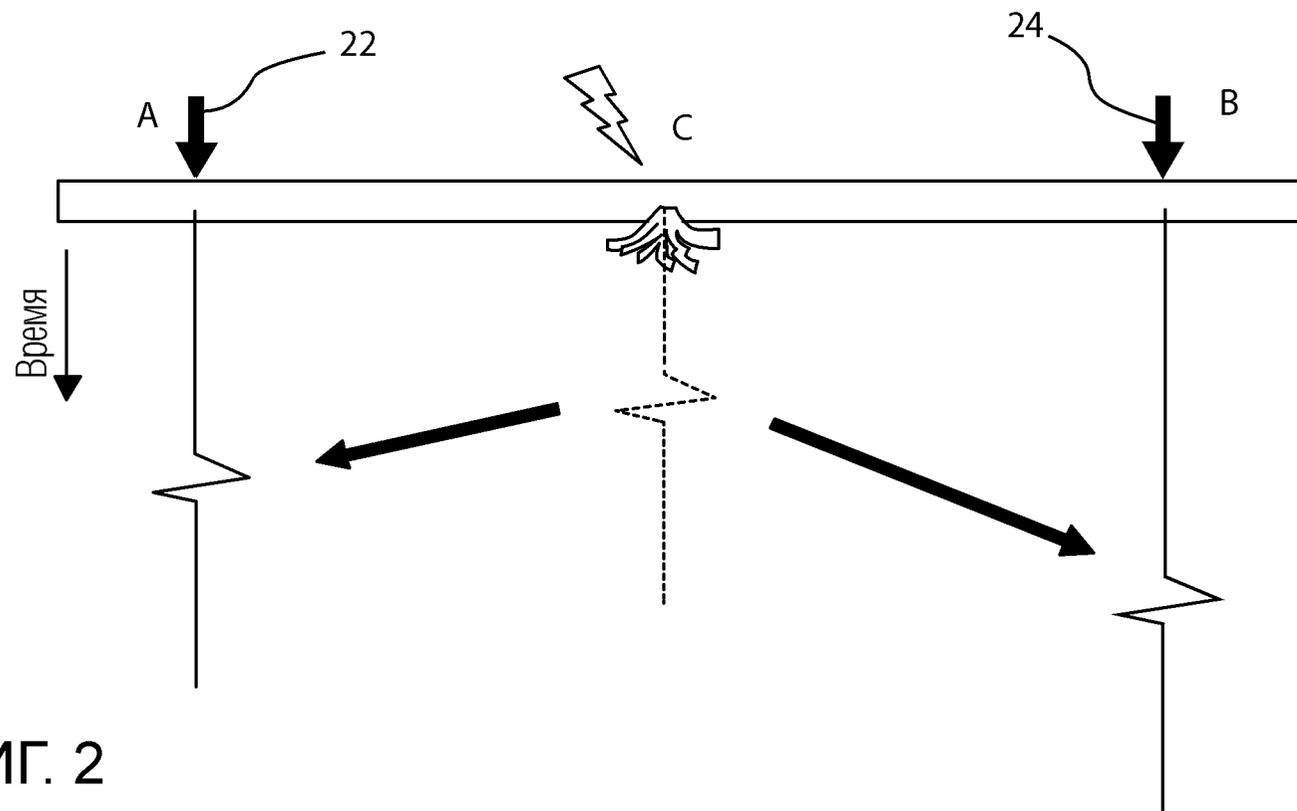
По доверенности



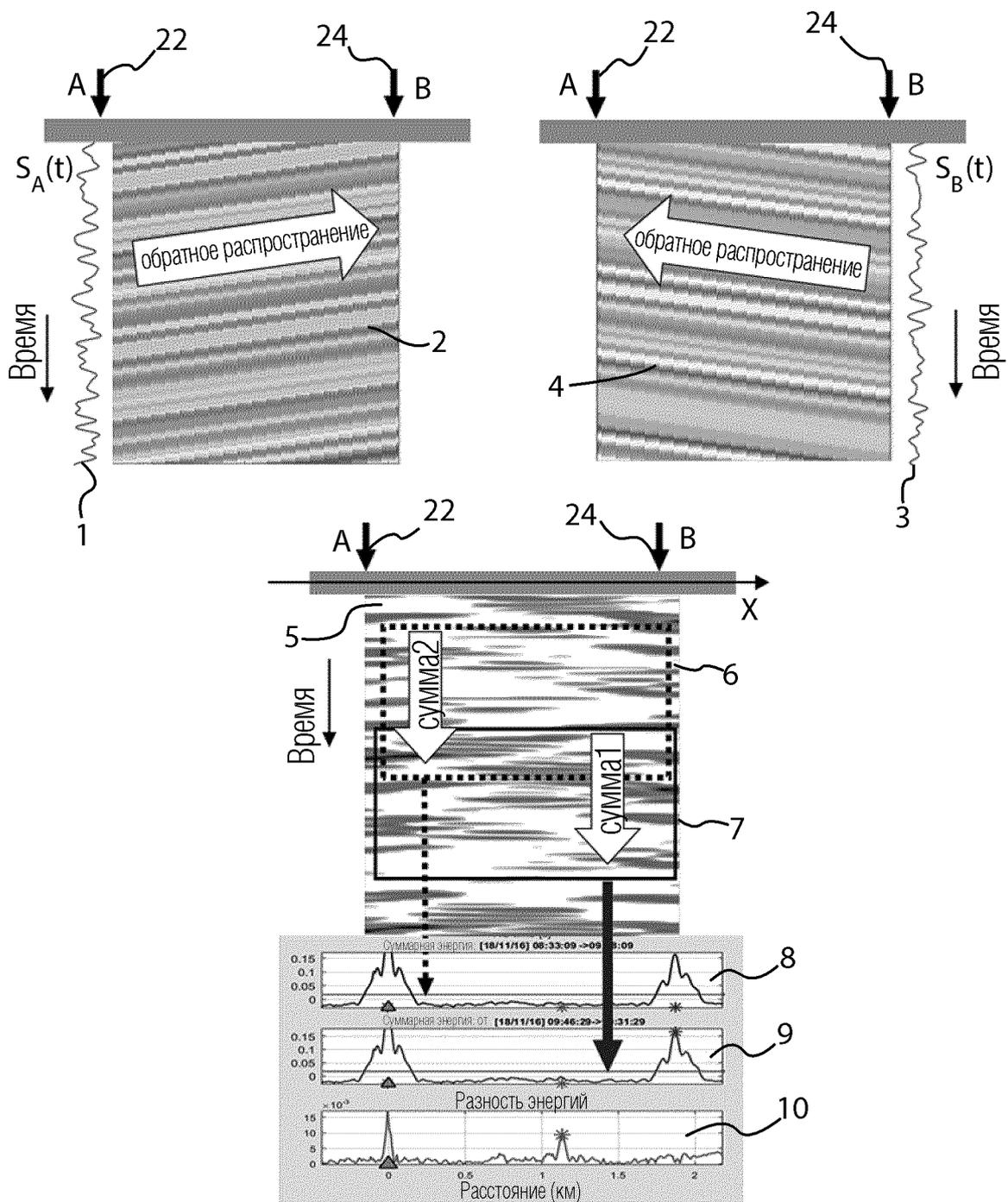
