



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01N 27/82 (2006.01)

(21)(22) Заявка: 2016149454, 15.05.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
15.05.2015

Дата регистрации:
04.02.2019

Приоритет(ы):

(30) Конвенционный приоритет:
18.05.2014 US 61/994,961

(43) Дата публикации заявки: 20.06.2018 Бюл. № 17

(45) Опубликовано: 04.02.2019 Бюл. № 4

(85) Дата начала рассмотрения заявки РСТ на
национальной фазе: 19.12.2016

(86) Заявка РСТ:
US 2015/031092 (15.05.2015)

(87) Публикация заявки РСТ:
WO 2015/179237 (26.11.2015)

Адрес для переписки:
190000, Санкт-Петербург, ВОХ-1125,
"ПАТЕНТИКА"

(72) Автор(ы):

ДЭВИС Альмир Д. (US),
ТРИНКЛ Уильям Дж. (US),
ГУСТАФСОН Дональд (US),
БЭБКОК Филип С. IV (US),
БЕРТОЛЬД Ричард Т. (US)

(73) Патентообладатель(и):

ЗЕ ЧАРЛЬЗ СТАРК ДРЕЙПЕР
ЛАБОРАТОРИ, ИНК. (US)

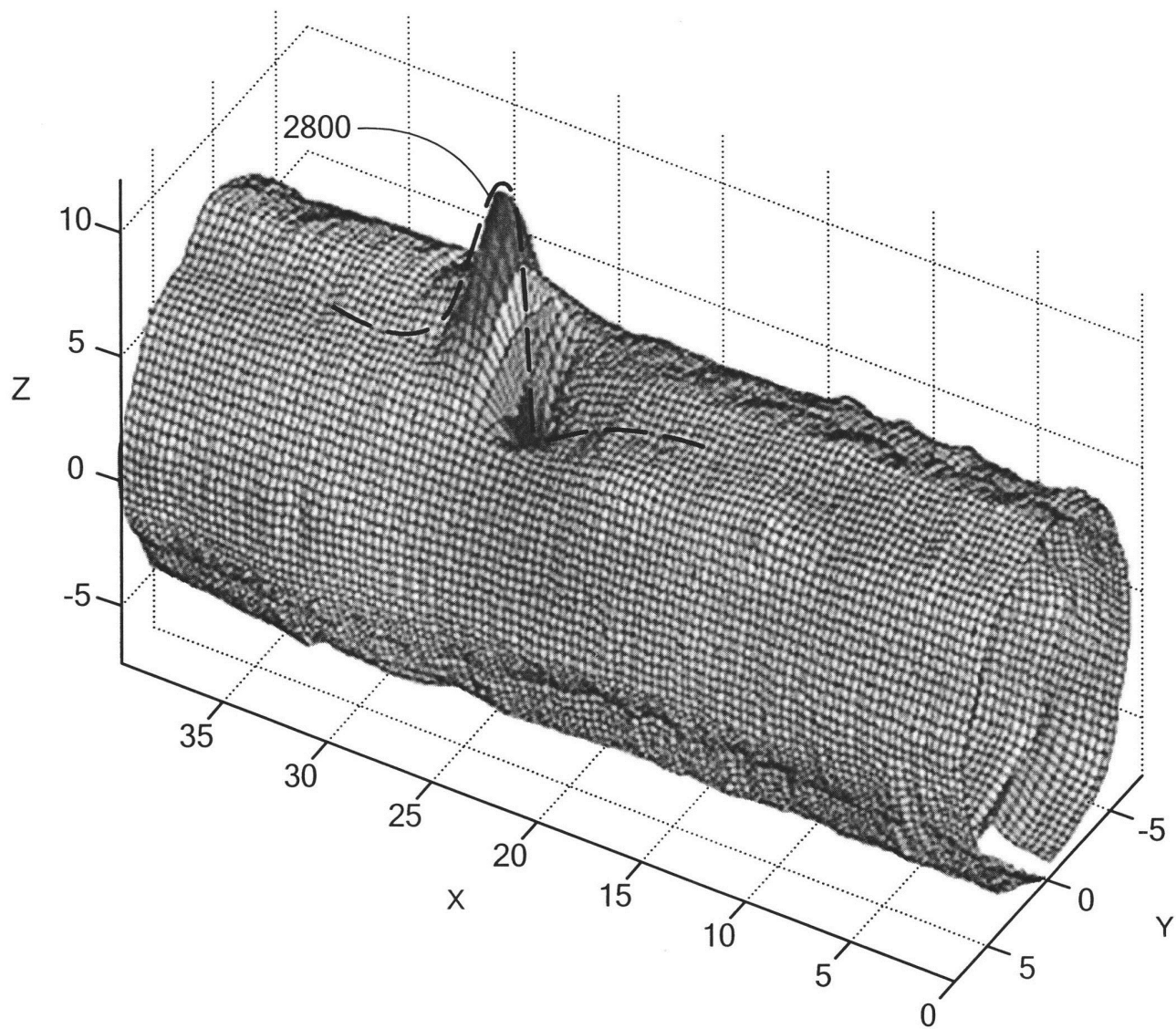
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: WO 2013128210 A1, 06.09.2013. US
2002116980 A1, 29.08.2002. US 6320820 B1,
20.11.2001. RU 119117 U1, 10.08.2012.

(54) СИСТЕМА И СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФЕКТОВ В ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

(57) Реферат:

Группа изобретений относится к обнаружению дефектов в ферромагнитных материалах с использованием магнитометра. Дефекты в ферромагнитных материалах обнаруживают и характеризуют путем анализа магнитных полей изделий с целью нахождения участков магнитных полей, которые характерным образом отличаются от остаточных магнитных полей, создаваемых участками изделий, не имеющими дефектов. Участки магнитных полей, отличающиеся

характерным образом, соответствуют местоположениям дефектов. Остаточные магнитные поля соответствуют участкам изделий на удалении от дефектов. Характеристика дефекта может включать в себя объем материала, потерянного из-за каждого дефекта, и/или ширину и/или глубину каждого дефекта. Технический результат – повышение точности обнаружения дефектов. 2 н. и 15 з.п. ф-лы, 31 ил.



ФИГ. 28

RU 2 6 7 8 9 4 9 C 2

RU 2 6 7 8 9 4 9 C 2



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
G01N 27/82 (2006.01)

(21)(22) Application: **2016149454, 15.05.2015**

(24) Effective date for property rights:
15.05.2015

Registration date:
04.02.2019

Priority:

(30) Convention priority:
18.05.2014 US 61/994,961

(43) Application published: **20.06.2018** Bull. № 17

(45) Date of publication: **04.02.2019** Bull. № 4

(85) Commencement of national phase: **19.12.2016**

(86) PCT application:
US 2015/031092 (15.05.2015)

(87) PCT publication:
WO 2015/179237 (26.11.2015)

Mail address:
**190000, Sankt-Peterburg, BOX-1125,
"PATENTIKA"**

(72) Inventor(s):

**DEVIS Almir D. (US),
TRINKL Uilyam Dzh. (US),
GUSTAFSON Donald (US),
BEBKOK Filip S. IV (US),
BERTOLD Richard T. (US)**

(73) Proprietor(s):

**ZE CHARLZ STARK DREJPER
LABORATORI, INK. (US)**

(54) **SYSTEM AND METHOD OF MEASURING DEFECTS IN FERROMAGNETIC MATERIALS**

(57) Abstract:

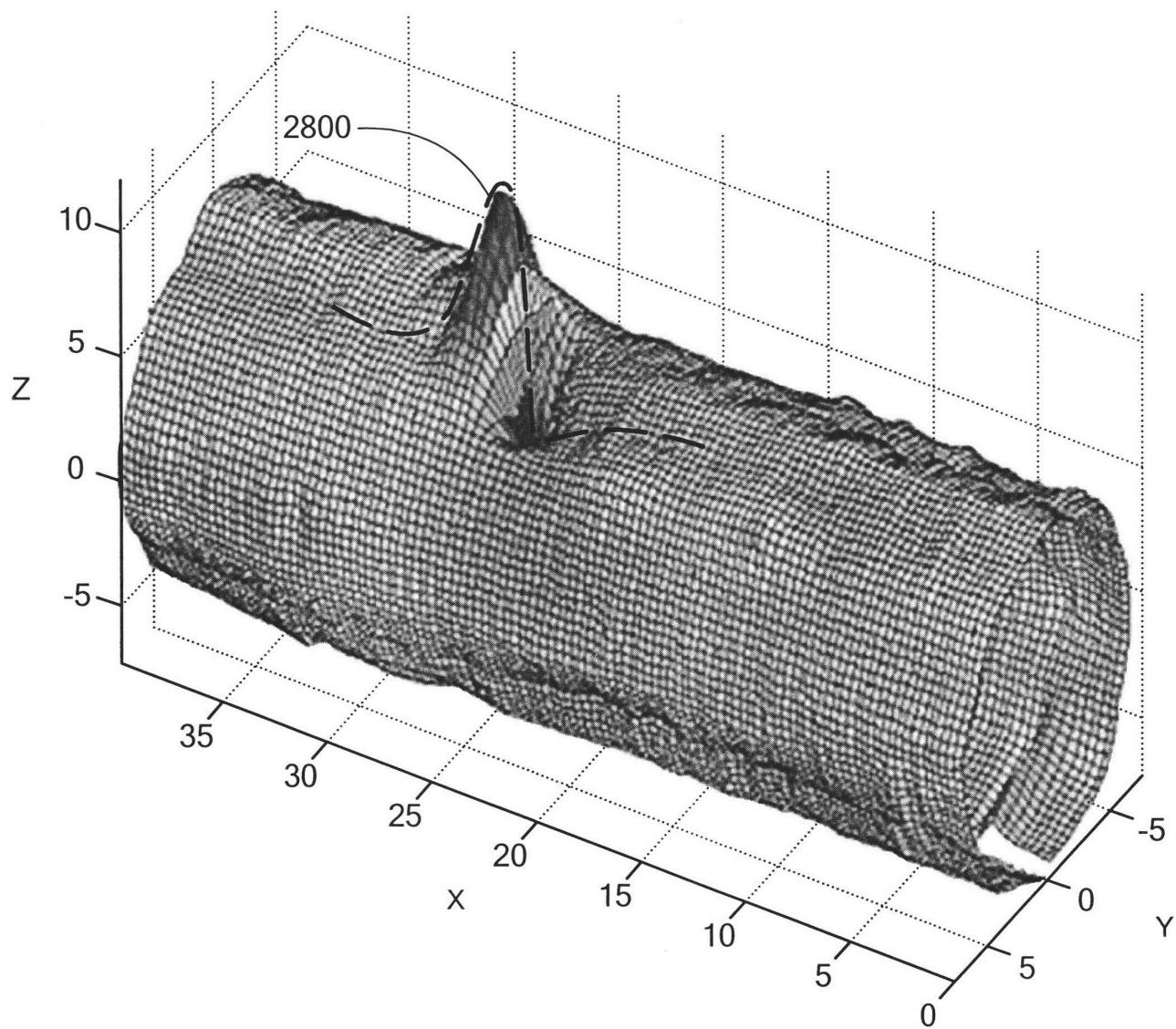
FIELD: measurement; testing.

SUBSTANCE: group of inventions relates to detection of defects in ferromagnetic materials using a magnetometer. Defects in ferromagnetic materials are detected and characterized by analyzing the items' magnetic fields to find portions of the magnetic fields that differ in characteristic ways from residual magnetic fields generated by non-defective portions of the items. Portions of the magnetic fields that differ in the

characteristic ways correspond to locations of the defects. Residual magnetic fields correspond to portions of the items distant from the defects. Defect characterization may include volume of material lost due to each defect and/or width and/or depth of each defect.

EFFECT: technical result is more accurate defect detection.

17 cl, 31 dwg



ФИГ. 28

[0001] Настоящая заявка испрашивает приоритет по предварительной патентной заявке США №61/994961, поданной 18 мая 2014, озаглавленной "Система и способ измерения дефектов в ферромагнитных материалах", полное содержание которой включено в качестве ссылки в настоящий документ для всех целей.

ОБЛАСТЬ ТЕХНИКИ

[0002] Настоящее изобретение относится к обнаружению дефектов в ферромагнитных материалах и, более конкретно, к обнаружению дефектов в ферромагнитных материалах с использованием магнитометра.

УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ

[0003] Ферромагнитные материалы, такие как железо, никель, сталь и другие материалы, используют для изготовления многих изделий, таких как, трубы, балки и корпуса океанских судов. При использовании в данном документе термин "ферромагнитный материал" включает в себя как ферромагнитный, так и ферримангнитный материал. Во многих случаях данные материалы подвержены коррозии и/или эрозии. При использовании в данном документе, коррозия означает потерю материала в результате химической реакции, чаще всего реакции окисления. При использовании в данном документе эрозия означает потерю материала в результате механического процесса, например абразивного износа. Например, песок, поступающий в нефтяную или газовую скважину, может истирать внутреннюю часть трубопровода, доставляющего нефть или газ из скважины. Потеря материала из-за коррозии и/или эрозии обобщенно упоминается в данном документе как "дефект". При использовании в данном документе термин дефект также включает в себя трещину или полость или включение инородного материала, которые могут появиться, например, во время или после изготовления. Если позволить коррозии или эрозии развиваться за пределы критической точки, то это может нарушить структурную целостность элемента, что может привести к катастрофическим результатам, например разливу нефти, обрушению здания или затоплению судна.

[0004] В попытке обнаружить дефекты в ферромагнитных материалах и изделиях, изготовленных из ферромагнитных материалов, в уровне техники использовались различные устройства и способы. Для некоторых из данных устройств и способов требуется удаление теплоизоляции и очистка поверхности от антикоррозионного покрытия для получения прямого доступа к поверхности ферромагнитного материала. В некоторых случаях, поверхность должна быть отполирована для создания идеального взаимодействия с датчиком или распространения волн от датчика. Данные операции являются дорогостоящими, отнимают много времени и часто нарушают теплоизоляцию и/или покрытие поверхности.

[0005] Все известные изобретателям устройства и способы обнаружения дефектов в ферромагнитных материалах уровня техники включают в себя введение в материал энергии. Например, акустические датчики посылают в материал звуковую волну и измеряют возвращенный сигнал. Датчики направленных волн и топографические датчики аналогичным образом посылают в материал электромагнитные волны и регистрируют отражения или время прохождения волны. В отличие от подхода, связанного с передачей энергии в контролируемое изделие, компания Rohrbach Cosasco Systems, Inc. выпускает линейку зондов для обнаружения эрозии от воздействия песка под торговой маркой "Quicksand". Данные зонды не выполняют непосредственного измерения эрозии труб и тому подобного. Вместо этого данные зонды являются расходными в том смысле, что они обнаруживают эрозию участков на самих зондах. Использование систем, основанных на таких зондах, предполагает, что трубы и другие

изделия изнашиваются приблизительно с той же скоростью, что и расходные участки зондов. Кроме того, использование зондов зависит от потока текучей среды через трубу, вследствие чего требуется, чтобы в трубу подавали энергию в виде потока текучей среды. Данные системы могут обнаружить эрозию только внутри трубы. Данные системы не могут обнаружить дефекты где-либо еще, например, внутри стенки трубы или на внешней поверхности трубы, они также не могут определить состояние трубы вследствие эрозии до того, как датчик был установлен на место.

[0006] В попытках обнаружить дефекты в ферромагнитных материалах некоторые устройства и способы уровня техники включают в себя магнитометрию. Например, патенты США №№8542127 и 8447532, принадлежащие Валериану Горошевскому и др., раскрывают использование обратного магнитострикционного эффекта Виллари. Обратный магнитострикционный эффект Виллари включает в себя изменения магнитной восприимчивости материала под воздействием приложенной механической нагрузки. Если труба содержит дефект, то когда материал трубы находится под воздействием механической нагрузки, например труба находится под воздействием избыточного давления, магнитная восприимчивость трубы отличается от той, когда труба не находится под воздействием механической нагрузки. Патенты Горошевского основаны на обнаружении данного изменения магнитной восприимчивости при изменении давления в трубе. Таким образом, трубе необходимо сообщить энергию в форме избыточного давления внутри трубы. Некоторые изделия, например трубы, остаются неиспользованными и, следовательно, без избыточного давления на протяжении периодов времени, в течение которых могут развиваться дефекты. Другие конструкции, например корпуса судов или элементы конструкций, не поддаются воздействию известного циклического нагружения. Однако без создания избыточного давления устройство и способы Горошевского не могут обнаруживать данные дефекты. Кроме того, согласно Горошевскому можно определять местоположение дефекта только вдоль длины трубы; согласно Горошевскому нельзя определять местоположение дефекта по окружности вокруг трубы.

РАСКРЫТИЕ СУЩНОСТИ ИЗОБРЕТЕНИЯ

[0007] Вариант осуществления настоящего изобретения обеспечивает систему для обнаружения дефектов в ферромагнитном материале. Система включает в себя множество магнитометров. Множество магнитометров размещено вблизи поверхности ферромагнитного материала. Множество магнитометров выполнены с возможностью измерения магнитного поля, созданного ферромагнитным материалом. Множество магнитометров выполнены с возможностью генерации данных магнитного поля на основе измеренного магнитного поля. Каждый магнитометр из множества магнитометров неподвижно закреплен в положении относительно ферромагнитного материала. Система также включает в себя построитель карты магнитного поля. Построитель карты магнитного поля выполнен с возможностью генерации точек данных двумерной карты изданных магнитного поля. Каждая точка данных соответствует соответствующему местоположению на поверхности ферромагнитного материала. Каждая точка данных представляет напряженность измеренного магнитного поля вблизи местоположения. "Вблизи" в данном контексте означает достаточно близко, так что местоположение дефекта можно задать как в направлении x , так и в направлении y , то есть, продольно вдоль ферромагнитного материала и поперечно через материал. В некоторых вариантах осуществления "вблизи" означает в пределах около 5-10 дюймов. Система также включает в себя сопоставитель с образцом. Сопоставитель с образцом выполнен с возможностью распознавания на карте множества точек данных,

соответствующих заданному пространственному образцу напряженности магнитного поля. Сопоставитель с образцом выполнен с возможностью выдачи местоположения вблизи поверхности ферромагнитного материала, которое соответствует множеству точек данных. Выданное местоположение является местоположением дефекта.

