

СКВАЖИННЫЙ ПРИБОР ИНКЛИНОМЕТРА

К.О. БАРЫШНИКОВ, *асп. кафедры ИУ-2 МГТУ им. Н.Э. Баумана, нач. сектора филиала ФГУП «ЦЭНКИ» – «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова»*,
 М.И. КОПТЕНКОВ, *асп. каф. системы автоматического управления МГУЛ, вед. инженер-конструктор филиала ФГУП «ЦЭНКИ» – «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова»*,
 А.И. БАЛАНДИН, *асп. каф. ИУ-2 МГТУ им. Н.Э. Баумана, вед. инженер филиала ФГУП «ЦЭНКИ» – «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова»*,
 Е.В. ШАХОВЦЕВ, *асп. каф. экономики, управления и оценки МАОК, вед. инженер-технолог филиала ФГУП «ЦЭНКИ» – «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова»*

mkoptenkov@gmail.com

ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»,
 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса»
 141005, Московская обл., г. Мытищи-5, ул. 1-я Институтская, д. 1

НОУ ВПО «Международная академия оценки и консалтинга» (МАОК),
 117418, Москва, ул. Новочеремушкинская, д. 65, к. 1

ФГУП «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры» –
 «Научно-исследовательский институт прикладной механики имени академика В. И. Кузнецова»,
 111123, Москва, ул. Авиамоторная, д. 55

В НИИ прикладной механики имени академика В.И. Кузнецова разрабатывается гибридный гиромагнитометрический инклинометр, вобравший в себя лучшие качества магнитометрического и гироскопического инклинометров. Инклинометр позволяет измерять основные геофизические параметры буровой скважины:

- 1) зенитного угла, необходимого для определения отклонения буровой скважины от вертикали;
- 2) апсидального угла (угла разворота вокруг продольной оси скважинного прибора относительно вертикальной плоскости, проходящей через ось ствола скважины), необходимого для определения профиля скважины в подземном пространстве;
- 3) географического азимута, необходимого для определения профиля скважины в географических координатах;
- 4) магнитного азимута, необходимого для определения профиля скважины по магнитному азимуту (в немагнитных средах);
- 5) напряженности и ориентации магнитного поля относительно географического меридиана, необходимых для определения расположения магнитных масс (магнитных руд, старых обсадных скважин и др.) относительно исследуемой скважины;
- 6) температуры, необходимой для остановки погружения скважинного прибора по причине достижения предельной температуры его работы.

В состав инклинометра входят скважинный прибор с центраторами и наземный пульт электропитания и связи. В состав скважинного прибора входят: трехосный блок акселерометров, трехосный блок магнитометров, блок подвижных волоконно-оптических гироскопов, неподвижный азимутальный гироскоп и система передачи информации на поверхность. Благодаря введению трехосного блока магнитометров появляется возможность не только определять направление оси ствола скважины в пространстве и выделять участки перегибов оси ствола скважины, но и получать исходные данные для геологических построений, например, для определения истинных глубин залегания продуктивных пластов.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, гиромагнитометрический инклинометр, малогабаритный прибор, расширенный диапазон рабочих температур.

При разработке недорогих инклинометрических измерительных комплексов (ИИК) перед разработчиками возникают две основные проблемы:

1. Задачи исследования и определения параметров ориентации скважин, пробуренных в средах с аномальными магнитными свойствами, а также обсаженных стальными трубами, приводят к необходимости использования гироскопических чувствительных

элементов (ГЧЭ). В обычных магнитометрических инклинометрах для осуществления привязки к географическому азимуту необходимо использовать внешний гирокомпас, что негативно сказывается на технико-экономических и эксплуатационных качествах ИИК.

2. Традиционно в качестве ГЧЭ используются динамически настраиваемые гироскопы (ДНГ), не обладающие стойкостью к внешним воздействиям, возникающим при

эксплуатации и транспортировке ИИК, в особенности к ударам. Кроме того, ИИК, построенные на основе ДНГ, не могут использоваться в условиях повышенных температур.

Для решения поставленных задач был разработан малогабаритный гибридный гироманометрический инклинометр с расширенным диапазоном рабочих температур, предназначенный для исследования как обсаженных, так и необсаженных буровых скважин.