ФИГ. 1а



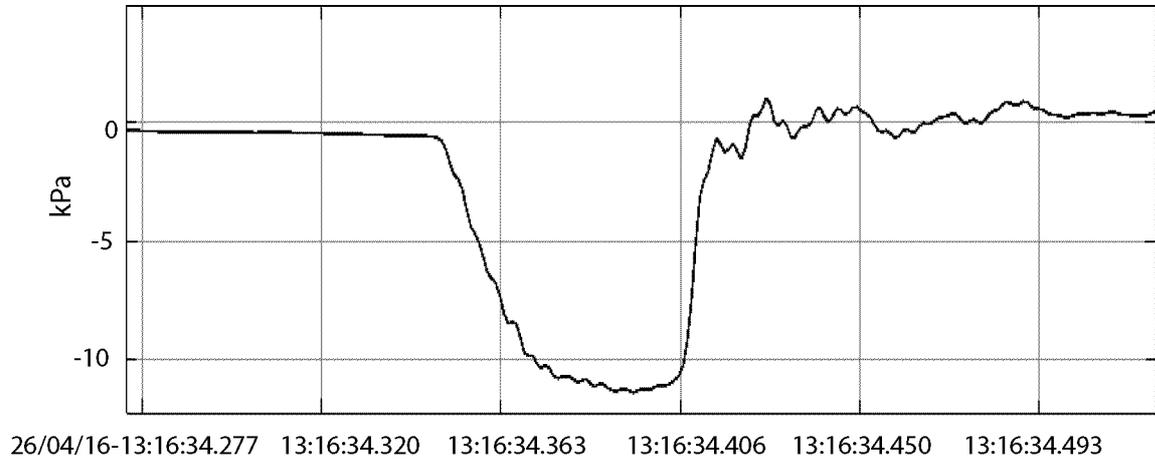
ФИГ. 1b