5 [0008] Система может также включать в себя модуль оценки размера дефекта. Модуль оценки размера дефекта выполнен с возможностью оценки объема материала, отсутствующего в ферромагнитном материале в местоположении вблизи поверхности ферромагнитного материала. Оценка отсутствующего объема основана на амплитуде особенности, представленной данными во множестве точек данных.

10 [0009] Модуль оценки размера дефекта может оценивать площадь отсутствующего материала на основе длины особенности, представленной данными во множестве точек данных, в двух пространственных направлениях.

[0010] Модуль оценки размера дефекта может оценивать глубину отсутствующего материала на основе оцененного объема отсутствующего материала и длины
15 особенности, представленной данными во множестве точек данных, в двух пространственных направлениях.

[0011] Система может также включать в себя вычислитель остаточной напряженности магнитного поля. Вычислитель остаточной напряженности магнитного поля выполнен с возможностью определения амплитуды магнитного поля, созданного ферромагнитным
20 материалом на удалении от местоположения вблизи поверхности ферромагнитного материала. Амплитуда напряженности магнитного поля основана на по меньшей мере одной из точек данных карты. Система может также включать в себя модуль оценки размера дефекта. Модуль оценки размера дефекта выполнен с возможностью оценки объема материала, отсутствующего на ферромагнитном материале в местоположении
25 вблизи поверхности ферромагнитного материала. Оценку объема выполняют в соответствии с амплитудой данных во множестве точек данных и амплитудой магнитного поля, созданного ферромагнитным материалом в местоположении на удалении от местоположения вблизи поверхности ферромагнитного материала.

[0012] Модуль оценки размера дефекта может оценивать площадь отсутствующего
30 материала на основе длины особенности, представленной данными во множестве точек данных, в двух пространственных направлениях.

[0013] Модуль оценки размера дефекта может выполнять оценку глубины отсутствующего материала на основе оцененного объема отсутствующего материала и длины особенности, представленной данными во множестве точек данных, в двух
35 пространственных направлениях.

[0014] Каждый магнитометр из множества магнитометров может включать в себя три ортогонально ориентированных магнитометра. Каждая точка данных карты может представлять напряженность измеренного магнитного поля в каждом из трех ортогональных направлений. Сопоставитель с образцом может распознать для каждого
40 из трех ортогональных направлений множество точек данных, соответствующих заданному пространственному образцу напряженности магнитного поля, и местоположение вблизи поверхности ферромагнитного материала, которое соответствует множеству точек данных. Сопоставитель с образцом может, таким образом, распознать три местоположения вблизи поверхности ферромагнитного
45 материала. Система может также включать в себя сумматор. Сумматор может рассчитать уточненное местоположение вблизи поверхности ферромагнитного материала, исходя из трех распознанных местоположений, и выдает уточненное местоположение.

[0015] Сопоставитель с образцом может рассчитать множество значений пространственных производных, исходя из точек данных карты. Сопоставитель с образцом может распознать множество точек данных, соответствующих заданному пространственному образцу напряженности магнитного поля, исходя из множества значений пространственных производных.

[0016] Множество точек данных, соответствующих заданному пространственному образцу напряженности магнитного поля, может соответствовать потере части ферромагнитного материала в результате коррозии или эрозии.

[0017] Множество точек данных, соответствующих заданному пространственному образцу напряженности магнитного поля, соответствует трещине в ферромагнитном материале.

[0018] Другой вариант осуществления настоящего изобретения обеспечивает способ обнаружения дефектов в ферромагнитном материале. Способ включает в себя измерение магнитного поля, созданного ферромагнитным материалом. Точки данных из двумерной карты генерируют, исходя из измеренного магнитного поля. Каждая точка данных соответствует соответствующему местоположению на поверхности ферромагнитного материала. Каждая точка данных представляет напряженность измеренного магнитного поля вблизи местоположения. На двумерной карте множество точек данных распознано. Множество точек данных соответствует заданному пространственному образцу напряженности магнитного поля. Выходом является местоположение вблизи поверхности ферромагнитного материала. Местоположение соответствует множеству точек данных. Местоположение соответствует дефекту.

[0019] Измерение магнитного поля может включать в себя размещение множества магнитометров вблизи поверхности ферромагнитного материала. Каждый магнитометр из множества магнитометров неподвижно крепится в положении относительно ферромагнитного материала.

[0020] Измерение магнитного поля может включать в себя физическое сканирование ферромагнитного материала при помощи по меньшей мере одного магнитометра путем перемещения по меньшей мере одного магнитометра относительно ферромагнитного материала.

[0021] Перемещение по меньшей мере одного магнитометра относительно ферромагнитного материала может включать размещение одномерной решетки из по меньшей мере двух магнитометров вдоль профиля, ориентированного по существу перпендикулярно оси ферромагнитного материала. Одномерную решетку из по меньшей мере двух магнитометров можно перемещать вдоль оси ферромагнитного материала.

[0022] При необходимости объем материала, отсутствующего на ферромагнитном материале в местоположении вблизи поверхности ферромагнитного материала, можно оценить. Оценку можно выполнять на основе амплитуды особенности, представленной данными во множестве точек данных.

[0023] При необходимости амплитуда напряженности магнитного поля, созданного ферромагнитным материалом в местоположении на удалении от местоположения вблизи поверхности ферромагнитного материала, может быть определена на основе по меньшей мере одной из точек данных карты. Объем материала, отсутствующего на ферромагнитном материале в месте, расположенном вблизи поверхности ферромагнитного материала, можно оценить в соответствии с амплитудой данных во множестве точек данных, и амплитуды магнитного поля, созданного ферромагнитным материалом в местоположении на удалении от местоположения вблизи поверхности ферромагнитного материала.

[0024] При необходимости можно оценить площадь отсутствующего материала. Оценка может быть основана на длине особенности, представленной данными во множестве точек данных, в двух пространственных направлениях.

5 [0025] Можно оценить глубину отсутствующего материала по окружности. Оценка может быть основана на объеме отсутствующего материала и длине особенности, представленной данными во множестве точек данных, в двух пространственных направлениях.

[0026] Измерение магнитного поля может включать в себя измерение магнитного поля при помощи множества магнитометров. Каждый магнитометр из множества
10 магнитометров может включать в себя три ортогонально ориентированных магнитометра. Генерирование точек данных может включать в себя генерирование точек данных таким образом, что каждая точка данных карты представляет напряженность измеренного магнитного поля в каждом из трех ортогональных направлений. Распознавание множества точек данных, соответствующих заданному
15 пространственному образцу, для каждого из трех ортогональных направлений может включать в себя, распознавание множества точек данных, соответствующих заданному пространственному образцу напряженности магнитного поля, и местоположения вблизи поверхности ферромагнитного материала, соответствующего множеству точек данных, таким образом выполняя распознавание трех местоположений вблизи поверхности
20 ферромагнитного материала. Дополнительно, уточненное местоположение вблизи поверхности ферромагнитного материала можно рассчитать исходя из трех распознанных местоположений. Выдача местоположения может включать в себя выдачу уточненного местоположения.

[0027] Множество значений пространственных производных можно рассчитать
25 исходя из точек данных карты. Распознавание множества точек данных, соответствующих заданному пространственному образцу, может включать в себя распознавание множества точек данных, соответствующих заданному пространственному образцу напряженности магнитного поля, исходя из множества значений пространственных производных.

30 [0028] Распознавание множества точек данных, соответствующих заданному пространственному образцу, может включать в себя распознавание множества точек данных, которые соответствуют потере части ферромагнитного материала в результате коррозии или эрозии.

[0029] Распознавание множества точек данных, соответствующих заданному
35 пространственному образцу, может включать в себя распознавание множества точек данных, которые соответствуют трещине в ферромагнитном материале.

[0030] Еще один вариант осуществления настоящего изобретения предусматривает компьютерный программный продукт для обнаружения дефектов в ферромагнитном материале. Компьютерный программный продукт включает в себя некрatковременный
40 компьютерочитаемый носитель. Компьютерочитаемый программный код хранится на носителе. Компьютерочитаемый программный код включает в себя измерительный модуль, модуль генерации точек данных, модуль распознавания дефекта и модуль выдачи местоположения дефекта.

[0031] Измерительный модуль выполнен с возможностью приема данных магнитного
45 поля от множества магнитометров, размещенных вблизи поверхности ферромагнитного материала. Множество магнитометров выполнены с возможностью измерения магнитного поля, созданного ферромагнитным материалом. Множество магнитометров также выполнены с возможностью генерации данных магнитного поля. Данные

магнитного поля базируются на измеренном магнитном поле. Каждый магнитометр из множества магнитометров неподвижно закреплен в положении относительно ферромагнитного материала.

[0032] Модуль генерации точек данных выполнен с возможностью генерации точек данных двумерной карты исходя из измеренного магнитного поля. Каждая точка данных соответствует соответствующему местоположению на поверхности ферромагнитного материала. Каждая точка данных представляет напряженность измеренного магнитного поля вблизи местоположения.

[0033] Модуль распознавания дефекта выполнен с возможностью распознавания множества точек данных, соответствующих заданному пространственному образцу напряженности магнитного поля на двумерной карте. Модуль выдачи местоположения дефекта выполнен с возможностью выдачи местоположения вблизи поверхности ферромагнитного материала, соответствующего множеству точек данных.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ЧЕРТЕЖЕЙ

[0034] Настоящее изобретение будет более понятным со ссылкой на следующее подробное описание конкретных вариантов осуществления изобретения в сочетании с чертежами, на которых:

[0035] На фиг. 1 представлен вид в перспективе гипотетической трубы и вид в поперечном сечении части трубы, как это известно из уровня техники.

[0036] На фиг. 2 представлен вид в перспективе гипотетической изогнутой трубы, как это известно из уровня техники.

[0037] На фиг. 3 схематически показано магнитное поле, созданное гипотетическим магнитным диполем, как это известно из уровня техники.

[0038] Фиг. 4 содержит графики гипотетических примерных напряженностей V_x , V_y и V_z поля, измеренного при помощи магнитометра вдоль трех осей вдоль линии по фиг. 3.

[0039] На фиг. 5 схематически показана гипотетическая пластина из ферромагнитного материала, как это известно из уровня техники.

[0040] На фиг. 6 схематически показана пластина по фиг. 5 в виде множества мелких выровненных магнитных диполей, как раскрывается согласно вариантам осуществления настоящего изобретения.

[0041] На фиг. 7 схематически показана пластина по фиг. 5 с дефектом на своей поверхности.

[0042] На фиг. 8 схематически показана гипотетическая труба, показывающая артефакт геликоидальной толщины в результате ее изготовления, как это известно из уровня техники.

[0043] На фиг. 9 схематически показана труба по фиг. 8 после ее мысленного разрезания и развальцовки, как это известно из уровня техники.

[0044] Фиг. 10 содержит график одной составляющей магнитного поля вокруг реальной трубы, имеющей дефект в своей наружной поверхности, согласно варианту осуществления настоящего изобретения.

[0045] На фиг. 11 представлен вид сбоку блока магнитометрических датчиков согласно варианту осуществления настоящего изобретения.

[0046] На фиг. 12 схематически показан комплект блоков магнитометрических датчиков, прикрепленных к трубе согласно варианту осуществления настоящего изобретения.

[0047] На фиг. 13 схематически показан комплект блоков магнитометрических датчиков, прикрепленных к трубе согласно варианту осуществления настоящего

изобретения.

[0048] На фиг.14 представлен схематический вид в перспективе решетки магнитометрических датчиков, размещенных по окружности вокруг трубы согласно варианту осуществления настоящего изобретения.

5 [0049] На фиг. 15 представлен схематический вид в перспективе пары монтажных плат, удерживающих магнитометры, например, в каждом элементе решетки магнитометрических датчиков по фиг.14 согласно варианту осуществления настоящего изобретения.

10 [0050] На фиг. 16 представлен схематический вид в перспективе колец магнитометрических датчиков, размещенных около трубы согласно варианту осуществления настоящего изобретения.

[0051] Фиг. 17 и 18 содержат графики магнитометрических данных вдоль двух соответствующих размеров реальной трубы согласно варианту осуществления настоящего изобретения.

15 [0052] Фиг. 19 и 20 содержат графики производных, рассчитанных исходя из графиков по фиг.17 и 18, соответственно, согласно варианту осуществления настоящего изобретения.

20 [0053] На фиг. 21 представлен график напряженности магнитного поля для трех смоделированных дефектов одинакового диаметра, но имеющих различную глубину, согласно варианту осуществления настоящего изобретения.

[0054] На фиг. 22 представлен график напряженности магнитного поля для трех смоделированных дефектов, имеющих одинаковую глубину, но различные диаметры, согласно варианту осуществления настоящего изобретения.

25 [0055] На фиг. 23 представлен график напряженности магнитного поля вдоль оси x вблизи дефекта в трубе согласно варианту осуществления настоящего изобретения.

[0056] На фиг. 24 представлен график напряженности магнитного поля вдоль оси z вблизи дефекта в трубе согласно варианту осуществления настоящего изобретения.

[0057] На фиг. 25 представлен график напряженности магнитного поля по фиг. 23 после нормализации согласно варианту осуществления настоящего изобретения.

30 [0058] На фиг. 26 показан схематический вид в перспективе трубы и зазор между детектором или устройством обнаружения и дефектом в трубе согласно варианту осуществления настоящего изобретения.

35 [0059] На фиг. 27 представлен график, показывающий различия мощности сигнала от дефекта на внутренней части трубы и мощности сигнала от дефекта на внешней части трубы согласно варианту осуществления настоящего изобретения.

[0060] На фиг. 28 представлен график поверхности, полученный в результате вычитания, показывающий одну ось магнитного поля в соответствии с анализом во времени, согласно варианту осуществления настоящего изобретения.

40 [0061] На фиг. 29 и 30 схематически представлены виды в перспективе устройства для выполнения физического сканирования изделий в соответствии с соответствующими вариантами осуществления настоящего изобретения.

[0062] На фиг. 31 представлена схематическая блок-схема удаленного магнитометрического датчика, осуществляющего беспроводную связь с базовой станцией согласно варианту осуществления настоящего изобретения.

45 **ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ИЗОБРЕТЕНИЯ**

[0063] Варианты осуществления настоящего изобретения позволяют обнаруживать дефекты в изделиях, содержащих ферромагнитные материалы, не требуя введения энергии в материалы и без необходимости удаления теплоизоляции, покрытий

поверхности и тому подобного с материалов или изделий. Ферромагнитные материалы в изделиях создают магнитные поля. Варианты осуществления настоящего изобретения обнаруживают и определяют характеристики дефектов в изделиях путем анализа магнитных полей изделий с целью нахождения участков магнитных полей, которые
 5 характерным образом отличаются от остаточных магнитных полей, создаваемых участками изделий, не имеющими дефектов. Участки магнитных полей, которые отличаются характерным образом, соответствуют местоположениям дефектов. Остаточные магнитные поля соответствуют участкам изделий, находящимся на удалении от дефектов. Характеристика дефекта может включать в себя объем материала,
 10 потерянного из-за каждого дефекта, и/или ширину и/или глубину каждого дефекта. Проблема любого магнитометрического подхода состоит в том, что собственное остаточное магнитное поле изделия, как правило, является неоднородным и отражает отклонения материала и изготовления по всему изделию. Ключевой задачей для данных способов является выделение магнитной "регистрируемой характеристики" дефекта из
 15 собственного "шума" в остаточном поле изделия.

Обзор

[0064] В некоторых вариантах осуществления двумерную решетку магнитометрических датчиков размещают параллельно внешней поверхности изделия, подлежащего анализу. Решетка магнитометрических датчиков собирает данные,
 20 обеспечивающие возможность создания двумерной карты магнитометрических данных (карты магнитного поля). В данном контексте, "мат" из магнитометрических датчиков, обернутый вокруг круглого поперечного сечения трубы или другого непланарного изделия, считается двумерным.

[0065] В некоторых вариантах осуществления изделие физически сканируют вдоль
 25 одного размера при помощи одномерной решетки магнитометрических датчиков, тем самым создавая двумерную карту магнитометрических данных. В некоторых вариантах осуществления изделие подвергают растровому, спиральному или другому сканированию вдоль более чем одного линейного размера при помощи одного магнитометрического датчика или небольшой группы магнитометрических датчиков
 30 для создания двумерной карты магнитометрических данных.

[0066] Ферромагнитный материал в изделии создает магнитное поле. Магнитные поля являются векторными величинами, характеризующимися как напряженностью, так и направлением. Карта магнитометрических данных (карта магнитного поля) представляет напряженность магнитного поля в каждой из множества точек над
 35 поверхностью изделия. Карта магнитного поля может отображать одну, две или три составляющие 3-мерного вектора напряженности магнитного поля.

[0067] В некоторых вариантах осуществления поиск магнитометрических данных ведут по существу для любого из нескольких заданных образцов (форм). Область, в которой напряженность магнитного поля или любая из составляющих 3-мерного
 40 магнитного поля изменяется в пространстве в соответствии с одним из заданных образцов, соответствует местоположению дефекта. В соответствии с одним из данных заданных образцов, вдоль прямой линии магнитное поле начинается с остаточного уровня, и затем напряженность возрастает до пикового значения относительно остаточного, затем напряженность падает до впадины ниже остаточного, и затем
 45 возвращается на остаточный уровень, в некоторой степени напоминая по форме один цикл синусоиды.

[0068] В соответствии с другим одним из этих заданных образцов, вдоль прямой линии магнитное поле начинается с остаточного уровня, и затем напряженность

возрастает до пикового значения относительно остаточного, затем напряженность падает до впадины ниже остаточного, и затем напряженность возрастает до второго пика относительно остаточного, и затем возвращается на остаточный уровень, в некоторой степени напоминая по форме один и половину циклов косинусоиды.