Применение волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) [1, 2, 6]] невысокой точности с расширенными эксплуатационными характеристиками в качестве ГЧЭ позволяет определять геофизические параметры скважин с достаточной точностью, не ухудшая при этом габаритно-массовые характеристики прибора.

Наряду с гироскопической системой измерения азимута в экспериментальном образце используется трехосный блок магнитометров, который построен на магниторезистивных микросхемах производства «Honeywell» (США). Использование дополнительного канала измерения азимута незначительно повышает цену скважинного прибора, но дает более достоверные результаты измерений азимута за счет применения двух методов измерения, основанных на разных физических принципах:

- измерение проекций вектора угловой скорости вращения Земли на оси чувствительности трех волоконно-оптических гироскопов,
- измерение трех ортогональных проекций вектора напряженности внешнего магнитного поля.

Гибридный измерительный комплекс пригоден для решения следующих задач геофизики, трудно разрешаемых другими средствами:

- Расшифровка природы магнитных аномалий.
- Поиск тел с повышенной магнитной восприимчивостью в околоскважинном пространстве.
- Определение пространственного положения магнитных масс.
- Выделение зон инверсий магнитного поля по разрезу скважин.

– Контроль азимута и зенитного угла исследуемых скважин.

– Отбраковка «ложных» аномалий при использовании в процессе бурения утяжелителя буровых растворов на базе магнитных материалов.

– Наведение ствола поисковой скважины на ствол аварийной скважины при ликвидации аварии в нефтегазовых скважинах.

Состав и назначение гибридного инклинометра

Разрабатываемый в НИИ прикладной механики имени академика В. И. Кузнецова гироманометрический инклинометр измерительного типа предназначен для определения траектории измеряемой буровой скважины, в том числе для решения следующих задач:

- Определение зенитного угла как функции от глубины погружения, необходимого для определения отклонения буровой скважины от вертикали.
- Определение апсидального угла как функции от глубины погружения (угла разворота вокруг продольной оси скважинного прибора относительно вертикальной плоскости, проходящей через ось ствола скважины), необходимого для определения профиля скважины в подземном пространстве.
- Определение географического азимута как функции от глубины погружения, необходимого для определения профиля скважины в географических координатах.
- Определение магнитного азимута как функции от глубины погружения, необходимого для определения профиля скважины по магнитному азимуту (в немагнитных средах);
- Измерение напряженности и ориентации магнитного поля относительно географического меридиана, необходимых для определения расположения магнитных масс (магнитных руд, старых обсадных скважин и др.) относительно исследуемой скважины.
- Измерение температуры, необходимой для остановки погружения скважинного прибора по причине достижения предельной температуры его работы.

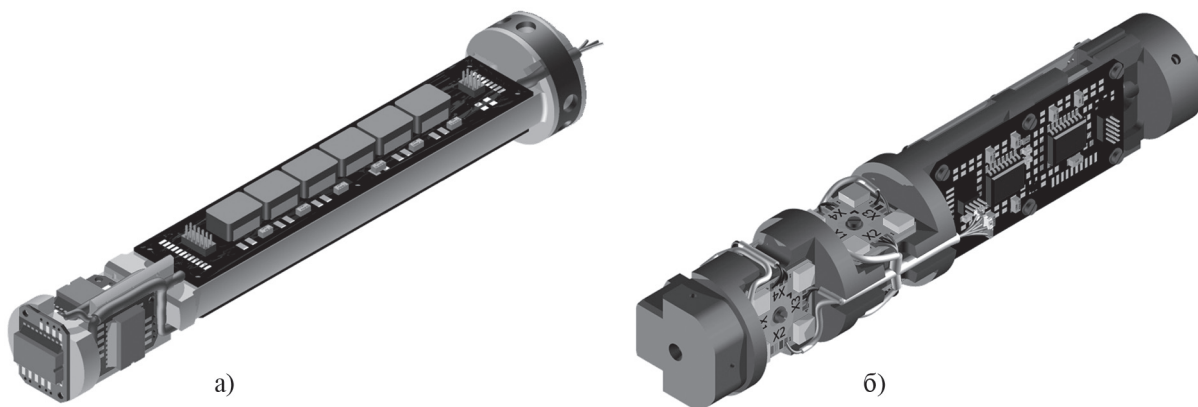


Рис. 1. Конструкция трехосного блока: а) магнитометры, б) акселерометры
Fig. 1. Construction of a three-axis unit: a) magnetometers, b) accelerometers

В состав инклинометра входят скважинный прибор с центраторами, коротажный кабель, наземный пульт электропитания и связи и персональный компьютер.