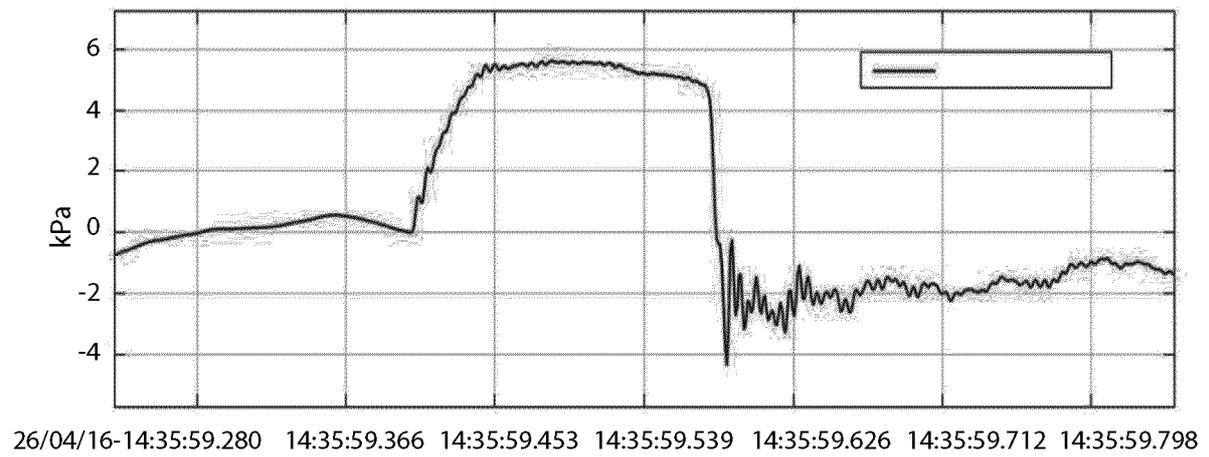
ФИГ. 2



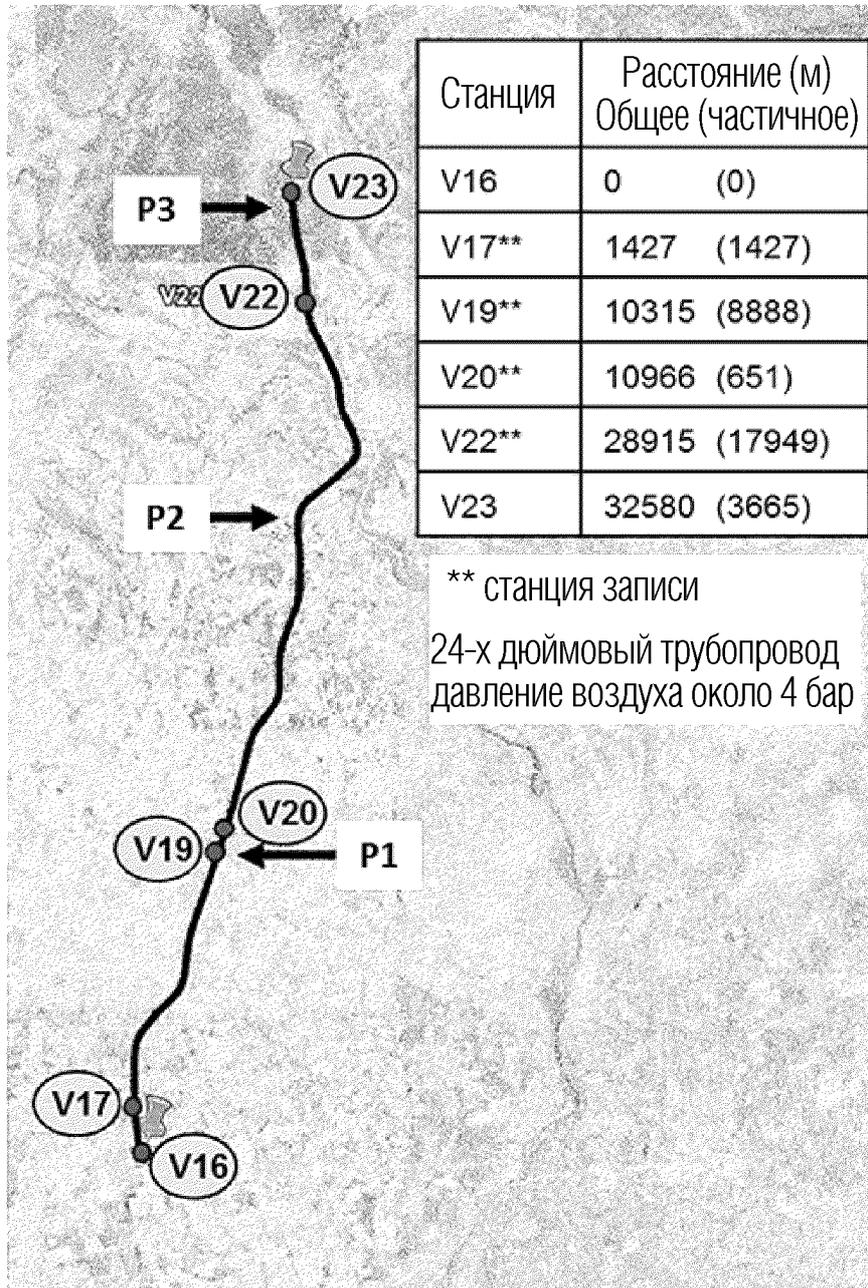
ФИГ. 3