5 [0069] Как уже отмечалось, остаточное магнитное поле соответствует участкам изделия, находящимся на удалении от любого дефекта. Однако из-за того, что изделие не является абсолютно однородным, остаточное поле имеет множество параметров, которые могут маскировать наличие регистрируемой характеристики дефекта. Выполняя поиск регистрируемых характеристик дефекта при измерениях магнитного поля, можно
10 распознать местоположение дефектов, выполняя сравнение с не дефектными признаками в остаточном поле. Данный тип анализа, в котором магнитные поля дефекта(-ов) отличают от остаточного поля, упоминается в качестве средства обнаружения дефектов, как "пространственный анализ."

[0070] В некоторых вариантах осуществления магнитометрические данные изделия
15 собирают, когда изделие не было в употреблении или в какой-либо другой момент времени. Магнитометрические данные сохраняют, и впоследствии магнитометрические данные для того же участка изделия собирают снова и сравнивают два набора данных. Различия между двумя наборами данных представляют возможные дефекты. Данный тип анализа, в котором наборы данных собирают в различные моменты времени для
20 определения разницы между наборами данных, упоминается как "анализ во времени". Тогда возможные дефекты можно анализировать на предмет регистрируемых характеристик дефектов, как в пространственном анализе.

[0071] В некоторых вариантах осуществления множество решеток магнитометрических датчиков прикрепляют к изделию, подлежащему анализу, и
25 оставляют прикрепленными к изделию по существу на весь срок его эксплуатации или на другой длительный период времени. Каждая такая решетка зафиксирована на изделии дискретно. Каждая решетка может включать в себя источник электроэнергии, обеспечивающий электрическую энергию для работы решетки. Решетки могут соединяться между собой при помощи проводной или беспроводной сети. Сеть может
30 использовать протокол обмена сообщениями, алгоритм маршрутизации, управление синхронизацией и другие аспекты, которые обеспечивают возможность работы линейной сети, включающей в себя сотни узлов с более чем десятью сетевыми сегментами, при этом потребляя очень мало энергии, то есть способной получать питание от источника аккумулированной электроэнергии.

[0072] Решетки магнитометрических датчиков через сеть посылают данные на базовую станцию, которая анализирует данные с целью обнаружения дефектов. Базовая станция может быть соединена с распределенной управляющей системой, системой
35 управления станцией или другой внешней системой. Внешняя система может запрашивать базовую станцию информацию о дефектах или подавать базовой станции команду на инициирование обнаружения дефектов. В случае необходимости или в качестве
40 альтернативы, базовая станция может уведомить внешнюю систему о дефектах без запроса от внешней системы. Аналогичным образом базовая станция может подать сигнал тревоги, например, включить свет, включить звуковой сигнализатор, послать сообщение электронной почты или инициировать телефонный вызов и воспроизвести
45 предварительно записанное или синтезированное голосовое сообщение, если она обнаруживает дефект.

[0073] Как уже отмечалось, для сбора магнитометрических данных решетка магнитометрических датчиков может быть закреплена на изделии, либо изделия могут

быть физически отсканированы путем перемещения магнитометрических датчиков относительно изделий с целью сбора магнитометрических данных. В любом случае, для обнаружения дефектов магнитометрические данные можно анализировать во времени или в пространстве.

5 Дефекты

[0074] Как уже отмечалось, дефектами могут быть потери материала из-за коррозии и/или эрозии. Примеры и варианты осуществления описаны в данном документе применительно к трубам. Однако данные варианты осуществления и примеры подходят для других типов изделий, например, плоских листов, корпусов судов, резервуаров/

10 сосудов для хранения, балок, колонн и тому подобного.

[0075] На фиг.1 представлен вид в перспективе гипотетической трубы 100 и поперечное сечение (сечение А-А) трубы 100. Почти любая труба подвержена развитию дефектов в результате коррозии или эрозии на внешней поверхности трубы, как проиллюстрировано на примере 102, например, в результате кислотного дождя, разлива химического вещества или случайного или преднамеренного физического повреждения. Большинство труб также подвержено развитию дефектов на внутренних поверхностях труб, как проиллюстрировано на примере 104, 106 и 108. Например, песок, поступающий из нефтяной или газовой скважины, обычно переносится вдоль нижней части трубы и может, вследствие этого, за счет трения изнашивать нижнюю часть трубы, как

20 проиллюстрировано на примере 104. Области внутренних стенок трубы, где верхняя поверхность текучей среды внутри трубы встречается с внутренней стенкой трубы, как проиллюстрировано на примере 106 и 108, являются обычными местами коррозии. В трубе могут также развиваться дефекты в пределах толщины стенки трубы, как проиллюстрировано на примере 110.

[0076] Эрозия часто происходит внутри и немного вниз по потоку от изгиба в трубе 200 в месте, обозначенном пунктирной линией 202 на фиг. 2. Турбулентность, связанная с изменением направления потока, создает возможные места для коррозии. Стрелки показывают направление потока внутри трубы 200. Расширения и сужения в трубопроводах (не показанные) не только создают возможные места для эрозии, но

30 они также имеют тенденцию создавать турбулентность ниже по потоку и, следовательно, приводят к возникновению дефектов вблизи к областям турбулентности.

Магнитометры и обнаружение дефектов

[0077] На фиг.3 схематически показано магнитное поле, созданное гипотетическим магнитным диполем 300. Силовые линии магнитного поля, проиллюстрированные

35 линиями 302, представляют собой магнитное поле. Магнитный диполь 300 лежит в плоскости 304, и для простоты показаны только силовые линии магнитного поля 300 в плоскости 304.

[0078] Векторные магнитометры измеряют составляющие вектора магнитного поля. То есть векторный магнитометр измеряет напряженность магнитного поля,

40 направленную вдоль оси магнитометра. Трехосевой магнитометр 306 измеряет напряженность магнитного поля вдоль трех осей X, Y и Z. Если магнитометр 306 проходит вдоль линии 308 параллельно магнитному диполю 302, магнитометр 306 измеряет изменение магнитного поля вдоль линии 308. Например, датчик по оси X измеряет различные напряженности поля, которые представляют составляющие магнитных векторов по оси X, представленные стрелками A, B, C, D, E, F, G и H. Фиг. 4 содержит графики гипотетических примерных напряженностей V_x , V_y и V_z поля, измеренных при помощи магнитометра 306 вдоль трех осей вдоль линии 308.

Необходимо отметить, что график V_x напоминает график косинусоиды, а график V_z

напоминает график синусоиды. Данные формы являются характеристиками магнитного поля вблизи отдельного магнитного диполя.

[0079] На фиг. 5 схематически показана гипотетическая пластина из ферромагнитного материала 500. Пластину 500 можно рассматривать, как составленную из множества мелких выровненных магнитных диполей, проиллюстрированных магнитными диполями 602 и 604, как схематически показано на фиг.6. Силовые линии магнитного поля проходят от каждого маленького магнитного диполя к его соседям спереди и сзади, в основном по прямым линиям, и силовые линии магнитного поля выходят из пластины 500 на ее концах 502 и 504, по существу как проиллюстрировано на фиг. 3. Через верх, низ или боковую часть пластины 500 выходит лишь несколько линий магнитного поля или ни одна из них.

[0080] Однако, если пластина содержит дефект, некоторая часть материала потеряна, как проиллюстрировано на фиг. 7 на примере дефекта 700 на поверхности блока 702. Следовательно, один или более небольших магнитных диполей, таких как, магнитные диполи 602 или 604, потеряны, и полученное в результате асимметричное расположение остальных магнитных диполей приводит к тому, что некоторые силовые линии магнитного поля выходят из блока через верх, низ и/или боковые части блока 702. Соответственно, регистрируемая характеристика дефекта, то есть, отсутствующий объем ферромагнитного материала, может рассматриваться как аппроксимированный эквивалентным объемом противоположно ориентированных магнитных диполей. Даже если потеряны только внутренние, то есть, не поверхностные магнитные диполи, полученное в результате асимметричное расположение остальных магнитных диполей приводит к тому, что некоторые силовые линии магнитного поля выходят из блока через верх, низ и/или боковую часть блока 702.

[0081] Локальное магнитное поле вблизи потерянных магнитных диполей аналогично магнитному полю, описанному выше в отношении фиг. 3 и 4. Следовательно, местоположение дефекта можно найти, определив местоположение участка магнитного поля, созданного пластиной 702, имеющего форму, аналогичную форме графика V_x или V_y по фиг. 4. Таким образом, основные формы графиков V_x и V_y можно использовать в качестве магнитных регистрируемых характеристик дефектов.

Обнаружение дефектов трубы

[0082] Трубу изготавливают различными способами. Каждый способ оставляет после себя признаки неоднородности, связанные либо с составом, толщиной, термической историей, либо с каким-либо другим артефактом. Все они обладают возможностью быть причиной неоднородности внутреннего остаточного магнитного поля изделия и иметь такие признаки в отношении размера и уровня сложности, что нахождение регистрируемой характеристики дефекта оказывается непростым. Обычным артефактом изготовления труб является спиральный (геликоидальный) рисунок толщины, проходящий вниз по длине трубы. На фиг.8 схематически показана труба 800, иллюстрирующая артефакт 802 геликоидальной толщины в результате ее изготовления. В принципе, трубу 800 можно разрезать вдоль линии 804, параллельной продольной оси, а затем раскатать в плоский лист 900, как это схематически проиллюстрировано на фиг. 9. Этот лист 900 можно анализировать, как описано выше со ссылкой на фиг.3-7.

[0083] Фиг.10 содержит график x -составляющей магнитного поля трубы фактическим диаметром около 4,5 дюйма (114,3 мм), имеющей дефект размером 1 дюйм × 1 дюйм × 0,06 дюйма (25,4 мм × 25,4 мм × 1,5 мм) на своей наружной поверхности. График представлен в виде деформированной поверхности 1000. Радиальное расстояние до

поверхности 1000 от продольной оси 1002 трубы показывает напряженность х-составляющей магнитного поля трубы.

[0084] Процессы изготовления трубы оставляют после себя артефакты, отображенные в магнитном поле. Часто наблюдаемый в поле спиральный рисунок, обусловленный процессами изготовления в виде признака 802 (фиг. 8 и 9), очевиден по фиг. 10, где гребень напряженности магнитного поля в пространственном отношении соответствует спиральному признаку изготовления, как показано пунктирной спиральной линией 1004.

[0085] На фиг. 10 также ясно виден пик 1006 напряженности магнитного поля. Кроме того, как показано пунктирной линией 1008, форма поверхности вблизи пика 1006 аналогична форме кривой по фиг. 4 и является, вследствие этого, характеристикой дефекта.

[0086] Аналогичные виды анализов можно выполнять с использованием у-составляющей магнитного поля вокруг трубы и z-составляющей магнитного поля.

Корреляция местоположений дефектов, измеренных с помощью трех анализов, обеспечивает более точное определение местоположения дефектов, чем анализ только одной составляющей магнитного поля.

Решетка датчиков

[0087] На фиг. 11 схематически показан один вариант осуществления настоящего изобретения. В данном варианте осуществления блок 1100 магнитометрических датчиков закреплен вокруг трубы 1102. Блок 1100 магнитометрических датчиков включает в себя два полукруглых участка (полукольца), шарнирно соединенных друг с другом. Шарнир расположен на обратной стороне блока 1100 магнитометрических датчиков и поэтому не виден на фиг. 11. Освобождаемая защелка 1104 механически скрепляет два полукольца друг с другом, таким образом зажимая блок 1100 магнитометрических датчиков вокруг трубы 1102. Защелка 1104 прикрепляет блок 1100 магнитометрических датчиков к трубе 1102 достаточно плотно, чтобы предотвратить вращение блока 1100 магнитометрических датчиков вокруг трубы 1102 или перемещение блока 1100 магнитометрических датчиков вдоль трубы 1102 в ответ на силы, которые, как ожидается, могут возникнуть при обычном использовании, например, в промышленной установке. Защелка 1104 может быть снабжена ключом для предотвращения несанкционированного удаления или вмешательства в работу блока 1100 магнитометрических датчиков. Блок 1100 магнитометрических датчиков может быть сконструирован так, чтобы удовлетворять требованиям стандартов АТЕХ/UL, касающихся взрывобезопасности, а также для защиты от атмосферных воздействий.

[0088] Преимущество обеспечено тем, что поскольку блок 1100 магнитометрических датчиков не должен находиться в контакте с изделием, подлежащим измерению, он может быть прикреплен к трубе 1102 поверх любого существующего изоляционного слоя трубы, например, теплоизоляции или покрытия поверхности трубы без удаления изоляционного слоя трубы. При необходимости, дополнительную теплоизоляцию или другой изоляционный слой можно нанести поверх установленного блока 1100 магнитометрических датчиков.

[0089] Участок 1105 внешнего кожуха блока 1100 магнитометрических датчиков на фиг. 11 показан как удаленный, чтобы открыть решетку 1106 магнитометрических датчиков. Каждый магнитометрический датчик в решетке 1106 может быть трехосным магнитометрическим датчиком. Как можно видеть через отверстие 1105 во внешнем кожухе, магнитометрические датчики 1106 размещены вокруг трубы 1102 в виде колец. Каждое кольцо включает в себя несколько магнитометрических датчиков, регулярно

расположенных вокруг кольца. Данные внутренние кольца находятся на расстоянии друг от друга в продольном направлении вдоль трубы 1102 через определенные интервалы, по существу, создавая регулярную двумерную решетку магнитометрических датчиков, расположенных параллельно внешней поверхности трубы 1102 и отстоящих от трубы 1102 на фиксированное расстояние, возможно равное нулю. Монтажная плата 1108 включает в себя антенну 1110 и сети связи, которые осуществляют управление магнитометрическими датчиками 1106, сбор данных от магнитометрических датчиков 1106 и осуществляет связь с другими блоками магнитометрических датчиков и/или базовой станцией (не показанной) посредством беспроводной сети передачи данных.

[0090] Комплект источников 1112 электроэнергии генерирует электричество за счет разницы температур между трубой 1102 и окружающей средой. При необходимости или в качестве альтернативы, источники 1112 электроэнергии могут включать в себя фотоэлектрические элементы и/или любую другую подходящую технологию аккумуляирования энергии. При необходимости или в качестве альтернативы можно использовать батарею первичных источников тока с источником или без источника электроэнергии, если потребность в электроэнергии и продолжительность работы таковы, что это является равноценной альтернативой. Аккумуляторные батареи 1114 могут быть включены в состав для сохранения накопленной энергии до тех пор, пока она необходима для монтажной платы 1108. Источники 1112 электроэнергии могут располагаться в кольце, как показано.

[0091] Расстояние между магнитометрами 1106 можно выбирать таким, чтобы достичь необходимой плотности магнитометров, например, расстояние между магнитометрами около 0,3 дюйма (7,6 мм), то есть, расстояние между смежными трехосевыми магнитометрическими датчиками. Расстояние между магнитометрами можно выбирать на основе минимального размера обнаруживаемого дефекта. Расстояние между магнитометрами должно выбираться так, чтобы наименьший обнаруживаемый дефект перекрывался достаточным количеством трехосевых магнитометрических датчиков, обеспечивая возможность обнаружить форму регистрируемой характеристики дефекта в карте магнитного поля.

[0092] На фиг. 12 схематически показан комплект блоков 1200 магнитометрических датчиков, прикрепленных к трубе 1102. Как показано на фиг. 12, несколько блоков 1200 магнитометрических датчиков можно плотно разместить по всей длине или на участке трубы 1202. В данном варианте осуществления каждое кольцо источника электроэнергии, представленное в качестве примера кольцами 1204, 1206 и 1206 источников электроэнергии, питают электроэнергией два блока магнитометрических датчиков, по одному на каждой стороне кольца источника электроэнергии. Как схематически показано на фиг. 13, комплект блоков 1300 магнитометрических датчиков может быть прикреплен к трубе 1302 и располагаться на расстоянии друг от друга вдоль трубы 1302.

[0093] На фиг. 14 в крупном масштабе представлен вид решетки 1400 магнитометрических датчиков, согласно другому варианту осуществления. В данном варианте осуществления решетка 1400 магнитометрических датчиков размещена по окружности или частично вокруг трубы 1402, как на фиг. 11-13. Решетка 1400 включает в себя несколько сеточных модулей, примерами которых являются сеточные модули 1404, 1406 и 1408. Однако для ясности на фиг. 14 показано только восемь сеточных модулей. Каждый сеточный модуль 1404-1408 может крепиться с возможностью снятия к паре периферических монтажных колец 1410 и 1412. При необходимости или в качестве альтернативы решетка модулей 1404-1408 может быть заключена внутрь защитного

кожуха, как описано в отношении фиг.11-13. В некоторых вариантах осуществления дополнительные сеточные модули крепятся к монтажным кольцам 1410 и 1412, так что труба 1402 окружена сеточными модулями. Однако в других вариантах осуществления, сеточные модули 1404-1408 могут покрывать только участок окружности трубы 1402.

5 В некоторых вариантах осуществления сеточные модули 1404-1408 могут крепиться при помощи электрических штекеров, которые облегчают замену сеточных модулей 1404-1408 в полевых условиях. В некоторых вариантах осуществления сеточные модули 1404-1408 обладают возможностью замены во время работы.

[0094] Решетка 1400 может получать питание от источника 1414 электроэнергии и может включать в себя монтажную плату 1416. Решетка 1400 включает в себя беспроводной передатчик и антенну (не показаны).

[0095] В некоторых вариантах осуществления каждый сеточный модуль 1404-1408 включает в себя пару монтажных плат 1500 и 1502, как показано на фиг. 15. Каждая монтажная плата из пары монтажных плат 1500-1502 включает в себя ряд трехосевых магнитометров, примерами которых являются магнитометры 1504, 1506 и 1508. В некоторых вариантах осуществления, каждая монтажная плата включает в себя 16 трехосевых магнитометров 1504-1508.

[0096] Каждый магнитометрический датчик 1504-1508 внутри антенного модуля 1500-1502 включает в себя три магнитометра (что является тем же самым, что трехосевой магнитометрический датчик). Три магнитометра могут быть ориентированы взаимно ортогонально, либо они могут быть ориентированы в соответствии с каким-либо другим известным расположением. В данном случае ориентация магнитометра относится к оси основной чувствительности магнитометра. В некоторых вариантах осуществления каждый сеточный модуль 1404-1408 (фиг. 14) включает в себя решетку, например, решетку 16×1 (как на фиг. 15) или решетку 16×16 трехосевых магнитометрических датчиков.