Диаметр скважинного прибора составляет 36 мм, что в совокупности с широким сортаментом центраторов позволяет проводить измерения в скважинах практических всех диаметров.

Благодаря введению трехосного блока магнитометров появляется возможность не только определять направление оси ствола скважины в пространстве и выделять участки перегибов оси ствола скважины, но и получать исходные данные для геологических построений, например для определения истинных глубин залегания продуктивных пластов. Конструкция блока магнитометров показана на рис. 1а. Блок магнитометров содержит три микросхемы двухосных магнитометров НМС1002 производства Honeywell, плату предварительного усилителя сигналов магнитометров, а также плату питания цепей перемангничивания и мостов магнитометров. Следует отметить, что все используемые электронные компоненты имеют широкий температурный диапазон.

В конструкцию прибора также входит трехосный блок акселерометров. Сигналы, снимаемые с трехосного блока акселерометров, используются при расчете зенитного и апсидального углов. Конструкция блока магнитометров показана на рис. 1б.

В качестве чувствительных элементов используются 24 микромеханических двухосных акселерометра ADXL203CE, произ-

водства Analog Device. В состав блока также входят платы предварительного усилителя сигналов акселерометров и термодатчика и микропроцессорный модуль, предназначенные для аналоговой и цифровой обработки сигналов.

Блок подвижных волоконно-оптических гироскопов содержит два гироскопа с поперечной осью чувствительности, установленные в подвижной рамке, а также двигатель и систему фиксации. Конструкция блока показана на рис. 2. Система фиксации положения подвижной рамки используется для управления угловым положением рамки с закрепленными на ней ВОГ в плоскости, перпендикулярной продольной оси скважинного прибора. На подвижной рамке установлена плата предварительного усилителя ВОГ. Для минимизации размеров плата предварительного усилителя выполнена в форме гибко-жесткой.

Кроме двух каналов, усиливающих сигналы, поступающие с гироскопов, плата также содержит источники питания волоконно-оптических гироскопов и предварительный усилитель сигналов, поступающих с термодатчиков ВОГ. Сигналы, снимаемые с ВОГ, используются при расчете географического азимутального угла как в непрерывном режиме работы, при котором рамка остается неподвижной относительно корпуса скважинного прибора, так и в многоточечном.

Блок неподвижного ВОГ и система передачи информации на поверхность содержит гироскоп с продольной осью чувствительности, закрепленный неподвижно, платы



Рис. 2. Блок подвижных волоконно-оптических гироскопов
Fig. 2. A block of movable fiber optic gyroscopes



Рис. 3. Блок неподвижных волоконно-оптических гироскопов
Fig. 3. A block of static fiber optic gyroscopes

предварительного усилителя сигналов неподвижного ВОГ, микропроцессорный модуль, источник вторичного электропитания и контроллер связи, а также розетку. Конструкция блока неподвижного ВОГ и системы передачи информации показана на рис. 3.

Микропроцессорный модуль обрабатывает предварительно усиленные аналоговые сигналы, поступающие с неподвижного ВОГ, и преобразует их в цифровые, а также получает информацию с термодатчика, трехосных блоков акселерометров и магнитометров и подвижных ВОГ. Вырабатываемый микропроцессорным модулем низковольтный цифровой сигнал поступает на контроллер связи. Сигналы, снимаемые с азимутального ВОГ, используются при расчете географического азимутального угла в непрерывном режиме работы.

Волоконно-оптические гироскопы

Как известно, максимальная рабочая температура скважинного прибора инклинометра определяет предельную глубину скважины, на которой могут проводиться измерения геологических параметров без дополнительной тепловой защиты. В разработанных ранее в НИИ ПМ им. акад. В.И. Кузнецова инклинометрах в качестве чувствительных элементов применялись динамически настраиваемые гироскопы (ДНГ). Замена ДНГ на ВОГ позволяет повысить вибростойкость и ударопрочность скважинного прибора инклинометра, сохранив точностные характеристики и понизив общую стоимость

прибора. Применение в составе скважинного прибора, разрабатываемого ВОГ, с расширенным диапазоном рабочих температур позволит, кроме вышеперечисленных достоинств, измерять геологические параметры скважин большей глубины, что повысит его конкурентоспособность.