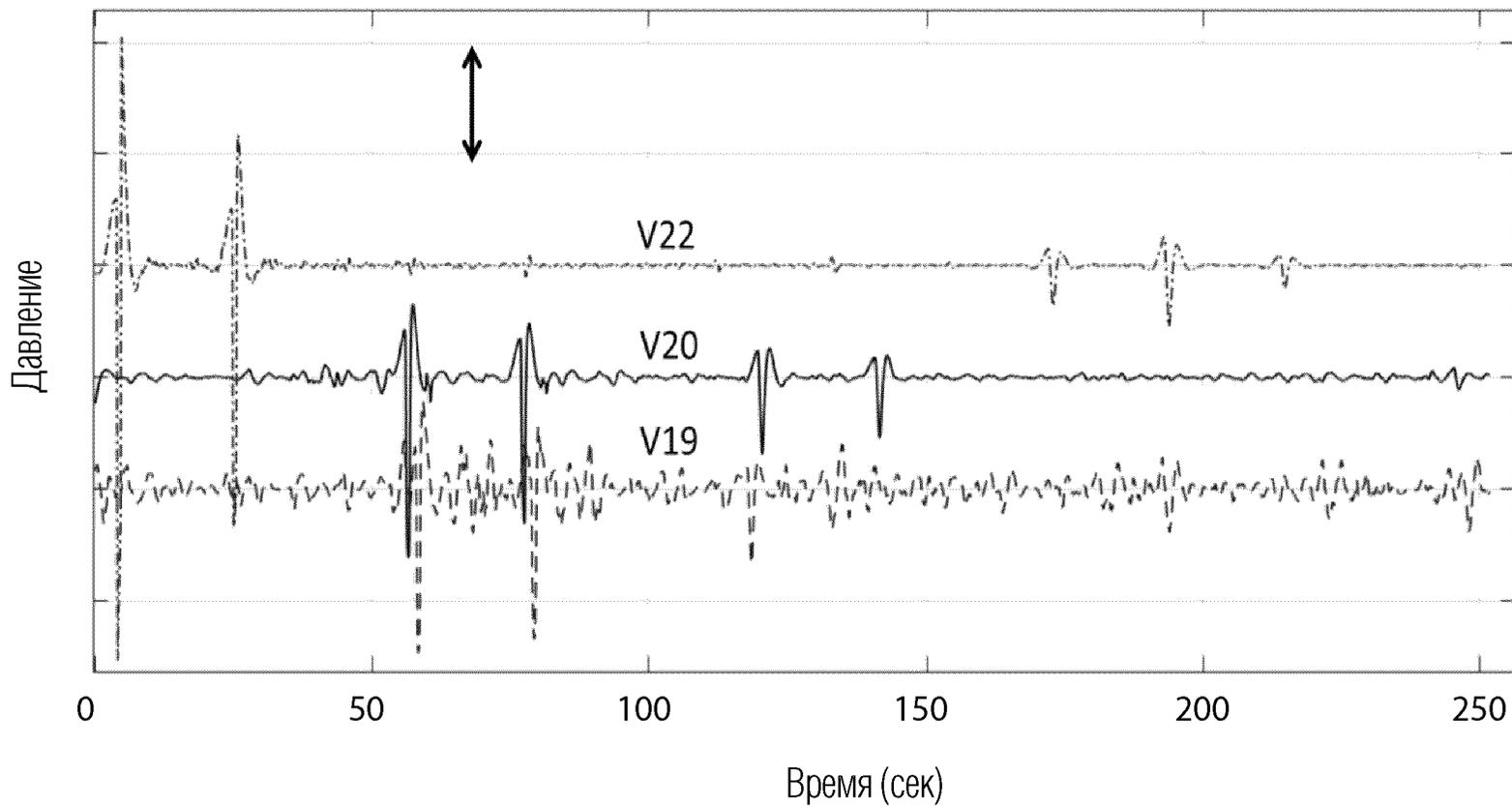
ФИГ. 4



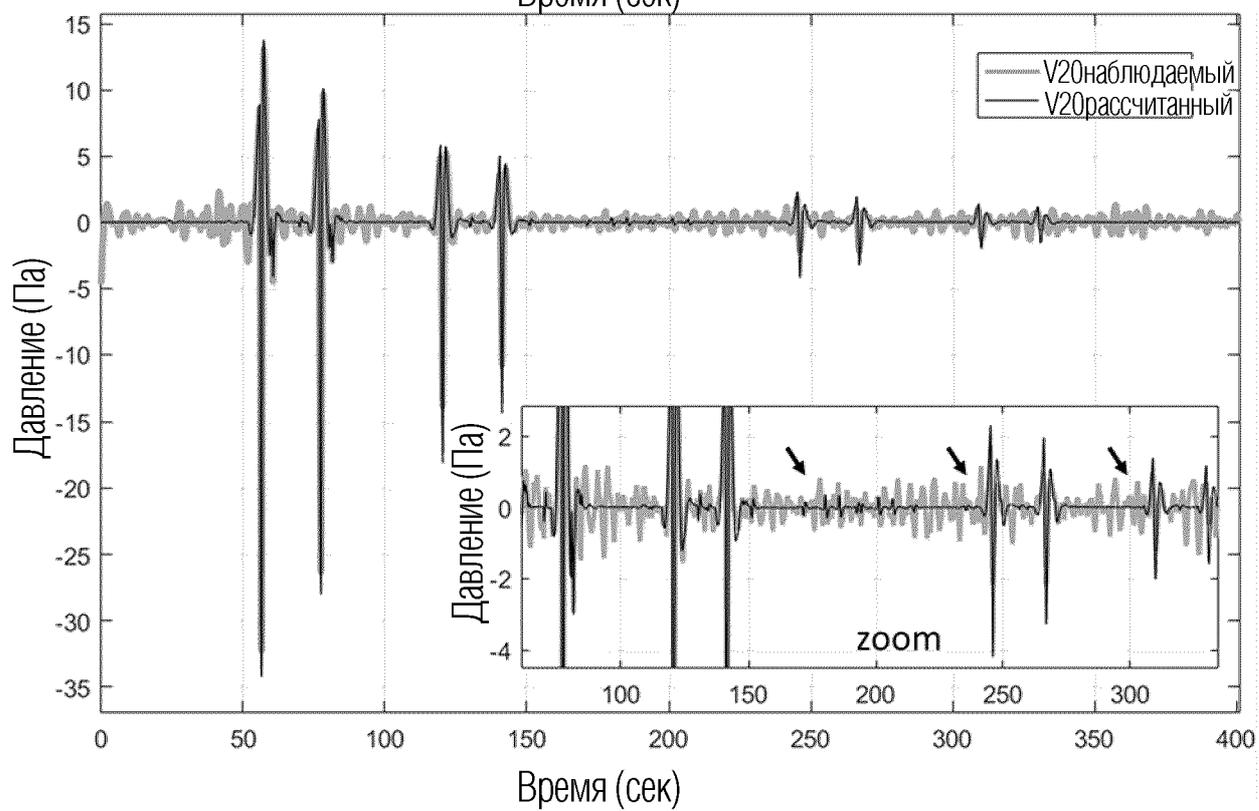