Поиск по образцу для определения расположения регистрируемых характеристик дефектов

[0097] Как уже отмечалось, в некоторых вариантах осуществления производится поиск магнитометрических данных любого из нескольких заранее заданных пространственных образцов (регистрируемых характеристик), указывающих на дефект. Образы могут иметь синусоидальную форму и длина (длина волны) синусоиды может быть пропорциональна размеру дефекта. В этом смысле длины волн синусоид в основном априори неизвестны. Как описано выше, кольца 1600 магнитометрических датчиков размещены по окружности трубы 1602, создавая регулярную двумерную решетку магнитометрических датчиков, размещенных параллельно внешней поверхности трубы 1602, как схематически показано на фиг. 16. Данная решетка магнитометрических датчиков выдает магнитометрические данные. На фиг. 17 показан график таких магнитометрических данных для реальной трубы. Данные на фиг. 17 изображают составляющие напряженности магнитного поля, измеренные магнитометрами, ориентированными по оси x, то есть, вдоль длины трубы. На фиг. 18 изображены составляющие напряженности магнитного поля, измеренные магнитометрами, ориентированными по оси z, то есть, перпендикулярными (или почти перпендикулярными) к поверхности трубы. График (не показан) изображает составляющие напряженности магнитного поля, измеренные магнитометрами, ориентированными по оси y, то есть, перпендикулярными магнитометрами, ориентированными по оси x и y.

[0098] Каждый магнитометрический датчик (внутри блока 1100 датчиков) (фиг. 11)

размещен в заданном угловом положении ("положении часов"), представленном в качестве примера как 1604 (фиг. 16), вокруг кольца 1600. В варианте осуществления, который генерирует данные для фиг. 17 и 18, каждое кольцо включает в себя 18 магнитометрических датчиков. Однако можно использовать другое количество датчиков. Каждая, в основном горизонтальная, линия, представленная в качестве примера линиями 1700, 1702 и 1704, представляет данные от магнитометра, измеряющего составляющую x в отдельном угловом положении вокруг трубы. Таким образом, вертикальная ось представляет угловое положение вокруг трубы. Горизонтальная ось представляет расстояние вдоль длины трубы. Таким образом, точки вдоль каждой линии 1700-1704 представляют напряженности магнитного поля вдоль длины трубы. Аналогично, на фиг. 18 показана составляющая z магнитного поля в положениях, соотнесенных с данными на фиг. 7. Геликоидальные изменения магнитного поля, обусловленные процессами изготовления труб, очевидны, что отражено в 1710, 1712, 1800 и 1802. Характерные особенности дефекта представлены в 1714, 1716, 1804 и 1806. То, как обнаружен данный дефект, описано ниже.

[0099] Данные, полученные от магнитометров, нуждаются в такой обработке, при которой их непрерывно дифференцируют по пространственным измерениям вдоль трубы и вокруг трубы. Для заполнения пропусков в данных от датчиков, сглаживания и интерполяции данных применяют стандартные подходы, так чтобы можно было рассчитать пространственные частные производные.

[00100] Вдоль каждой линии 1700-1704 на графике на фиг. 17 и аналогично вдоль каждой линии в других двух направлениях составляющей (например, на фиг. 18, которая показывает еще одну из составляющих вектора магнитного поля), рассчитаны пространственные производные (наклоны или скорости изменения). На фиг. 19 и 20 представлены графики производных, рассчитанных на основании графиков на фиг. 17 и 18, соответственно. Стимулом для вычисления производных является то, что, когда регистрируемая характеристика дефекта и остаточное магнитное поле близки по величине, дефекты как правило, имеют меньшую протяженность и они имеют более крутые подъемы и спады. Следовательно, производная обычно усиливает данное более высоко частотное поведение, и дефект отличается как по амплитуде, так и по длине волны, при сравнении с признаками производной остаточного поля. Как видно на фиг. 20, например, большинство кривых имеет умеренную амплитуду (следовательно, умеренные наклоны в сигнале магнитного поля). Это кривые, относящиеся к не дефектным областям. Светло-серые кривые 2000 в центре на фиг. 20 представляют собой две кривые, которые пересекают дефект. Видно, что на данном графике производной данные кривые выделяются по величине от не дефектных (остаточных) областей, обеспечивая дополнительную информацию для алгоритма обнаружения для продолжения работы.

[00101] Автоматический сопоставитель с образцом осуществляет поиск полученных производных для участков, соответствующих одному из нескольких синусоидальных или косинусоидальных образцов. Каждый образец соответствует различной пространственной длине волны. Используют множество образцов, поскольку, как уже отмечалось, пространственная протяженность дефекта, следовательно, пространственная длина волны синуса и косинуса дефекта априори неизвестны. Образец с длиной волны, которая имеет самую сильную корреляцию с данными магнитного поля, используют для обнаружения и определения характеристик дефекта.

[00102] Местоположения дефектов, определенных в процессе трех отдельных анализов, то есть, для x -, y - и z -составляющих магнитного поля, объединяются для

определения окончательного местоположения дефектов и доверительного уровня.

Определение характеристик дефекта

[00103] После того, как местоположение дефекта обнаружено, дефект может быть охарактеризован с точки зрения объема (количества потерянного материала) и протяженности поверхности (на поверхности трубы или параллельно поверхности трубы, если дефект находится внутри трубы). В некоторых случаях делают предположения об общей форме дефекта. Например, можно считать, что дефект в основном круглый или эллиптический на поверхности трубы или имеет вертикальный профиль некоторого вида. С помощью такого рода предположений можно аппроксимировать площадь и глубину дефекта.

[00104] Z-составляющая измеренного магнитного поля перпендикулярна поверхности ферромагнитного материала, которую подвергают измерению, как показано на фиг. 21 для трубы. Амплитуда z-составляющей магнитного поля пропорциональна количеству ферромагнитного материала, потерянного в результате дефекта. Таким образом для дефектов, имеющих идентичные диаметры, z-составляющая магнитного поля также пропорциональна глубине дефекта. График на фиг.21 представляет три смоделированных дефекта, все из которых имеют одинаковый диаметр на поверхности трубы (четыре толщины стенки трубы). Кривая 2100 представляет дефект, глубина которого составляет 30% от толщины стенки трубы. Кривая 2102 представляет дефект, глубина которого составляет 15% от толщины стенки трубы. Кривая 2104 представляет дефект, глубина которого составляет 7% от толщины стенки трубы. Как видно из графика, амплитуда z-составляющей магнитного поля связана с глубиной дефекта. Амплитуда z-составляющей в большей степени пропорциональна объему отсутствующего материала и глубина дефекта может быть выведена для набора предположений о типичных формах роста дефекта. Данный результат можно видеть на всех трех осях магнитного поля. Таким образом, с учетом амплитуды составляющих магнитного поля можно определить объем дефекта, предполагая, что известна намагниченность материала, как дополнительно описано ниже. Данная информация, в сочетании с площадью дефекта и профилем глубины, позволяет определить приблизительную глубину дефекта.

[00105] Однако, для данной глубины дефекта амплитуда любой из составляющих магнитного поля увеличивается с увеличением площади поверхности дефекта. Следует ожидать, что амплитуда сигнала пропорциональна объему дефекта, и когда площадь поверхности увеличивается на определенную глубину, объем дефекта также увеличивается. На фиг. 22 график представляет z-составляющую магнитного поля для трех смоделированных дефектов, все из которых имеют одинаковую глубину (15% от толщины стенки трубы). Кривая 2200 представляет дефект, диаметр которого составляет 2 дюйма (50,8 мм). Кривая 2202 представляет дефект, диаметр которого составляет 1 дюйм (25,4 мм). Кривая 2204 представляет дефект, диаметр которого составляет 0,5 дюйма (12,7 мм). Как можно видеть, при постоянной глубине дефекта амплитуда z-составляющей магнитного поля увеличивается с увеличением площади поверхности дефекта вследствие увеличения объема дефекта. Однако увеличение следует по предсказуемой кривой (поскольку оно представляет собой объем), как показано на 2206. Следовательно, данное увеличение может быть учтено в математической модели. Расстояние от впадины на графике до пикового значения на графике, обозначенное как "протяженность" 2208, пропорционально протяженности дефекта вдоль направления магнитометров, которые создали данный график.

[00106] Мощность сигналов дефекта пропорциональна как объему отсутствующего материала, так и степени намагничивания материала. Таким образом, определение

намагниченности труб полезно для определения объема отсутствующего материала, и, следовательно, полезно для определения характеристик площади и глубины дефекта. Определение магнитного поля не должно выполняться на месте дефекта, но должно выполняться на соседнем, не дефектном месте. Данное измерение локальной

5 "остаточной" намагниченности трубы обеспечивает возможность нормализации сигналов от дефектов, тем самым эффективную калибровку вычислений объема и глубины дефекта. Определив местоположение дефектов, как описано выше, система обнаружения дефектов измеряет уровень остаточной намагниченности трубы, то есть, степень ее намагниченности в области, которая не содержит дефект.

10 [00107] На фиг. 23 представлен график напряженности магнитного поля вдоль оси x (продольно вниз по трубе) вблизи дефекта в трубе. Все три кривые представляют один и тот же дефект трубы и все три кривые показывают регистрируемую характеристику дефекта. Однако прежде чем были получены данные для каждой кривой, трубу намагнитили в разной степени. Для кривой 2300 трубу намагнитили при помощи катушки, работающей при напряженности 690 А/м (ампер/метр). Для кривой 2302 15 трубу намагнитили при 460 А/м. Для кривой 2304 трубу намагнитили при 230 А/м. Как можно видеть на кривых, сигналы от дефектов увеличиваются прямо пропорционально от намагниченности трубы.

[00108] Один вариант осуществления для измерения напряженности локального остаточного поля в трубе показан графически на фиг. 24. Для труб, имеющих пути утечки (часто из-за неоднородностей, обусловленных процессами изготовления), магнитное поле по оси z (радиальное относительно центральной оси трубы) имеет по 20 длине трубы наклон вниз. Данный наклон пропорционален напряженности магнитного поля. Наклонные кривые на фиг. 24 соответствуют случаям намагниченности, показанным на фиг. 23, с наименьшим наклоном, соответствующим случаю 230 А/м и 25 наибольшим наклоном, соответствующим случаю 690 А/м. В данных условиях z-составляющая магнитного поля обеспечивает независимое измерение остаточной напряженности магнитного поля в трубе.

[00109] Кривые на фиг. 23 были нормализованы в соответствии со степенью остаточной намагниченности, давая кривые на фиг. 25, которые пронумерованы в 30 соответствии с кривыми на фиг. 23. Как можно видеть из сравнения фиг. 23 и 25, амплитуду сигнала можно сделать в значительной мере независимой от степени намагниченности трубы путем нормализации в соответствии со степенью остаточной намагниченности трубы. Таким образом, измеренные магнитные амплитуды могут 35 быть преобразованы в объем и площадь, с последующим расчетом глубины.

[00110] Предусмотрены другие способы определения уровня остаточного магнетизма трубы. Например, трубу можно намагнитить до известного уровня, если труба установлена, либо трубу можно намагнитить до произвольного уровня и можно измерить уровень намагниченности. В любом случае, данный уровень намагниченности 40 может быть сохранен в памяти, доступной для базовой станции, и использован в дальнейшем, когда дефекты обнаружены и требуется информация об объеме и глубине. При необходимости или в качестве альтернативы, даже если информация о предыдущем уровне намагниченности трубы не сохранена, то, когда дефекты обнаружены, магнитометрические датчики можно использовать для измерения остаточной 45 намагниченности трубы в одной или более областях вдали от всех обнаруженных дефектов, используя способ наклона, описанный выше, или другие независимые подходы к измерению.

[00111] При использовании в данном документе, "зазор" означает расстояние между

дефектом и магнитометром, как схематически показано на фиг. 26. Теория и испытания показывают, что вблизи магнитного диполя мощность сигнала падает согласно закону обратных квадратов. Если датчик имеет зазор, сходный по расстоянию с характерной длиной диполя, диполь выглядит как два независимых полюса и мощность сигнала падает обратно пропорционально расстоянию. По мере увеличения зазора оказывается, что протяженность диполя уменьшается, и он становится точечным источником. В таких условиях теория и испытания показывают, что мощность сигнала снижается согласно закону обратных кубов. Таким образом, небольшие дефекты имеют большие потери сигнала, когда зазор перемещается за пределы размера дефекта, в то время как большой дефект по-прежнему "с выгодой использует" ослабление сигнала по обратному квадрату для больших зазоров. Например, для дефекта квадратной формы со стороной 1 дюйм (25,4 мм) потеря сигнала при увеличении зазора от 0,25 дюйма (6,4 мм) до 2,25 дюйма (51,2 мм) превышает более чем почти на порядок величину амплитуды. Параметры напряженности остаточной намагниченности трубы снижаются медленнее благодаря их большей пространственной протяженности. Тем не менее, устройство и способы, описанные в данном документе, надежно обнаруживают дефекты, которые могут появиться в обычной трубе, например, дефекты в нефте- и газопроводах, на нефтеперерабатывающих заводах и т.п.

[00112] Дефекты в пределах толщины стенки трубы или на внутренней стенке всегда находятся дальше от магнитометров, чем дефекты на внешней стенке трубы. Однако моделирование и испытания показывают лишь незначительную потерю сигнала от внутреннего дефекта по сравнению с внешним дефектом, как показано на графиках на рис. 27. Большая часть снижения амплитуды сигнала происходит из-за предполагаемого большего зазора для внутреннего дефекта, чем для внешнего дефекта. График 2700 представлен для внешнего дефекта, и график 2702 представлен для внутреннего дефекта.

[00113] Как было показано в предыдущем обсуждении, многие из параметров в обнаруженных сигналах имеют множественные, зависимые источники. Эти зависимости следует понимать и управлять ими при выполнении обнаружения и определения характеристик дефекта. Это связано с расстоянием между датчиками. Как следует из фиг. 14 и 15, представляет интерес близкое расположение магнитометрических датчиков (магнитометров). Расстояние между магнитометрами связано с тем, насколько маленький дефект (при измерении вдоль поверхности) может быть обнаружен и охарактеризован. Поскольку способ обнаружения основан на нахождении корреляции между синусоидой и косинусоидой, необходимо, чтобы вдоль синусоиды было достаточное количество магнитометров для определения того, что это действительно синусоида. На практике, датчики, расположенные на расстоянии от 0,3 дюйма до 0,4 дюйма (от 7,6 до 10,2 мм) друг от друга, можно использовать для обнаружения дефектов размером около 1 дюйма (25,4 мм) при близком (1 дюйм (25,4 мм) или менее) зазоре. По мере увеличения зазора или уменьшения размеров поверхности способность надежного обнаружения дефекта уменьшается с увеличением вероятности пропуска обнаружений или ложных срабатываний.

Обнаружение дефектов во времени

[00114] Как уже отмечалось, в некоторых вариантах осуществления настоящего изобретения вместо поиска магнитометрических данных для регистрируемых характеристик дефектов, с целью обнаружения дефектов производят сравнение двух наборов данных, полученных в разное время. Например, один набор данных может быть получен, когда изделие является вновь изготовленным или в какой-то другой момент времени. Второй набор данных получают позже. Эти два набора данных

пространственно коррелируют, а затем напряженности магнитного поля во втором наборе данных вычитают из пространственно соответствующих напряженностей магнитного поля в первом наборе данных. Данные вычитания производят по каждой оси. На фиг. 28 представлен график поверхности, полученной в результате такого

5 вычитания, показывающий ось x магнитного поля. Регистрируемая характеристика дефекта отчетливо видна, поскольку выделена пунктирной линией 2800. Форма линии 2800 подобна форме кривой B_y на рис. 4 и, следовательно, является характеристикой дефекта. На практике дефект обнаруживают после данного вычитания во времени при помощи основного метода пространственного анализа - подгонки волн синуса и

10 косинуса для подтверждения того, что оставшийся сигнал является регистрируемой характеристикой дефекта. Как было описано выше в отношении пространственного обнаружения дефектов, пространственную информацию о дефектах, обнаруженных по каждой из трех осей, можно объединить для получения более точной информации об обнаружении дефектов. Вышеописанные подходы для определения характеристик

15 дефекта (объема, площади и глубины) могут применяться после выполнения данного временного способа.

Физическое сканирование изделия на дефекты

[00115] Как уже отмечалось, магнитометрические данные об изделии можно получить при помощи фиксированного набора магнитометрических датчиков, размещенных

20 вокруг изделия. По желанию или в качестве альтернативы, изделие может быть физически отсканировано при помощи меньшего набора магнитометрических датчиков, чем было бы необходимо для получения магнитометрических данных без сканирования. Изделие может быть отсканировано вдоль его продольной оси или вдоль любого другого подходящего направления. На фиг. 29 представлен вид в перспективе

25 физического сканера 2900. Изделие 2902, например, труба, может быть отсканировано при помощи сканера 2900. Один магнитометрический датчик, небольшая группа магнитометрических датчиков или одномерная решетка магнитометрических датчиков 2904 поддерживается манипулятором сканера 2906, имеющим одну, две или три степени свободы. Первый линейный двигатель 2908 располагает решетку магнитометрических

30 датчиков 2904 вертикально на подходящем расстоянии от изделия 2902. Второй линейный двигатель 2910 располагает решетку магнитометрических датчиков 2904 вдоль оси, перпендикулярной к оси сканирования. Третий линейный двигатель 2912 переносит решетку магнитометрических датчиков 2904 вдоль оси сканирования. После того, как сканирование завершено, изделие может быть повернуто вокруг оси

35 сканирования, и может быть выполнено еще одно сканирование. Данный процесс можно повторять до тех пор, пока все желаемые части изделия не будут отсканированы.