Разрабатываемый ВОГ построен по «минимальной конфигурации» [8] и включает в себя два разветвителя, поляризатор, фазовый модулятор, катушку с оптоволоконным контуром, электронную плату, источник излучения и фотодетектор. В отличие от сложных в реализации оптико-физических схем ВОГ с замкнутой обратной связью [8–12] «минимальная конфигурация» ВОГ позволяет сконцентрироваться на проблеме разработки ВОГ с расширенным диапазоном рабочих температур. Для создания чувствительной катушки используется анизотропное одномодовое оптическое волокно со специальным высокотемпературным покрытием, а также микроструктурированное оптическое волокно.

Микроструктурированное оптическое волокно имеет сложную структуру внешней оболочки, обладающую свойствами фотонного кристалла. Такая структура позволяет управлять в широких пределах такими характеристиками, как двулучепреломление, дисперсия, площадь поля моды. Возможности микроструктурированного оптоволокна позволяют получить идеальное сочетание параметров для малогабаритного волоконно-оптического гироскопа. Применение инновационного микроструктурированного волокна

расширяет возможности применения ВОГ благодаря его особым свойствам. В отличие от ВОГ, использующих высоколегированное оптоволокно [4, 13], такие ВОГ могут применяться для создания бесплатформенных инерциальных систем навигации и инерциальных измерительных приборов космических аппаратов с большим сроком функционирования.

Источником излучения является лазерный диод с излучением в инфракрасном диапазоне. В настоящее время широко применяют суперлюминесцентные источники излучения, но в связи с невозможностью применять такие источники при температурах порядка 120 °С выбраны лазерные диоды. Применяются лазерные диоды PL90A002STA и PL98A004FAA производства фирмы Laser Components.

В качестве фотодетекторов используются фотодиоды BPW20RF и BPW24R, имеющие следующие технические характеристики:

Выбранная элементная база способна обеспечить функционирование «минимальной конфигурации» ВОГ в условиях воздействия заданных температур.

Фазовый модулятор выполнен из пьезокерамического кольца ЦТСтБС-2 и ЦТС-19, производства фирмы ЭЛПА, с намотанной на него петлей оптоволокна и располагается вблизи одного из концов катушки интерферометра ВОГ.

Расщепитель излучения представляет собой волоконный сварной биконический разветвитель. В качестве поляризатора используется волоконный поляризатор. Разветвитель и поляризатор будут изготовлены на установке по обработке оптических волокон VYTRAN GPX-3000. Сварочные аппараты VYTRAN GPX-3000 – это уникальные многоцелевые платформы для изготовления сплавных соединений, волоконных объединителей, конусов, линз и других волоконно-оптических изделий. В серии GPX-3000 используется уникальная система нитей накаливания.

Основные технические характеристики ВОГ:

- диапазон рабочих температур от –10 до +120 °С;

- габариты прибора с продольной осью чувствительности $\varnothing 24$ мм и $h = 50$ мм;
- габариты прибора с поперечной осью чувствительности $\varnothing 26$ мм и $h = 52$ мм;
- класс точности прибора 10 град/час [12];
- потребляемая мощность не более 1 Вт.

Режимы работы инклинометра

Разрабатываемый инклинометр поддерживает два режима работы: непрерывный и многоточечный.

Работая в многоточечном режиме, скважинный прибор проходит от остановки до остановки расстояние порядка 25 м вдоль оси скважины со скоростью не более 1,0 м/с. Время проведения измерений на каждой остановке не более 5,0 минут. Во время остановки географический азимутальный угол измеряется в режиме гирокомпасирования. Данный режим позволяет добиться более точных результатов измерений, но при этом на исследование одной скважины уходит от 8 до 12 часов. Для ускорения процесса измерений был разработан непрерывный режим работы.