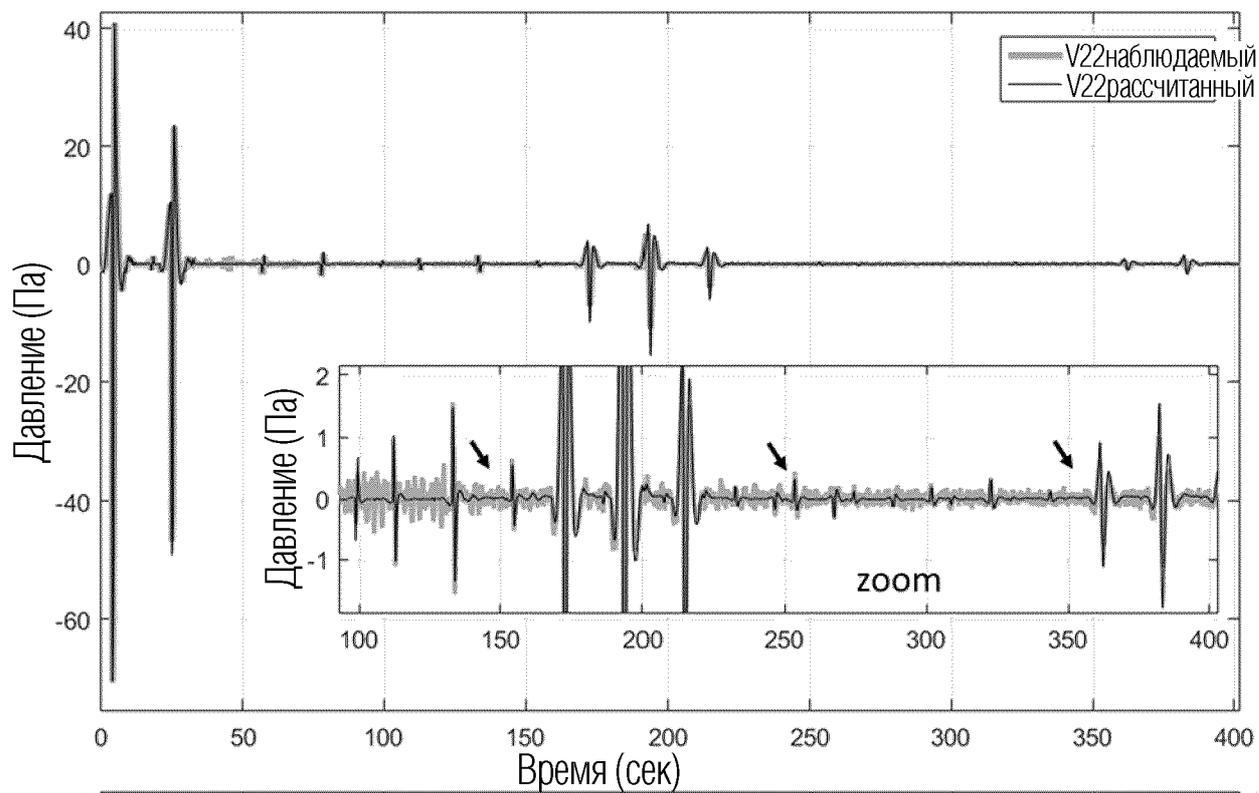
ФИГ. 5



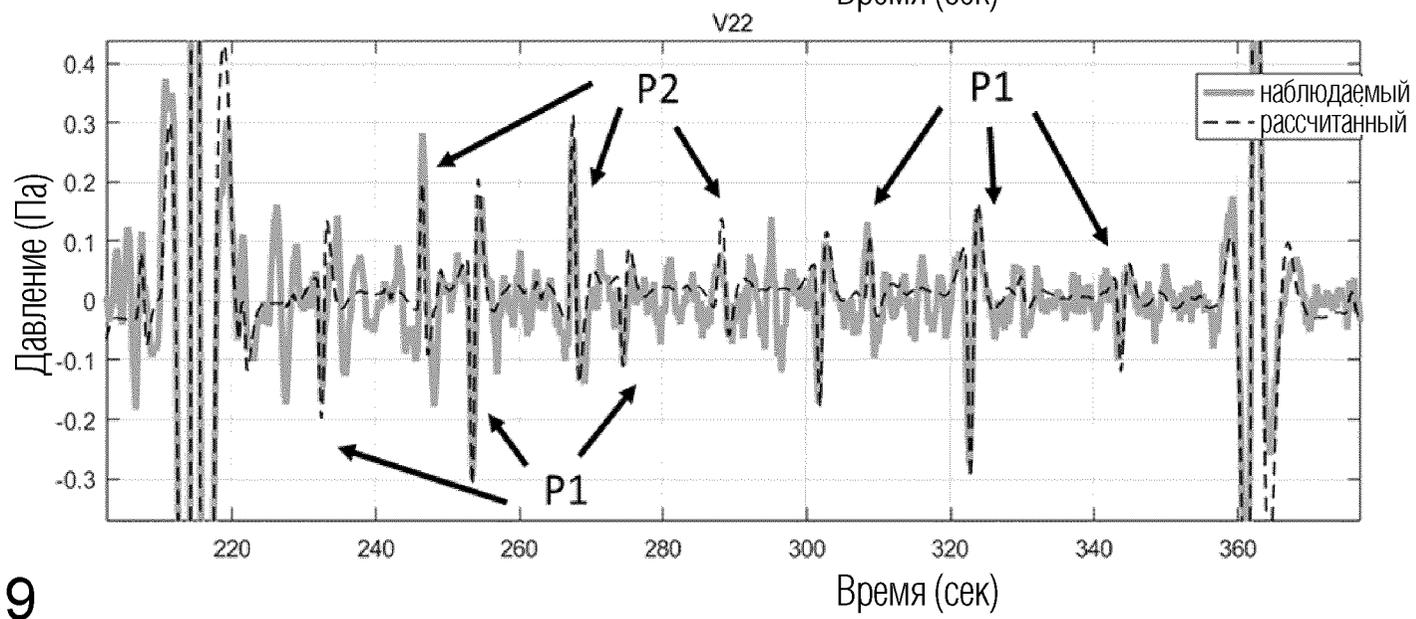