[00116] В другом варианте осуществления, показанном на фиг. 30 на виде в перспективе, кольцо магнитометрических датчиков переносится физическим сканером 3002. В других вариантах осуществления настоящего изобретения сканирование может

40 быть двумерным. Например, при помощи соответствующего физического сканера изделие можно отсканировать по спирали, по растрю или отсканировать в соответствии с другим проходом.

[00117] Сбор данных от магнитометров, построитель карты магнитного поля, сопоставитель с образцом, и функции управления базовой станцией и другие функции,

45 описанные в данном документе, могут выполняться с помощью процессора, выполняющего команды, хранящиеся в памяти, как схематически показано на фиг. 31.

[00118] Несмотря на то, что изобретение описано с помощью описанных выше примерных вариантов осуществления, модификации и вариации показанных вариантов,

могут быть сделаны без отхода от концепций изобретения, раскрытых в настоящем описании. Кроме того, раскрытые аспекты или их части, могут быть объединены способами, не перечисленными выше и/или явно не указанными. Соответственно, изобретение не следует рассматривать как ограниченное описанными вариантами

5 осуществления.

[00119] Хотя аспекты вариантов осуществления могут быть описаны со ссылкой на блок-схемы и/или технологические карты, функции, операции, решения и т.д., все или части каждого блока или комбинации блоков, могут быть объединены, разделены на отдельные операции или выполнены в другом порядке. Все или часть каждого блока

10 или комбинации блоков могут быть реализованы в виде команд компьютерной программы (например, программного обеспечения), аппаратных средств (таких как комбинаторная логика, специализированные интегральные схемы (ASIC), программируемые пользователем вентильные решетки (FPGA) или другое оборудование), программно-аппаратных средств или их комбинации. Варианты

15 осуществления могут быть реализованы с помощью процессора, выполняющего или управляемого командами, сохраненными в памяти. Память может быть оперативным запоминающим устройством (ОЗУ), постоянным запоминающим устройством (ПЗУ), флэш-памятью или любой другой памятью или их сочетанием, подходящим для хранения управляющего программного обеспечения или других команд и данных. Команды,

20 определяющие функции настоящего изобретения, можно передавать процессору во множестве форм, в том числе, но не ограничиваясь этим, в форме информации, постоянно хранящейся на материальных не записывающих носителях (например, постоянно запоминающих устройствах внутри компьютера, например, ПЗУ или устройствах, считываемых компьютерным устройством ввода/вывода, таким как CD-

25 ROM или DVD-диском), информации, хранимой с возможностью изменения на материальном записываемом носителе (например, дискетах, съемной флэш-памяти и жестких дисках) или информации, передаваемой на компьютер через среду передачи данных, включая в себя проводные или беспроводные компьютерные сети. Кроме того, хотя варианты осуществления могут быть описаны в связи с различными

30 иллюстративными структурами данных, системы могут быть реализованы с использованием различных структур данных.

(57) Формула изобретения

1. Способ обнаружения дефектов в ферромагнитном материале, включающий:

35 размещение множества магнитометров вблизи поверхности ферромагнитного материала, причем каждый магнитометр из указанного множества магнитометров неподвижно закреплен в положении относительно ферромагнитного материала;

использование указанного множества магнитометров для измерения магнитного поля, созданного ферромагнитным материалом, в первый момент времени;

40 генерирование точек данных первой двумерной карты исходя из измеренного магнитного поля, причем каждая точка данных соответствует соответствующему местоположению на поверхности ферромагнитного материала и представляет напряженность измеренного магнитного поля вблизи этого местоположения в первый момент времени;

45 использование указанного множества магнитометров для измерения магнитного поля, созданного ферромагнитным материалом, во второй момент времени позже первого момента времени;

генерирование точек данных второй двумерной карты исходя из измеренного

магнитного поля, причем каждая точка данных соответствует соответствующему местоположению на поверхности ферромагнитного материала и представляет напряженность измеренного магнитного поля вблизи этого местоположения во второй момент времени;

5 вычитание точек данных второй двумерной карты из пространственно соответствующих точек данных первой двумерной карты с получением таким образом разностной двумерной карты;

распознавание на разностной двумерной карте множества точек данных, соответствующих заданному пространственному образцу напряженности магнитного
10 поля; и

выдачу местоположения вблизи поверхности ферромагнитного материала, соответствующего указанному множеству точек данных.

2. Способ по п. 1, в котором вычитание выполняют по каждой оси.

3. Способ по п. 1, дополнительно включающий оценку объема материала, отсутствующего на ферромагнитном материале в местоположении вблизи поверхности
15 ферромагнитного материала, на основе амплитуды параметра, представленного данными в указанном множестве точек данных.

4. Способ по п. 3, дополнительно включающий оценку глубины отсутствующего материала на основе оцененного объема отсутствующего материала и длины параметра,
20 представленного данными в указанном множестве точек данных, в двух пространственных направлениях.

5. Способ по п. 1, дополнительно включающий:

определение амплитуды магнитного поля, созданного ферромагнитным материалом в местоположении на удалении от местоположения вблизи поверхности
25 ферромагнитного материала, на основе по меньшей мере одной из точек данных карты; и

оценку объема материала, отсутствующего на ферромагнитном материале в местоположении вблизи поверхности ферромагнитного материала, в соответствии с амплитудой данных в указанном множестве точек данных и амплитудой магнитного
30 поля, созданного ферромагнитным материалом в местоположении на удалении от местоположения вблизи поверхности ферромагнитного материала.

6. Способ по п. 5, дополнительно включающий оценку площади отсутствующего материала на основе длины параметра, представленного данными в указанном множестве точек данных, в двух пространственных направлениях.

7. Способ по п. 5, дополнительно включающий оценку глубины отсутствующего материала на основе оцененного объема отсутствующего материала и длины параметра, представленного данными в указанном множестве точек данных, в двух
35 пространственных направлениях.

8. Способ по п. 1, в котором распознавание множества точек данных, соответствующих заданному пространственному образцу, включает подгонку по
40 меньшей мере синусоиды или косинусоиды к указанному множеству точек данных.

9. Способ по п.1, дополнительно включающий:

вычисление множества значений пространственных производных на основании точек данных разностной двумерной карты, причем:

распознавание множества точек данных, соответствующих заданному пространственному образцу, включает распознавание множества точек данных, соответствующих заданному пространственному образцу напряженности магнитного
45 поля на основании указанного множества значений пространственных производных.

10. Способ по п. 1, в котором распознавание множества точек данных, соответствующих заданному пространственному образцу, включает распознавание множества точек данных, соответствующих потере части ферромагнитного материала в результате коррозии или эрозии.

5 11. Способ по п. 1, в котором распознавание множества точек данных, соответствующих заданному пространственному образцу, включает распознавание множества точек данных, соответствующих трещине в ферромагнитном материале.

12. Способ по п. 1, в котором размещение множества магнитометров включает расположение множества магнитометров в виде двумерной решетки магнитометров, обернутой вокруг ферромагнитного материала.

10 13. Способ по п. 1, в котором размещение множества магнитометров включает расположение множества магнитометров в виде множества колец магнитометров, включая расположение множества колец магнитометров на расстоянии друг от друга в продольном направлении вдоль ферромагнитного материала таким образом, что
15 каждое кольцо из указанного множества колец магнитометров окружает ферромагнитный материал.

14. Способ по п. 1, в котором:

каждый магнитометр из указанного множества магнитометров содержит три ортогонально ориентированных магнитометра;

20 генерирование точек данных включает генерирование точек измерения таким образом, что каждая точка данных соответствующей первой и второй двумерной карты представляет напряженность измеренного магнитного поля в каждом из трех ортогональных направлений, и

распознавание множества точек данных, соответствующих заданному
25 пространственному образцу, включает, для каждого из трех ортогональных направлений, распознавание множества точек данных, соответствующих заданному пространственному образцу напряженности магнитного поля, и местоположения вблизи поверхности ферромагнитного материала, соответствующего указанному множеству точек данных, с распознаванием таким образом трех местоположений вблизи
30 поверхности ферромагнитного материала; причем способ дополнительно включает:

вычисление уточненного местоположения вблизи поверхности ферромагнитного материала исходя из трех распознанных местоположений, причем

выдача местоположения включает выдачу уточненного местоположения.

35 15. Способ по п. 1, в котором размещение множества магнитометров включает размещение множества магнитометров на поверхности, проходящей менее чем вдоль полной окружности вокруг внешней поверхности ферромагнитного материала.

16. Способ по п. 1, в котором размещение множества магнитометров включает расположение множества магнитометров в виде двумерной решетки магнитометров.

40 17. Способ обнаружения дефектов в ферромагнитном материале, включающий: измерение магнитного поля, созданного ферромагнитным материалом, в первый момент времени;

генерирование точек данных первой двумерной карты исходя из измеренного магнитного поля, причем каждая точка данных соответствует соответствующему местоположению на поверхности ферромагнитного материала и представляет
45 напряженность измеренного магнитного поля вблизи этого местоположения в первый момент времени;

измерение магнитного поля, созданного ферромагнитным материалом, во второй момент времени позже первого момента времени;

генерирование точек данных второй двумерной карты исходя из измеренного магнитного поля, причем каждая точка данных соответствует соответствующему местоположению на поверхности ферромагнитного материала и представляет напряженность измеренного магнитного поля вблизи этого местоположения во второй момент времени;

вычитание точек данных второй двумерной карты из пространственно соответствующих точек данных первой двумерной карты с получением таким образом разностной двумерной карты;

распознавание на разностной двумерной карте множества точек данных, соответствующих заданному пространственному образцу напряженности магнитного поля; и

выдачу местоположения вблизи поверхности ферромагнитного материала, соответствующего указанному множеству точек данных, причем:

измерение магнитного поля включает измерение магнитного поля посредством множества магнитометров, каждый из которых содержит три ортогонально ориентированных магнитометра;

генерирование точек данных включает генерирование точек измерения таким образом, что каждая точка данных соответствующей первой и второй двумерной карты представляет напряженность измеренного магнитного поля в каждом из трех

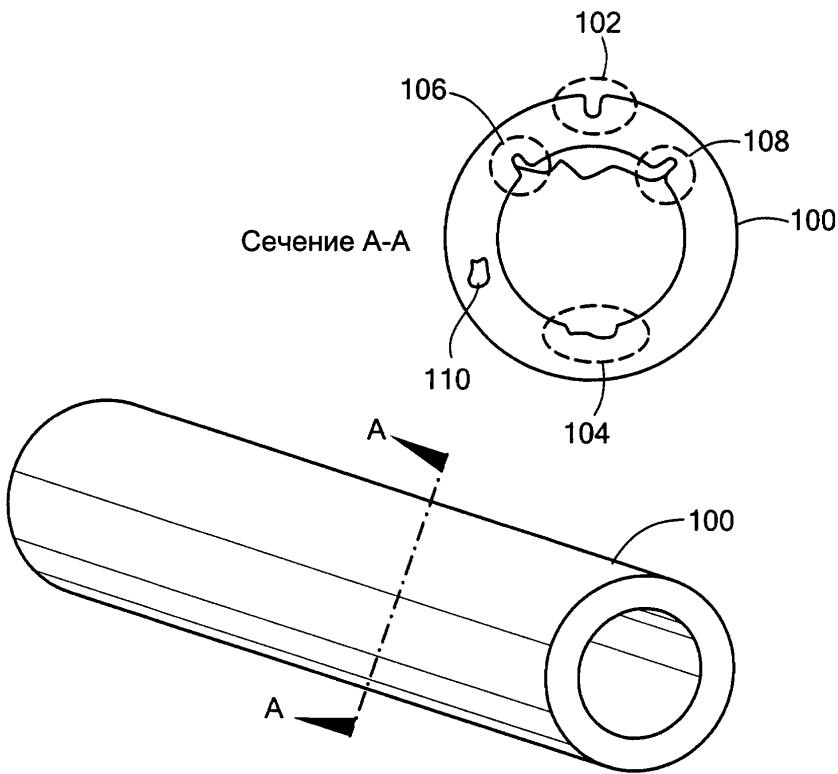
ортогональных направлений, а

распознавание множества точек данных, соответствующих заданному пространственному образцу, включает, для каждого из трех ортогональных направлений, распознавание множества точек данных, соответствующих заданному пространственному образцу напряженности магнитного поля, и местоположения вблизи поверхности ферромагнитного материала, соответствующего указанному множеству точек данных, с распознаванием таким образом трех местоположений вблизи поверхности ферромагнитного материала, причем способ дополнительно включает:

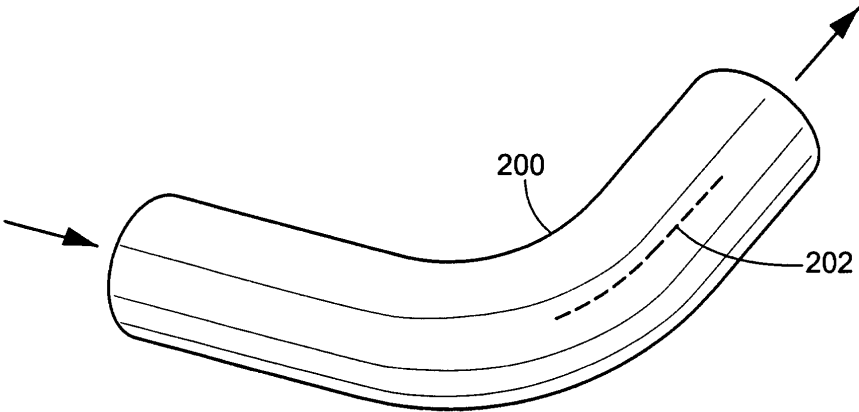
вычисление уточненного местоположения вблизи поверхности ферромагнитного материала исходя из трех распознанных местоположений, а выдача местоположения включает выдачу уточненного местоположения.