При работе в непрерывном режиме географический азимутальный угол измеряется непрерывно тремя ВОГ. Скважинный прибор инклинометра проходит 500 м, после чего останавливается на 5 минут и для уточнения хранимого в скважинном приборе азимута работает в режиме гирокомпасирования, после чего прибор продолжает движение. Данный режим позволяет снизить время проведения замеров в несколько раз.

Характеристики инклинометра

Инклинометр будет обладать следующими техническими характеристиками:

- диапазон измерения напряженности магнитного поля ± 200 мТл;
- диапазон измерения температуры –30...+120 °С;
- максимальные выдерживаемые многократные удары и вибрации 50 g;
- максимальные погрешности измерения зенитного угла $\pm 0,05^\circ$;

- максимальные погрешности измерения географического азимутального угла в диапазоне зенитных углов $4...60^\circ \pm 0,5^\circ$;
- максимальные погрешности измерения географического азимутального угла в диапазоне зенитных углов $0,5...4$ и $60...80^\circ \pm 2,0^\circ$;
- максимальные погрешности измерения апсидального угла $\pm 0,5^\circ$;
- максимальные погрешности измерения магнитного азимутального угла (при отсутствии магнитных масс) $\pm 2,0^\circ$;
- максимальные погрешности измерения напряженности магнитного поля $\pm 1,0$ мкТл;
- максимальные погрешности измерения температуры $\pm 1,0$ °С.

Заключение

В разрабатываемом инклинометре применены наработки и конструкторские решения, полученные при создании предыдущих инклинометров на ДНГ, производимых ранее в НИИ ПМ, и результаты теоретических исследований свойств бесплатформенных инерциальных систем на ВОГ [3, 5].

Испытаны макеты составных частей инклинометра, такие как трехосный блок акселерометров, трехосный блок магнитометров, блок ВОГ. В макете в качестве гироскопических чувствительных элементов используются волоконно-оптические гироскопы фирмы Физоптика. Два гироскопа ВГ091А установлены в подвижной рамке, гироскоп ВГ091Б закреплен неподвижно. Испытания подтвердили технические характеристики, заложенные в техническом задании. Ведутся работы по созданию действующего макета всего прибора.

Создаваемый инклинометр имеет ряд преимуществ по сравнению с его аналогами:

- Возможность измерения одновременно географического и магнитного азимутальных углов, а также напряженности и ориентации магнитного поля относительно географического меридиана.
- Повышенная вибропрочность и устойчивость к ударам, по сравнению с инклинометрами, построенными на основе ДНГ.
- Расширенный диапазон рабочих температур благодаря применению разраба-

тываемых в настоящий момент в НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова волоконно-оптических гироскопов с расширенным диапазоном рабочих температур.

– Возможность работы как в многооточечном, так и в непрерывном режимах.

Библиографический список

1. Малыкин, Г.Б. Эффект Саньяка. Корректные и некорректные объяснения / Г.Б. Малыкин // Успехи физических наук, 2000. – Т. 170. – № 12. – С. 1325–1349.
2. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / ред. Э. Удда. – М.: Техносфера, 2008. – 520 с.
3. Баландин, А.И. Моделирование бесплатформенных инерциальных систем ориентации на волоконно-оптических гироскопах / А.И. Баландин, Н.И. Кробка // XVIII Санкт-Петербургская межд. конф. по интегрированным навигационным системам. Сб. материалов. (30 мая – 01 июня 2011 г.). – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ Электроприбор, 2011. – С. 125–127.
4. Коркишко, Ю.Н. Волоконнооптический гироскоп навигационного класса точности / Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е., Пономарев, В.Г., Марчук В.Г., Морев И.В., Кострицкий С.М., Падерин Е.М., Несеюк Л.П., Буравлев А.С., Лисин Л.Г. // XIV Санкт-Петербургская межд. конф. по интегрированным навигационным системам, 28–30 мая 2007 г. – СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ Электроприбор, 2007. – С. 141–150.
5. Krobka N.I. Non-commutative kinematic effects and laws of fiber-optic gyro noise accumulation in strapdown inertial orientation systems. Proc. of the 16th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (25-27 May 2009, Saint Petersburg, Russia) – SRC of the Russian Federation Central Scientific and Research Institute «Elertropribor». 2009. pp. 69–72.
6. Lefevre H. The Fiber Optic Gyroscope. Artech House, 1993.
7. Dyott R.B., Bennett S.M., Allen D., Brunner J. Development and commercialization of open loop fiber gyros at KVH Industries (formerly at Andrew). Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, 2002. OFS 2002, 15th. Vol. 1. pp. 19–22.
8. Ulrich R. Fiber-Optic Rotation Sensing with Low Drift. Opt. Lett. 1980. Vol. 5, no. 173.
9. Kim B.Y., Lefevre H.C., Bergh R.A., Shaw H.J. Harmonic Feedback Approach to Fiber Optic Gyro Scale Factor Stabilization. Optical Fiber Sensors, IEE Conference Publication, 1983. p. 136.
10. Kim B.Y., Shaw H.J. All Fiber Gyroscope with Linear Scale Factor Using Phase Detection // Proc. SPIE. 1984. Vol. 478, no. 142.
11. Kim B.Y., Shaw H.J. Phase-Reading All-Fiber-Optic Gyroscope. Opt. Lett. 1984. Vol. 9, no. 378.
12. Cahill R.F., Udd E. Phase-Nulling Fiber-Optic Laser Gyro. Opt. Lett. 1979. Vol. 4, no. 93.
13. Yang Yuanhong, Wang Zheng, Yi Xiaosu, Zhang Weixu High precision fiber optic gyroscope based on Er-doped superfluorescent fiber source. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics. – 2005.
14. IEEE Std 952-1997. IEEE Standart Specification Format Guide and Test Procedure for Singe-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros.