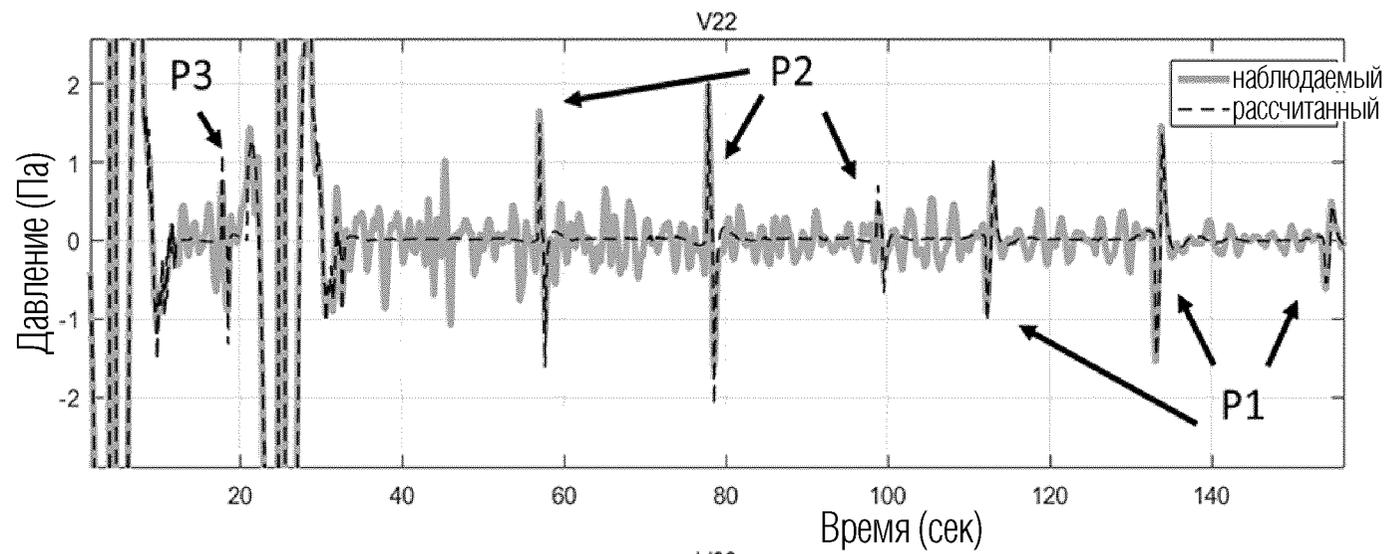
ФИГ. 6



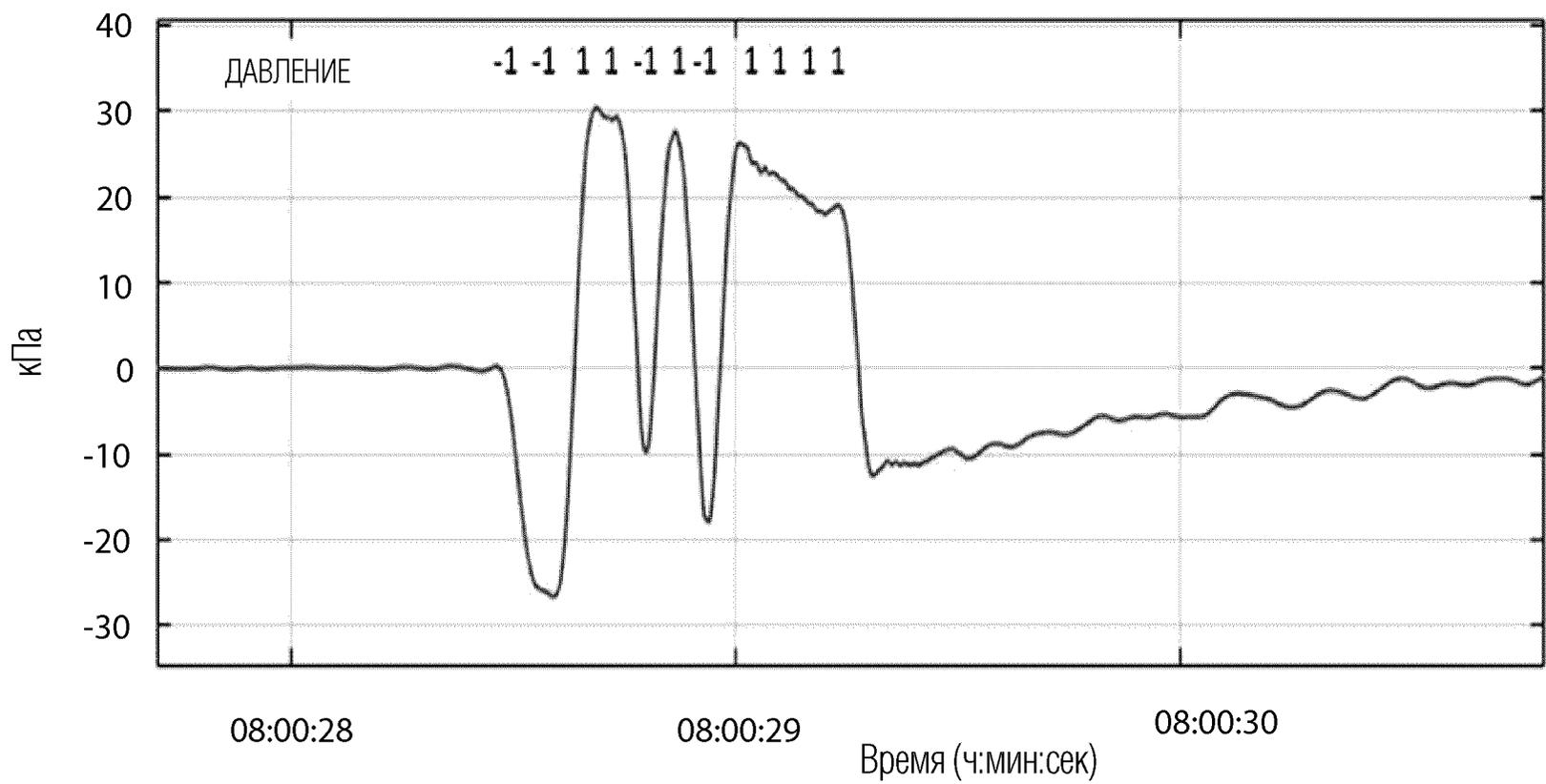
ФИГ. 7



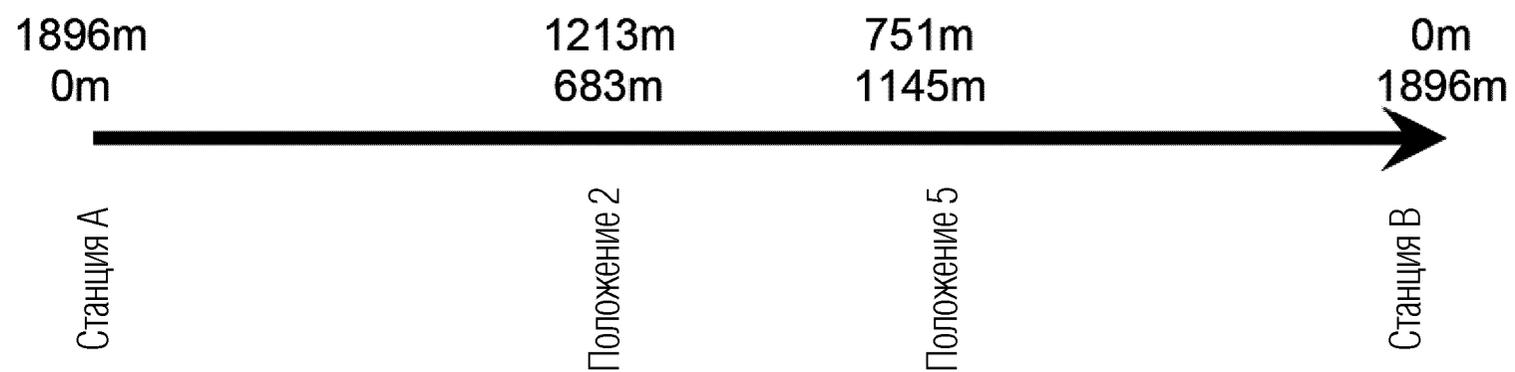
ФИГ. 8



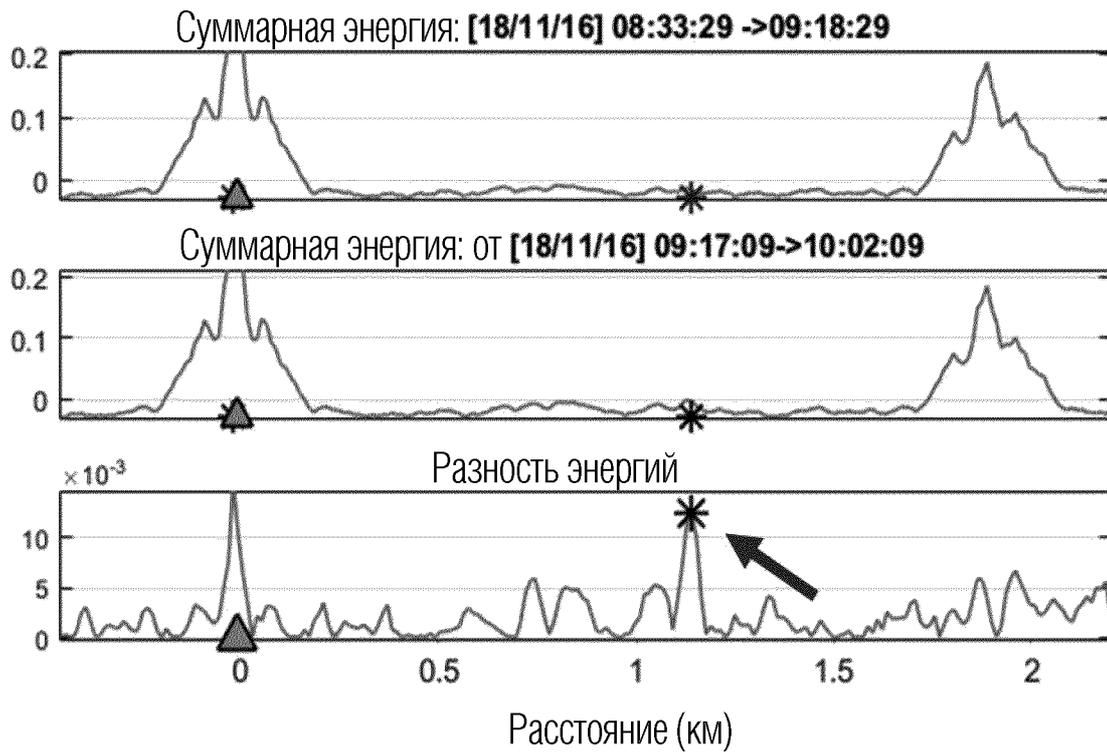
ФИГ. 9



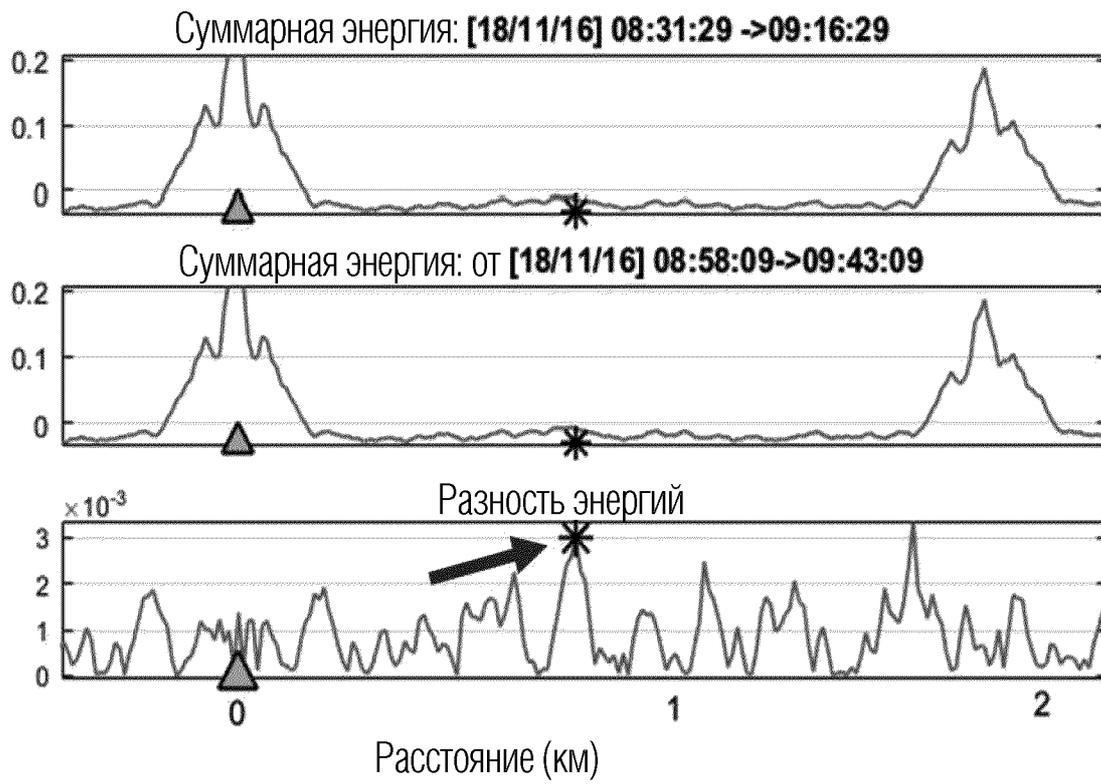
ФИГ. 10



ФИГ. 11



ФИГ. 12



ФИГ. 13