1

1/21



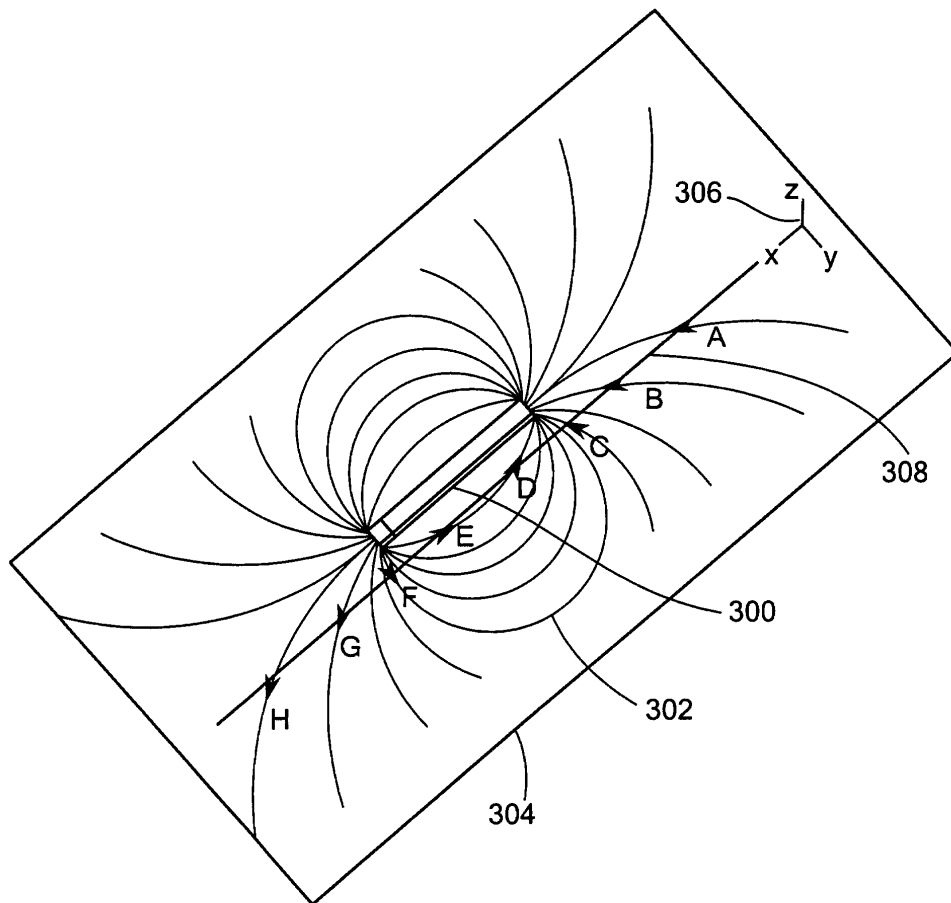
ФИГ. 1



ФИГ. 2

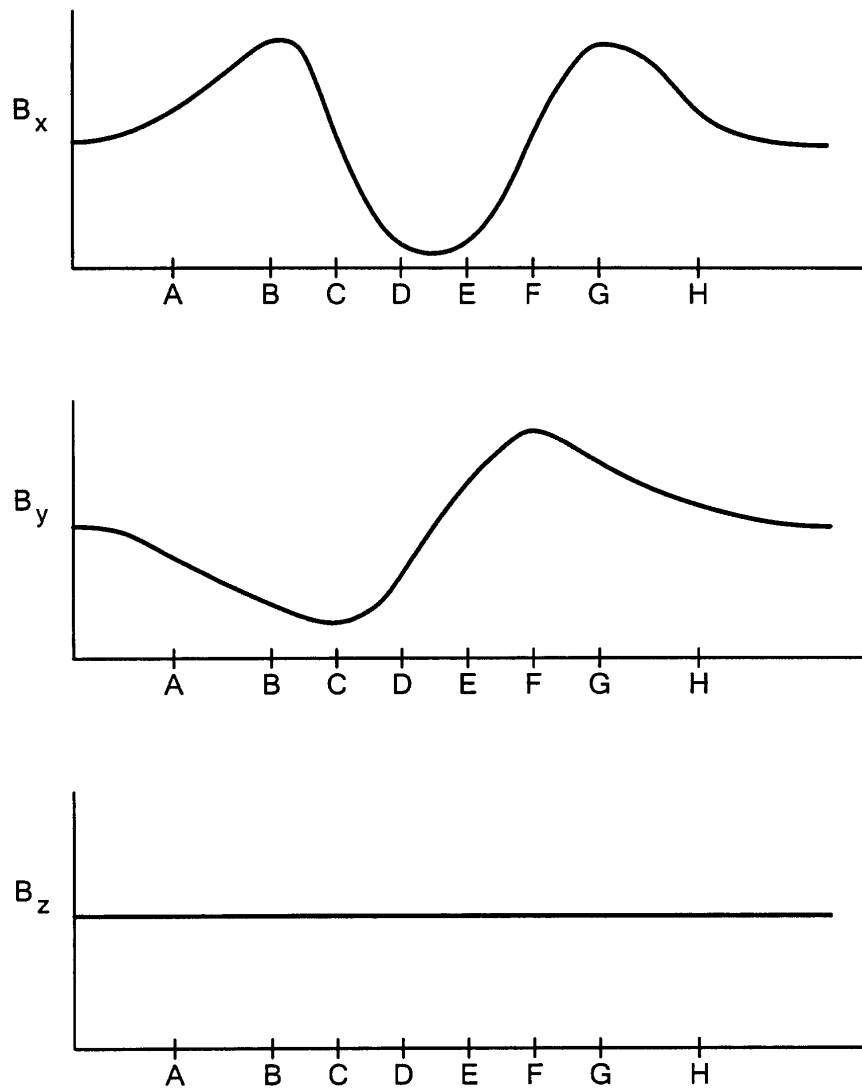
2

2/21



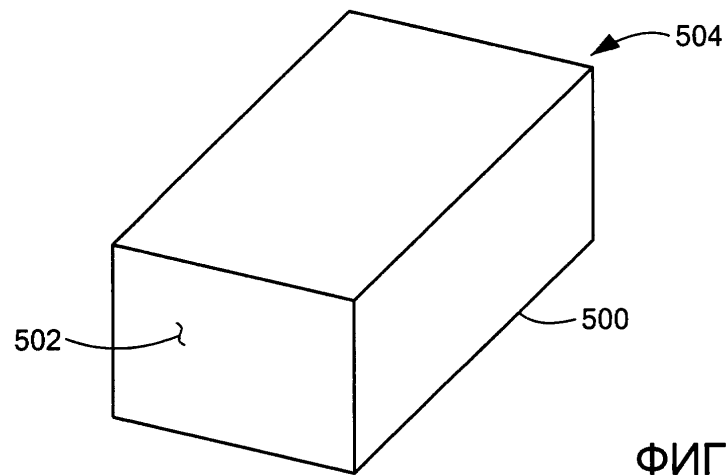
ФИГ. 3

3/21

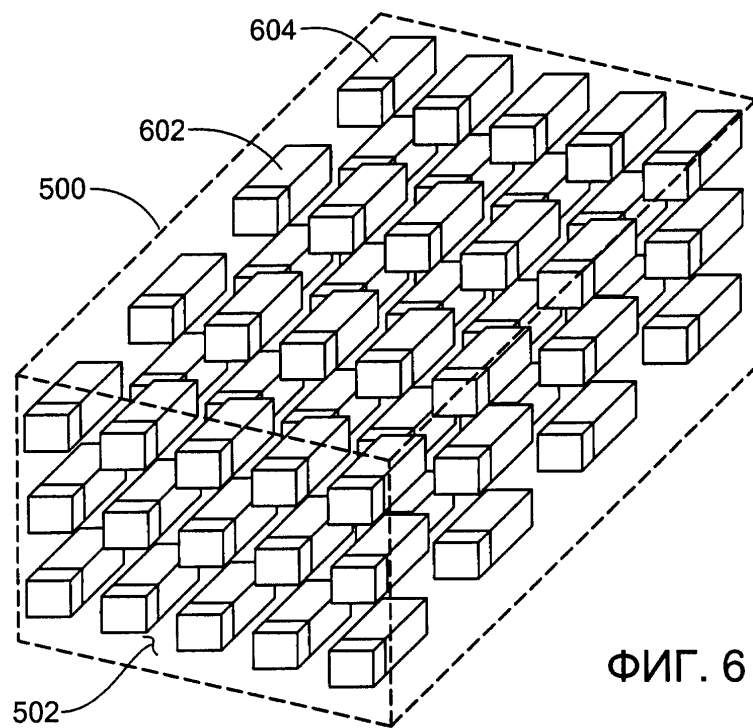


ФИГ. 4

4/21

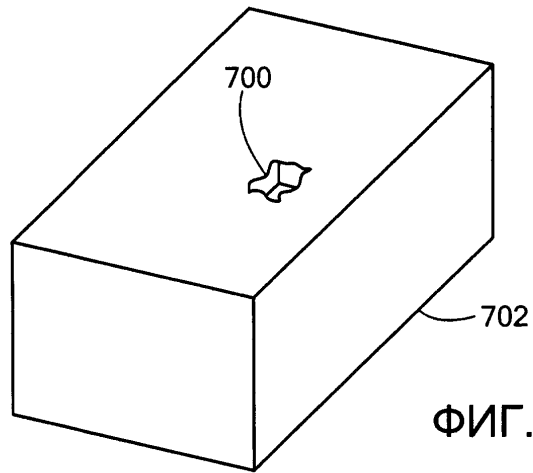


ФИГ. 5

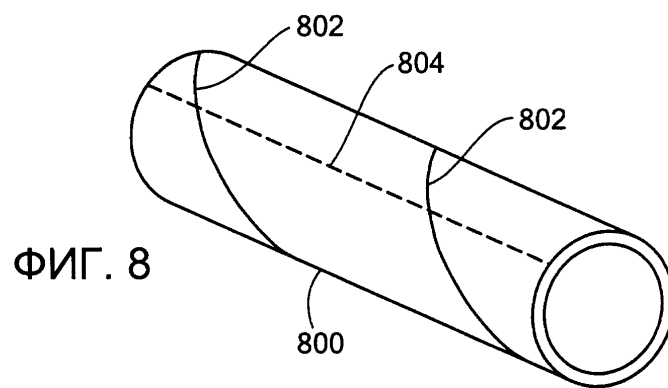


ФИГ. 6

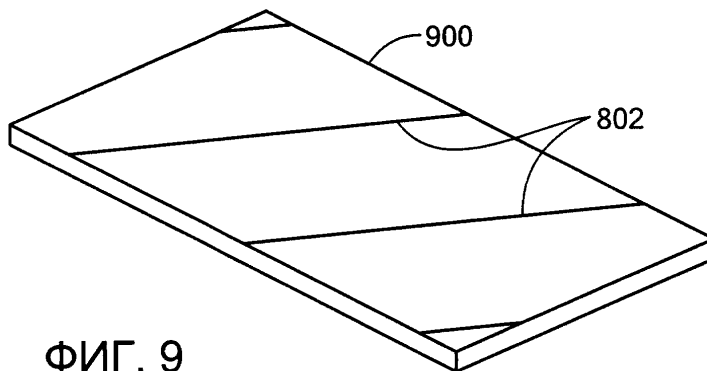
5/21



ФИГ. 7

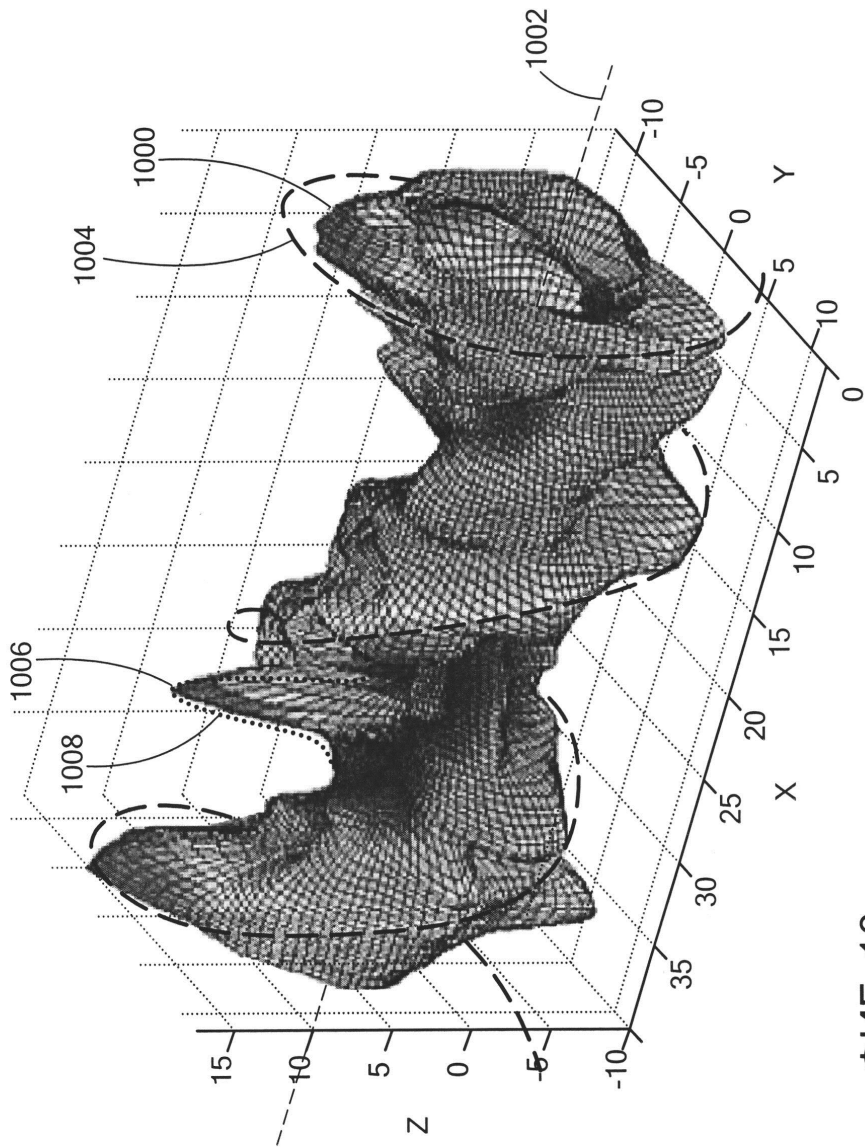


ФИГ. 8



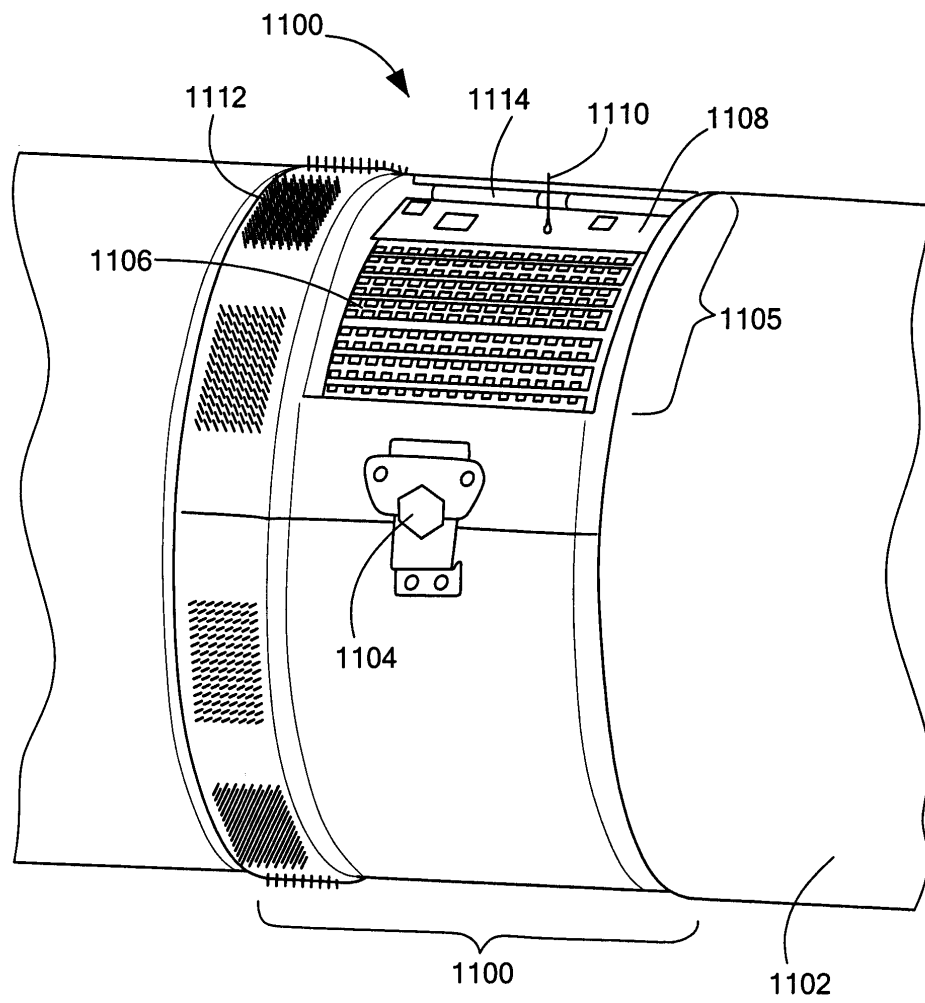
ФИГ. 9

6/21

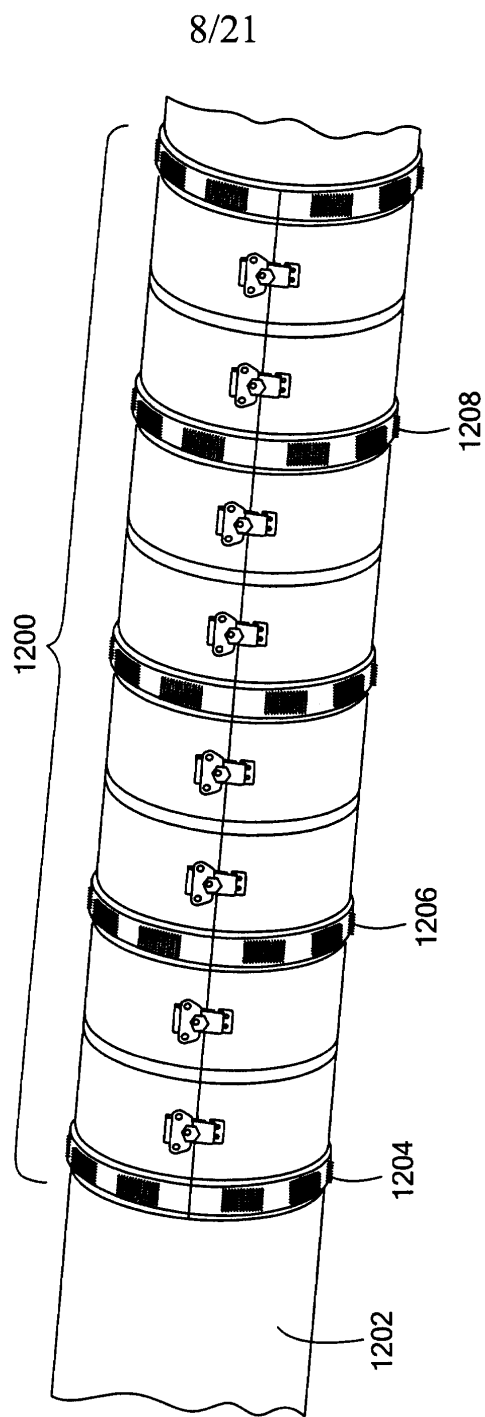


ФИГ. 10

7/21

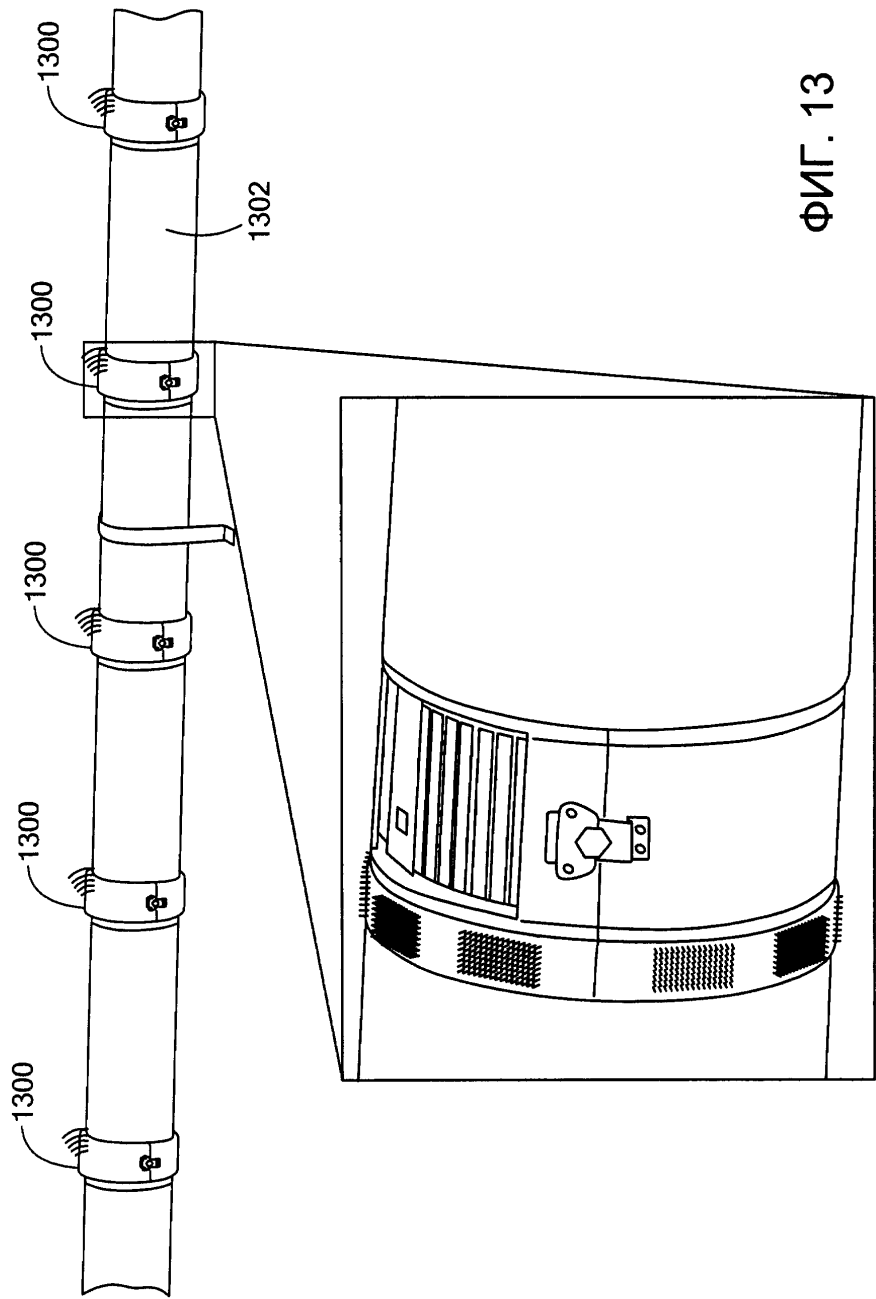


ФИГ. 11



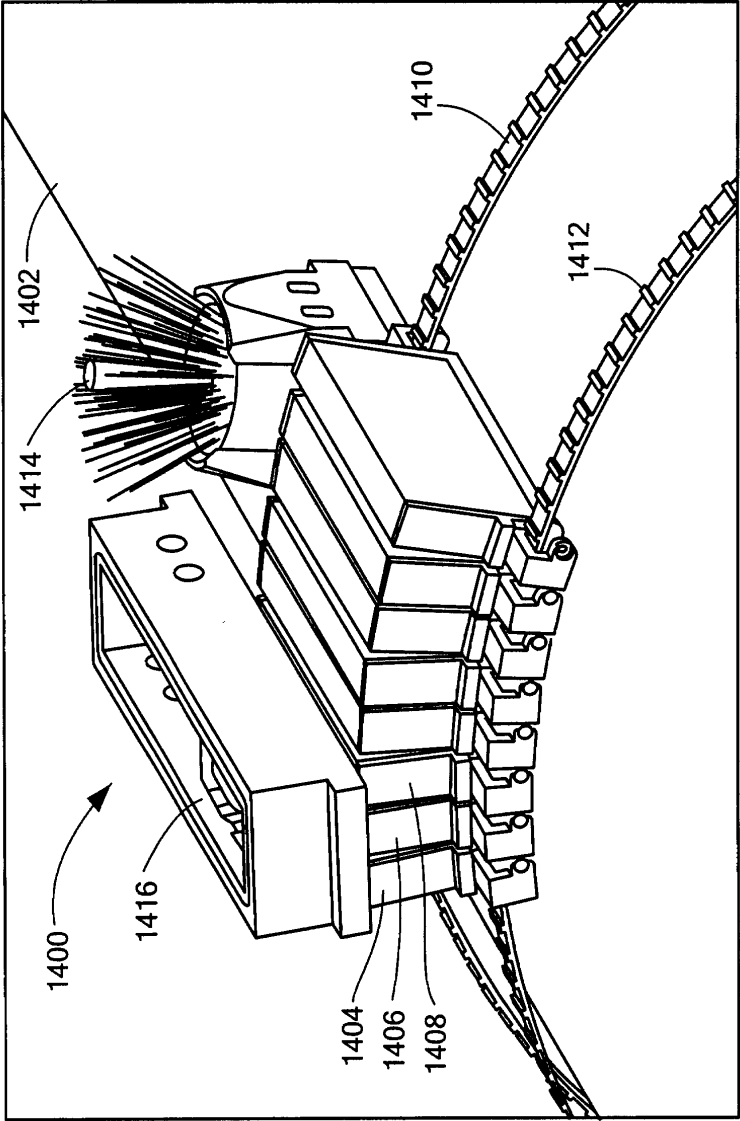
ФИГ. 12

9/21



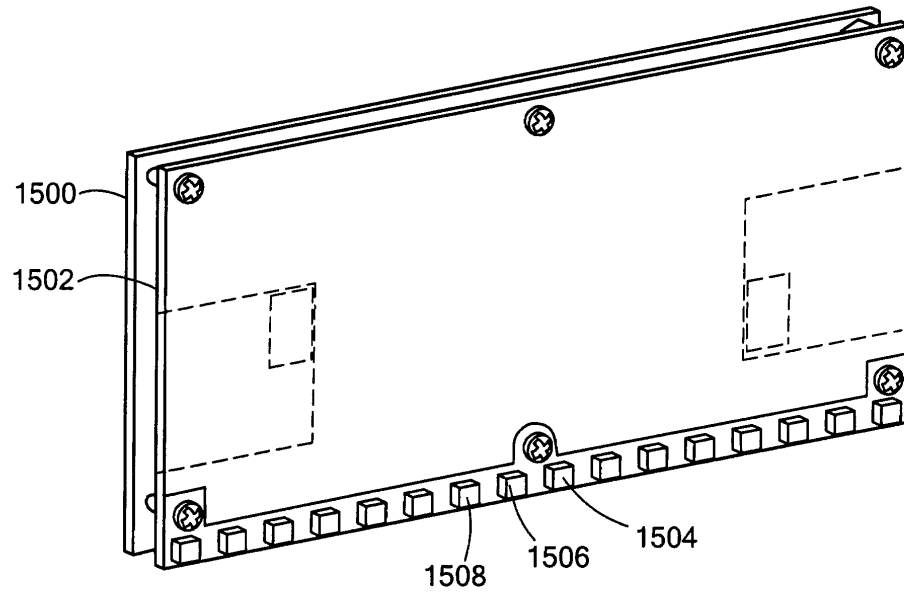
ФИГ. 13

10/21

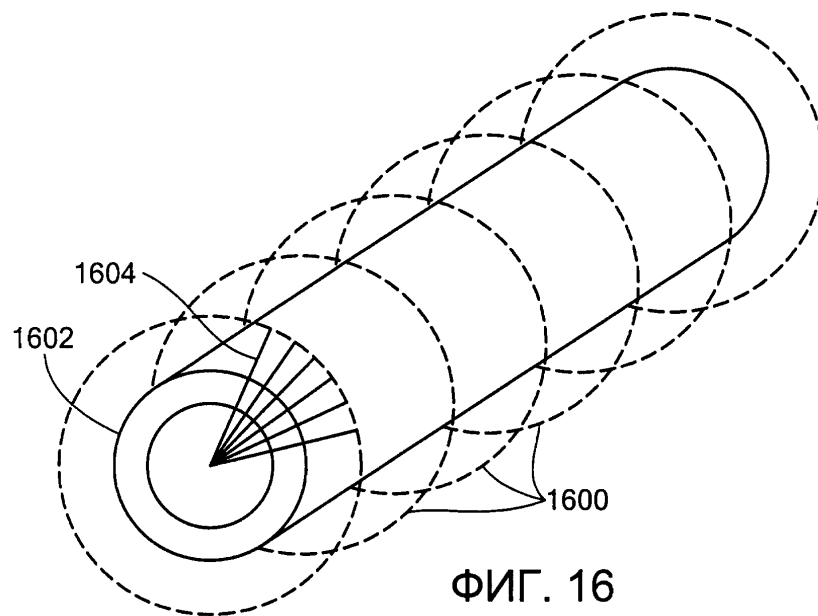


ФИГ. 14

11/21

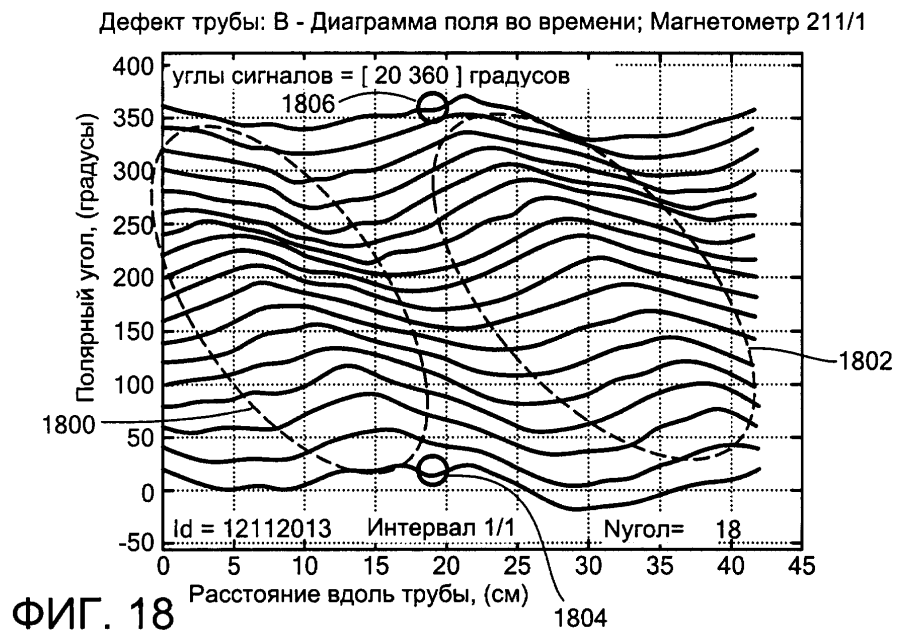


ФИГ. 15

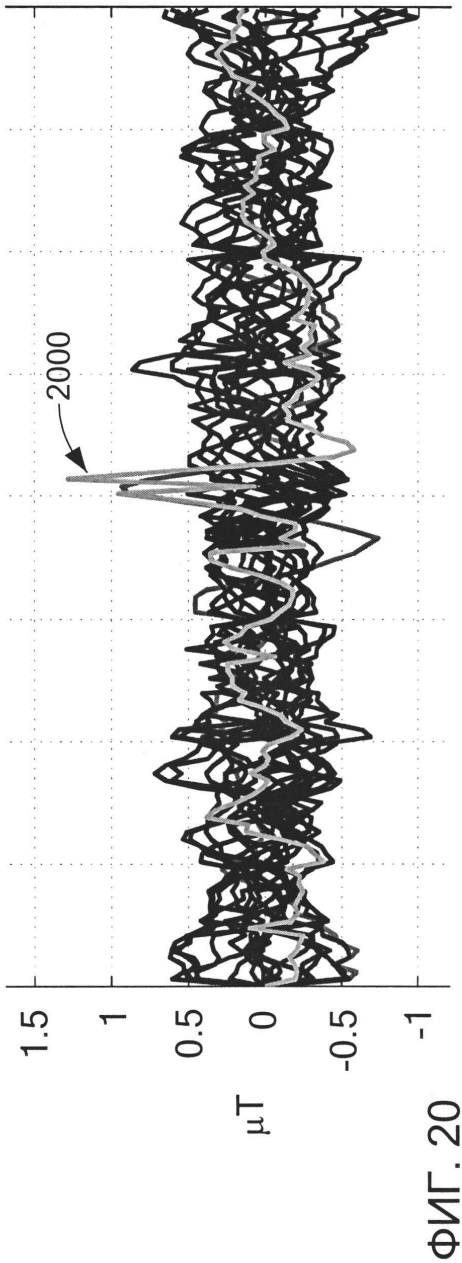
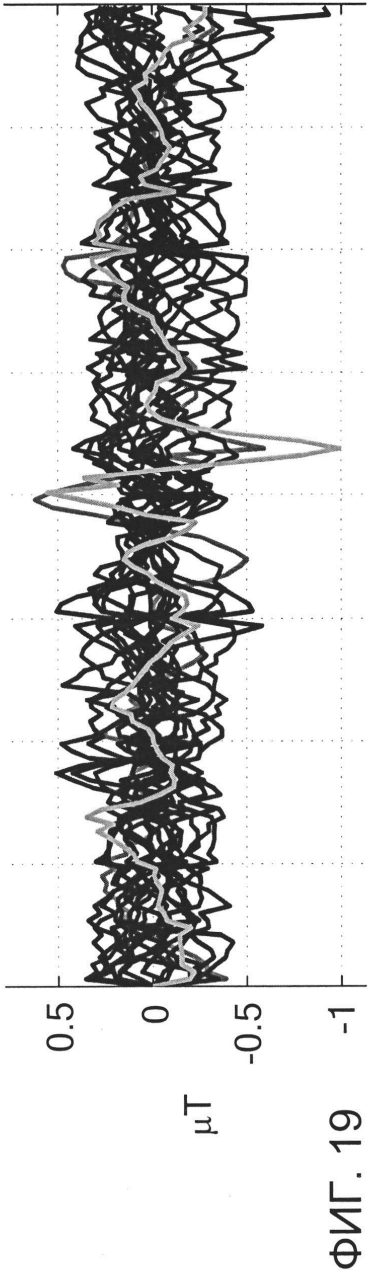


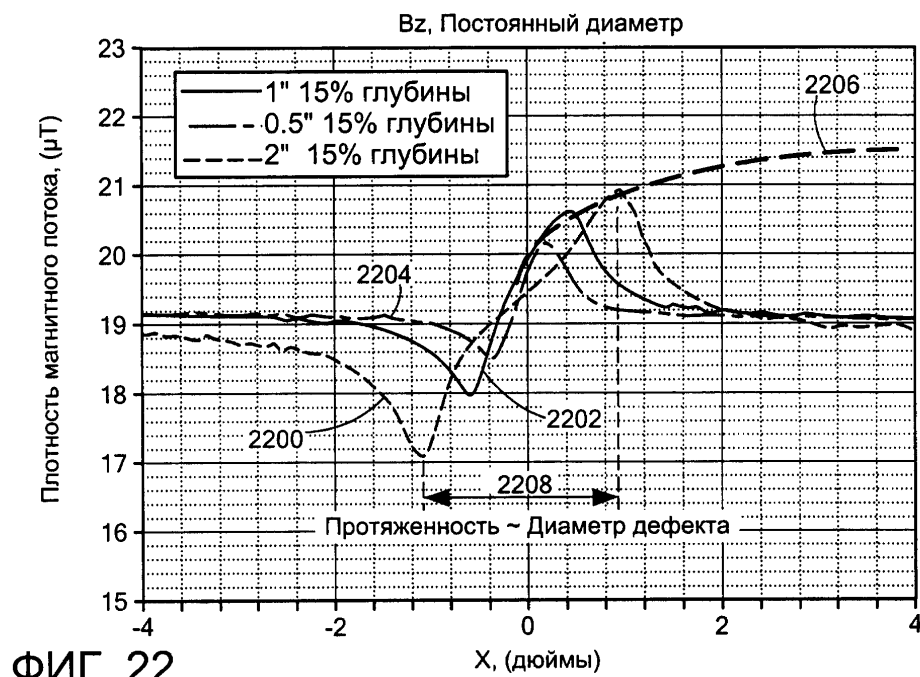
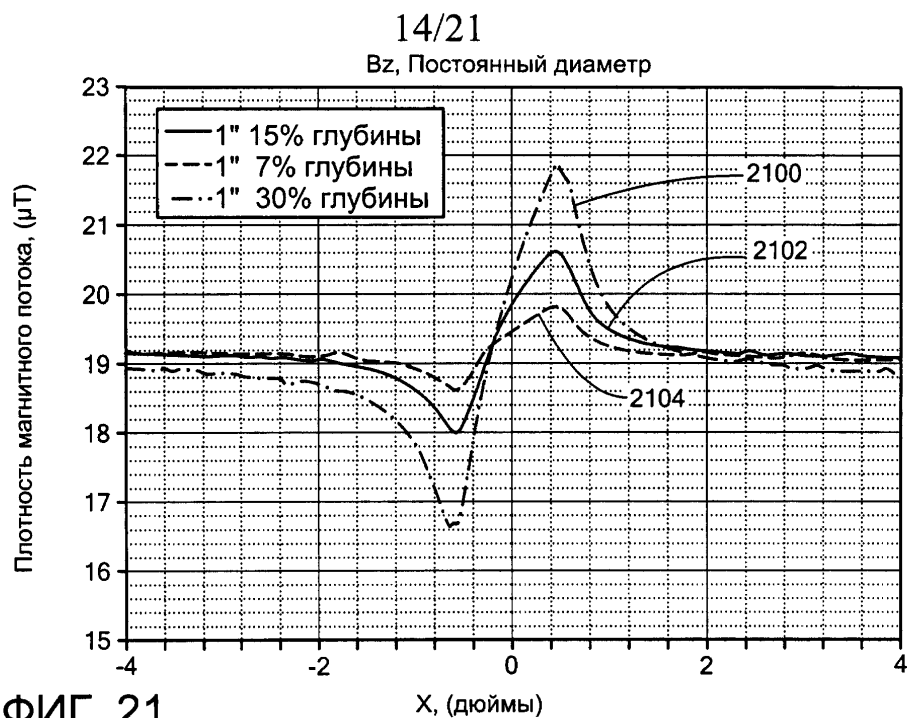
ФИГ. 16

12/21

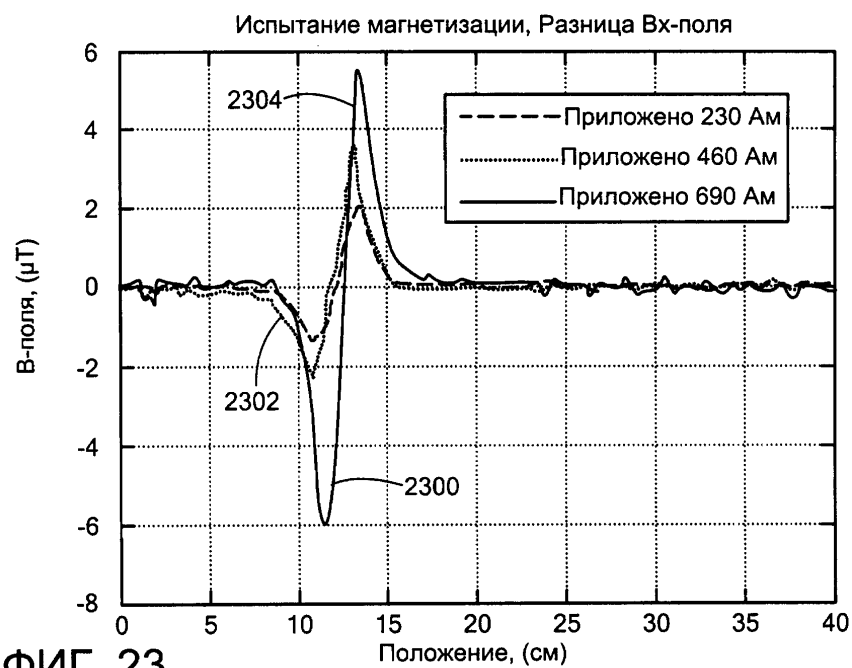


13/21

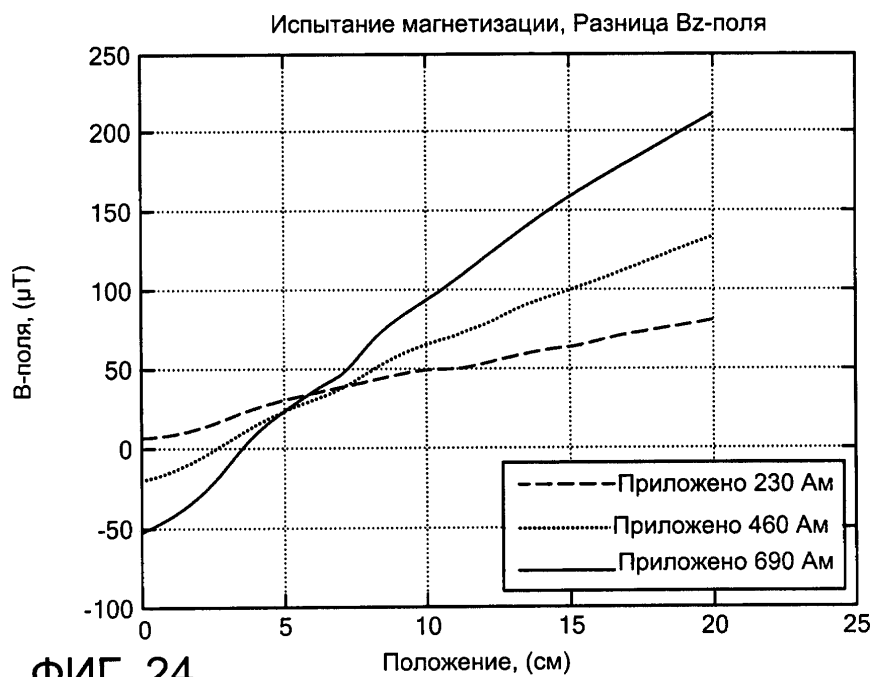




15/21

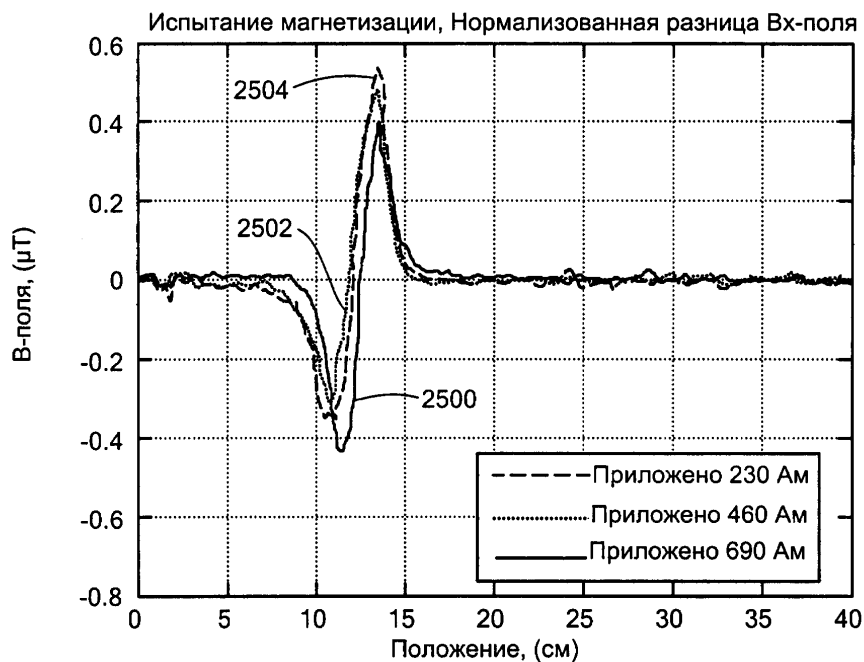


ФИГ. 23

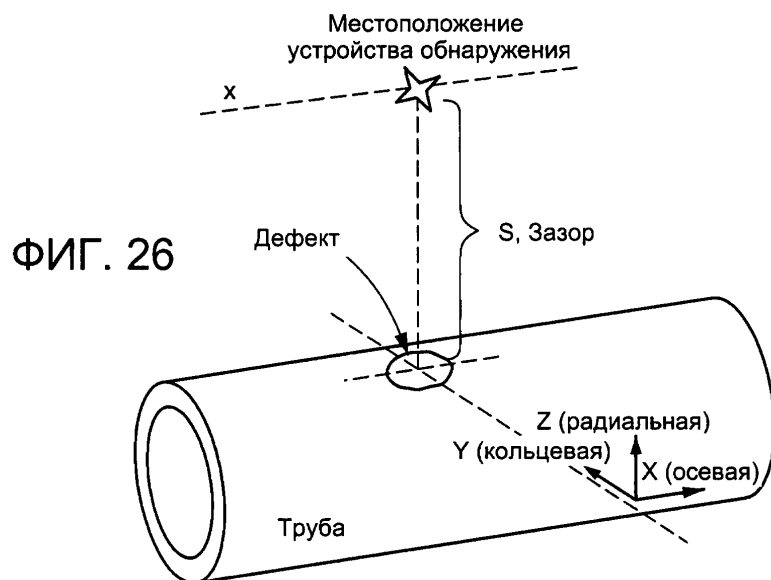


ФИГ. 24

16/21

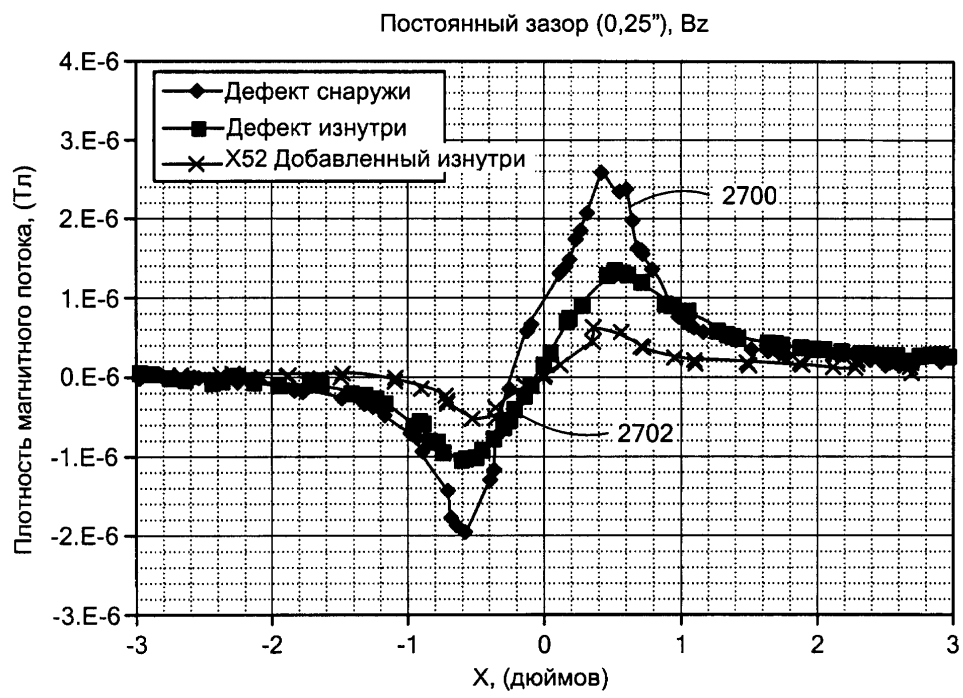


ФИГ. 25



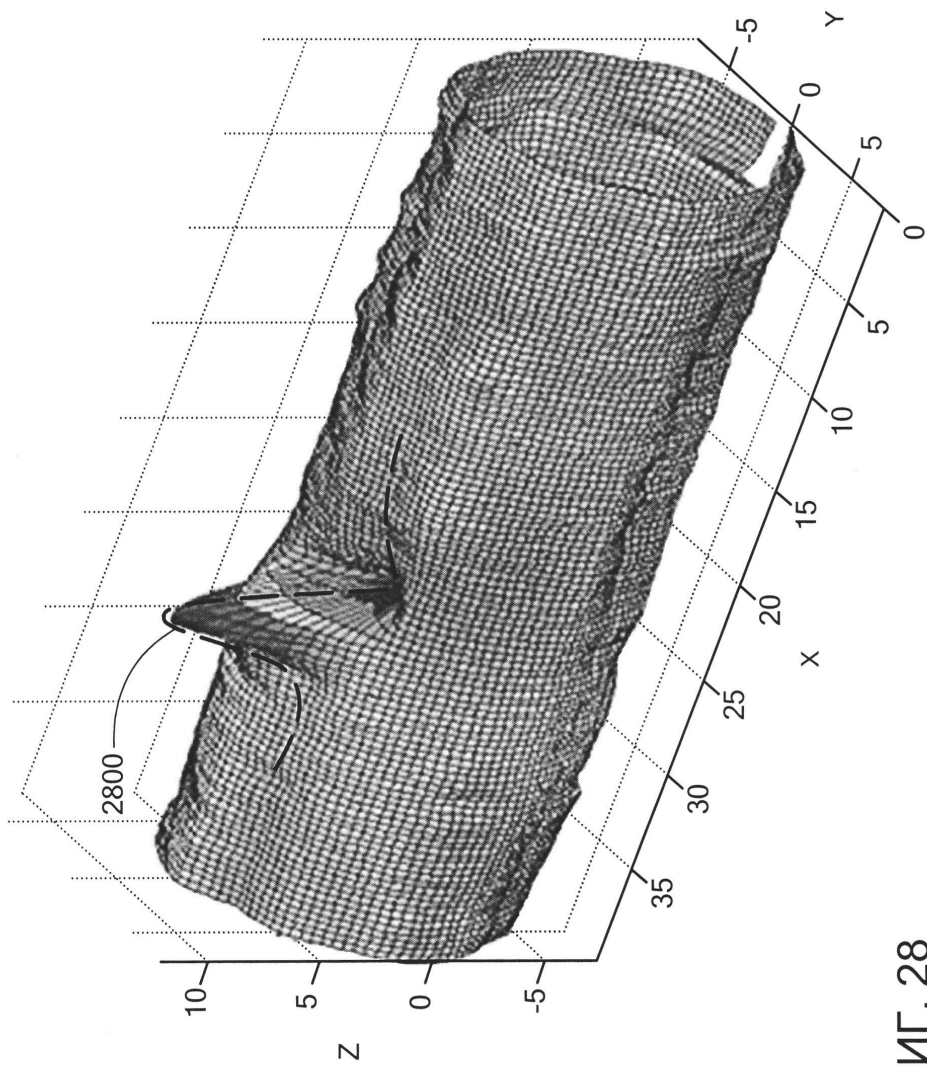
ФИГ. 26

17/21



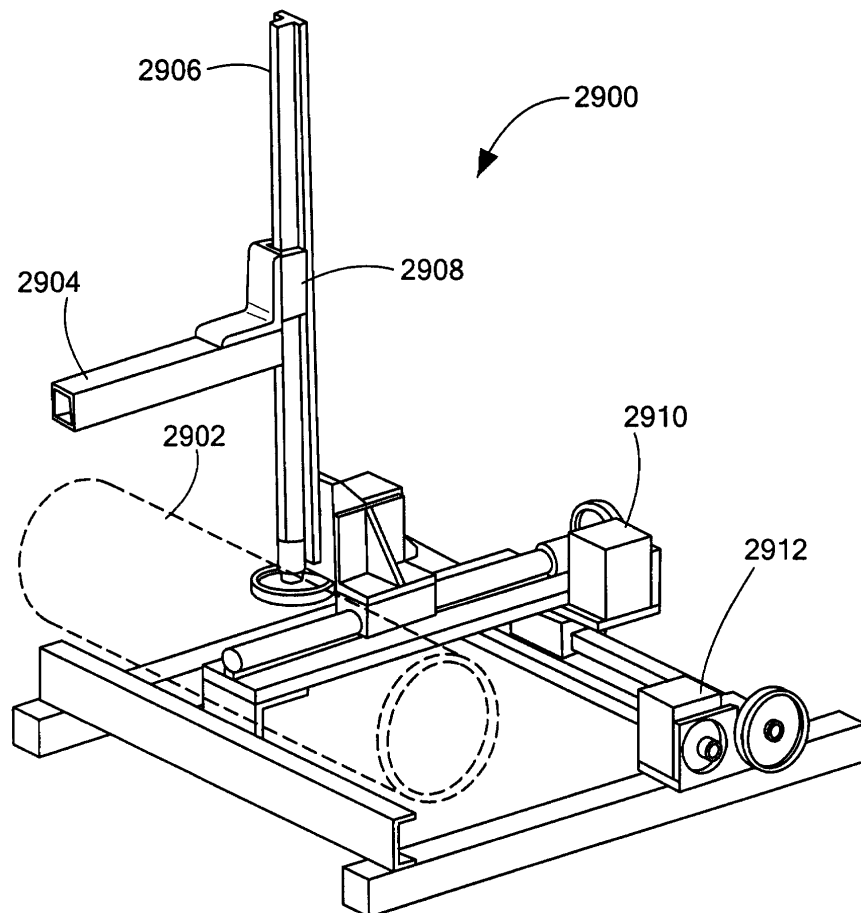
ФИГ. 27

18/21



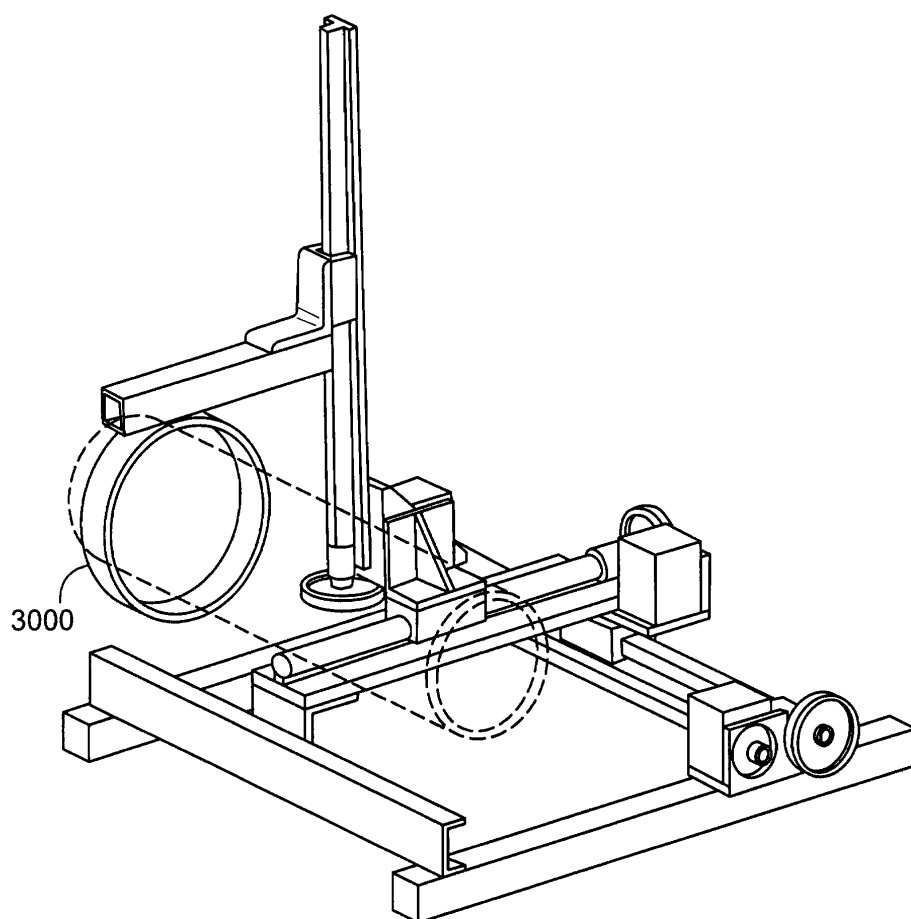
ФИГ. 28

19/21



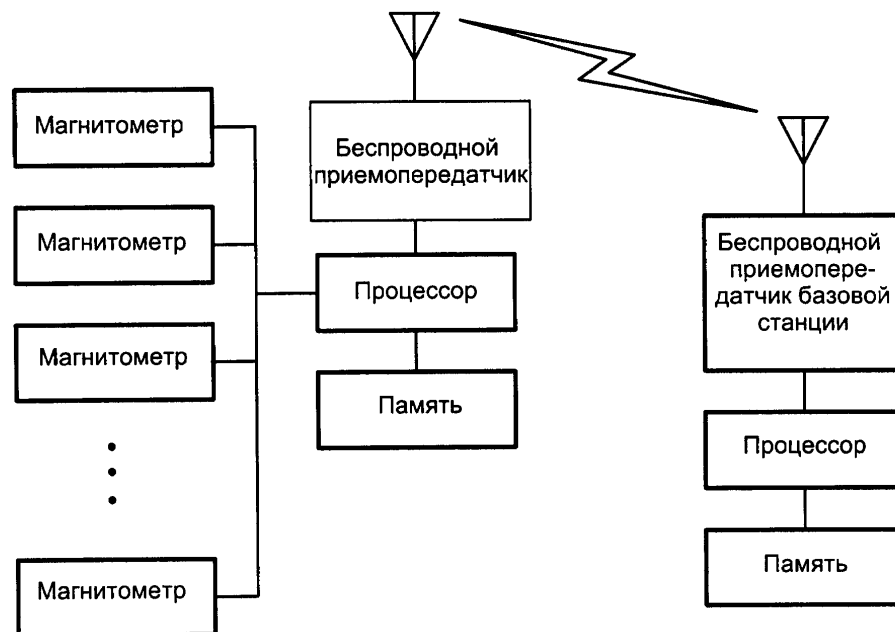
ФИГ. 29

20/21



ФИГ. 30

21/21



ФИГ. 31