THE DEVICE FOR THE WELL TO THE INCLINOMETERS

Baryshnikov K.O., pg. BMSTU, head of sector, filial of «TsENKI» - «NII PM named after Academician V.I. Kuznetsov»;
Koptenkov M.I., pg. MSFU, a leading design engineer branch, filial of «TsENKI» - «NII PM named after Academician V.I. Kuznetsov»;
Balandin A.I., pg. BMSTU, chief engineer, filial of «TsENKI» - «NII PM named after Academician V.I. Kuznetsov»; **Shahovtsev E.V.**, pg. IAAC, a leading engineer technologist, filial of «TsENKI» - «NII PM named after Academician V.I. Kuznetsov».

mkoptenkov@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University, st. Baumanskaya 2-ya, 5, Moscow, 105005, Russia
 Moscow State Forest University (MSFU), 1st Institutskaya st., 1, 141005, Mytishi, Moscow reg., Russia

International Academy of Appraisal and Consulting (IAAC),
 st. Novocheryomushkinskaya, 65, k. 1 Moscow, 117418, Russia

«Center for Operation of Space Ground-Based Infrastructure»—«Scientific and Research Institute of Applied Mechanics named after Academician V.I. Kuznetsov», Aviamotornaya st., house 55, Moscow, 111123, Russia

In the Scientific Research Institute of Applied Mechanics named after academician Kuznetsov the hybrid giromagnetic inclinometer, which has incorporated the best qualities of magnetometric and gyroscopic inclinometers, is being developed. The inclinometer allows to measure the key geophysical parameters of a borehole, such as:

- 1) Zenith angle, which is used to define a borehole deviation from vertical axis;
- 2) Apsidal angle (a turn angle of a longitudinal axis of the borehole device relatively to the vertical plane passing through a wellbore axis), which is used to define a profile of a borehole in the underground space;
- 3) Geographical azimuth, which is used to define a profile of a borehole in geographical coordinates;
- 4) Magnetic azimuth, which is used to define a profile of a borehole on a magnetic azimuth (in not magnetic environments);
- 5) Intensity and orientation of a magnetic field relatively to geographical meridian, which is used to define an arrangement of magnetic masses (magnetic ores, old cased boreholes, etc.) relative to the geometry of the measured borehole;
- 6) Temperature, which is used to stop immersion of the borehole device due to achievement of the device temperature limit.

The inclinometer consists of a borehole device with centralizers and a ground control panel for power supply and communication. The borehole device includes: triaxial accelerometers module, triaxial magnetometers module, mobile fiber-optical gyroscopes (FOG) module, static azimuthal FOG and ground communication system. Due to introduction of the triaxial block of magnetometers it is possible not only to define the direction of a wellbore axis in space and to allocate inflection areas of a wellbore, but also to receive initial data for geological constructions, e. g. for definition of productive layers' true depths.

Keywords: Fiber-optic gyroscope, giromagnetometric inclinometer, small-size device, extended temperature range.

Referens

1. Malykin G. B. *Effekt San'yaka. Korrektne i nekorrektne ob'yasneniya* [The Sagnac effect. Correct and incorrect explanations.] *Uspekhi fizicheskikh nauk* [The successes of the physical sciences], 2000. V. 170, № 12. p. 1325-1349.
2. *Volonno-opticheskie datchiki. Vvodnyy kurs dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* [Fiber Optic Sensors. Introductory course for engineers and scientists] red. E. Udda. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2008. 520 p.
3. Balandin A. I., Krobka N. I. *Modelirovanie besplatformnykh inertial'nykh sistem orientatsii na volokonno-opticheskikh giroskopakh* [Simulation of strapdown inertial systems orientation on fiber-optic gyroscopes] XVIII St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. Collection of materials, 30 May – 01 June 2011, St. Petersburg, SRC of the Russian Federation Central Scientific and Research Institute «Elertropribor» Publ., 2011. pp. 125-127.
4. Korkishko Yu. N., Fedorov V. A., Prilutskiy V. E., Ponomarev, V. G., Marchuk V. G., Morev I. V., Kostitskiy S. M., Paderin E. M., Nesenjuk L. P., Buravlev A. S., Lisin L. G. *Volonnoopticheskiy giroskop navigatsionnogo klassa tochnosti* [Fiber-optic gyroscope navigation precision class], XIV St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems. (28-30 May 2007 St. Petersburg, Russia), St. Petersburg, SRC of the Russian Federation Central Scientific and Research Institute «Elertropribor» Publ., 2007. p. 141-150.
5. Korkishko Ju. N., Fedorov V. A., Prilutskiy V. E., Ponomarev, V. G., Marchuk V. G., Morev I. V., Kostitskiy S. M., Paderin E. M., Nesenjuk L. P., Buravlev A. S., Lisin L. G. *Volonnoopticheskiy giroskop navigacionnogo klassa tochnosti*. XIV SanktPeterburgskaja mezhdunarodnaja konferenciya po integrirovannym navigacionnym sistemam, 28-30 maja 2007 g. – Sankt-Peterburg: GNC RF CNII Jeletropribor, 2007. pp. 141-150.
6. Krobka N. I. Non-commutative kinematic effects and laws of fiber-optic gyro noise accumulation in strapdown inertial orientation systems. Proc. of the 16th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (25-27 May 2009, Saint Petersburg, Russia) – SRC of the Russian Federation Central Scientific and Research Institute «Elertropribor». 2009. pp. 69–72.
7. Lefevre H. *The Fiber Optic Gyroscope*. Artech House, 1993.
8. Dyott R.B., Bennett S.M., Allen D., Brunner J. Development and commercialization of open loop fiber gyros at KVH Industries (formerly at Andrew). *Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*, 2002. OFS 2002, 15th. Vol. 1. pp. 19– 22.
9. Ulrich R. Fiber-Optic Rotation Sensing with Low Drift. *Opt. Lett.* 1980. Vol. 5, no. 173.
10. Kim B. Y., Lefevre H. C., Bergh R. A., Shaw H. J. Harmonic Feedback Approach to Fiber Optic Gyro Scale Factor Stabilization. *Optical Fiber Sensors*, IEE Conference Publication, 1983. p. 136.
11. Kim B. Y., Shaw H. J. All Fiber Gyroscope with Linear Scale Factor Using Phase Detection // *Proc. SPIE*. 1984. Vol. 478, no. 142.
12. Kim B. Y., Shaw H. J. Phase-Reading All-Fiber-Optic Gyroscope. *Opt. Lett.* 1984. Vol. 9, no. 378.
13. Cahill R. F., Udd E. Phase-Nulling Fiber-Optic Laser Gyro. *Opt. Lett.* 1979. Vol. 4, no. 93.
14. Yang Yuanhong, Wang Zheng, Yi Xiaosu, Zhang Weixu High precision fiber optic gyroscope based on Er-doped superfluorescent fiber source. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*. – 2005.
15. IEEE Std 952-1997. IEEE Standart Specification Format Guide and Test Procedure for Singe-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros.