

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ
И СКВАЖИННЫХ ИСПЫТАНИЙ АВТОНОМНОГО ИНКЛИНОМЕТРА
НА ОСНОВЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ ВОЛНОВОГО ТИПА

В.А. Андрущенко¹, В.Н. Курганский¹, Г.М. Зражевский¹, И.В. Тишаев¹, В.Г. Бугрий², В.Н. Петрук³

¹Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, ул. Васильковская, 90, Киев 03022, Украина

²ООО «Интегрированные решения Надра», ул. Дубровицкая, 28, Киев 04114, Украина, e-mail: _bvg_@ukr.net

³НТ ОАО БК «Букрос СЕРВИС», ул. Половки 88/1; ул. Монастырская 12, Полтава 36034, Украина

Представлена информация о текущем состоянии в области инклинометрических измерений, отмечены современные тенденции развития техническо-методической базы пространственного контроля траектории глубоких нефтегазовых скважин. Проанализированы особенности применения разных типов инклинометрических преобразователей, обоснована актуальность разработки скважинной аппаратуры, построенной с использованием современных микромеханических датчиков (MEMS) угловых параметров. Приведены результаты стендовых лабораторных испытаний автономного гироскопического MEMS-инклинометра и материалы инклинометрической съемки в условиях бурения скважины со сложным профилем ствола.

Ключевые слова: гироскопические инклинометрические преобразователи, инклинометр сбросового типа, параметры пространственной ориентации скважины, микромеханические датчики.

Введение. Непрерывное совершенствование технологий современного бурения является одним из ключевых направлений развития нефтегазового промысла. Растущая потребность в увеличении добычи углеводородного сырья одновременно с усложнением геологического строения месторождений нефти и газа требуют разработки и внедрения более эффективных методических подходов и современных аппаратурных средств комплексного изучения геологического разреза скважины. За последние десятилетия в промысловой геофизике наблюдается увеличение числа научных исследований, ориентированных на получение достоверной оперативной геолого-геофизической и технологической информации о литологических и фильтрационно-емкостных свойствах геологической среды еще на стадии бурения ствола скважины. Развитие каротажных исследований в процессе бурения (КПБ) стало возможным в результате создания эффективных средств контроля положения текущего забоя и геометрии профиля скважины. Инклинометрические данные, обеспечивая пространственную привязку комплекса фактической геолого-геофизической и технологической информации, предоставляют необходимую основу для построения геологической модели среды и дальнейшей разработки месторождения. Точные данные о пространственном положении ствола скважины необходимы для реализации оптимальных экономических показателей глубокого бурения, возможность достижения которых основана на оптимизации скоростных по-

казателей разбуривания массива горных пород, контроле соответствия фактического ствола проектной траектории, упреждения аварийных ситуаций и пр. Новым стимулом к усовершенствованию существующих аппаратурных решений в области инклинометрических исследований стало увеличение объемов наклонно направленного и горизонтального бурения, разбуривание многочисленных боковых стволов нефтегазовых скважин [1, 7, 16]. Необходимость точной и безаварийной проводки ствола скважины актуализирует задачу повышения эксплуатационных характеристик инклинометрической аппаратуры и ее интеграции с методами КПБ (в том числе гамма-каротажем и методами скважинной электротриемии).

Традиционно оперативное измерение и корректировка в нужном направлении параметров траектории скважины, а также контроль процесса и параметров бурения производятся по данным систем телеметрии, максимально приближенным к буровому инструменту. Однако высокая стоимость отечественных и зарубежных телесистем препятствует их широкому внедрению в практику геофизического сервиса [2, 6]. Поэтому широко распространенными остаются инклинометрические приборы на кабеле. Ведутся интенсивные разработки автономной скважинной аппаратуры на буровых трубах и сбросовых вариантах приборов. Реализация нескольких методик измерений в совокупности с разнообразием существующих инклинометрических преобразователей (ИП) стала необходимой базой для создания множества ва-

риантов аппаратуры для контроля и управления траекторией ствола скважины.

Таким образом, развитие и усовершенствование метода инклинометрии требуют четкого осознания недостатков и преимуществ тех или иных способов измерений, учета особенностей использования определенных типов инклинометрических преобразователей в конкретных условиях бурения скважины.

В статье основное внимание уделено проблематике создания автономной аппаратуры сбросового типа на основе использования малогабаритных интегрированных микромеханических (MEMS) датчиков. С учетом динамичного развития за последние 5–10 лет указанной технологии и непрерывного улучшения точностных и эксплуатационных характеристик MEMS-датчиков на фоне снижения их стоимости данное направление исследования представляется весьма перспективным.

Классификация и современное состояние развития инклинометрических измерительных систем. Основное назначение инклинометрических систем – измерение зенитного, азимутального и визирного углов, значения которых в совокупности с комплексом расчетных параметров дают возможность определить пространственную ориентацию субвертикальных, наклонно направленных и горизонтальных нефтегазовых скважин. Базовым элементом современных приборов скважинной навигации является блок инклинометрического преобразователя, тип и параметры которого в значительной степени определяют функциональные возможности и область применения аппаратуры, особенности методики и метрологического сопровождения исследований [17]. Критерии качества используемых преобразователей – точность определения измеряемых величин, надежность и безотказность при воздействии дестабилизирующих факторов (широкого диапазона термобарических условий, вибрационных нагрузок различных амплитуд и частот и др.). При конструировании телеметрических систем и приборов в автономном варианте также необходимо учитывать их массогабаритные параметры и энергоэффективность.

Применяемые в производственной практике инклинометрические приборы в основном используют измерительные системы на основе комбинации трех датчиков гравитационного и трех регистраторов магнитного (феррозондового, магниторезистивного) типов. Максимально достигаемая точность измеряемых параметров для такой сборки регистрирующих элементов составляет $\pm 0,1^\circ$ при измерении зенитного и визирного углов и порядка $\pm 0,5 \div 1^\circ$ для азимутального угла [3, 17]. На практике порядок точностных характеристик ниже в несколько раз. Существенные недостатки таких измерительных систем связаны с

сильным искажающим влиянием на их показания магнитных масс бурильной оснастки и эксплуатационных условий при бурении (интенсивной вибрации, термобарических забойных параметров). Поэтому возможности датчиков магнитного типа для оперативного управления траекторией скважины достаточно ограничены и требуют использования диамагнитных элементов в составе компоновки низа буровой колонны (КНБК) или проведения измерений приборами на кабеле в необсаженном стволе. Достаточная точность решения многих задач подземной навигации и относительная простота конструкции стали основными факторами использования данного типа датчиков в приборах, получивших распространение в практике отечественных промыслово-геофизических работ. На сегодня перечень магнитометрических инклинометров точечного и непрерывного режимов записи широк: КИТ, КИТ-А, ИМН-Н76, ИМН-Н86 (ОАО “Киевский завод Геофизприбор”), ИН1-721, ИМММ-73-120/60, ИМММ-42-120/60 (ВНИИ “Нефтепромгеофизика”), ИММ-32-125/70 (ГП “Момент”), Геопласт-35 (ООО “Геопласт-Телеком”), ИОН-1 (ЗАО “Энергомаш”), ИФМ-А (ООО “Нефтегазгеофизика”), ИНЦ-42 (ОАО УПО “Геофизприбор”), Кварц-32 (ЗАО “СКБ ПН”), СКАТ-ИНМ (НПФ “Централгеофизика”), DEP (Sperry Sun), ShureShot (APS Technology) и др. [10, 17, 21].

Определение элементов ориентации в обсаженных стволах скважин, при проведении навигационных работ в условиях непосредственной близости к прибору сильномагнитных материалов приводит к необходимости применения в аппаратуре гироскопических регистрирующих датчиков.

Современные тенденции в развитии гироскопических приборов и систем условно можно разделить на два направления. Первое предусматривает дальнейшее совершенствование технологий производства традиционных электромеханических приборов и методов обработки полученной информации, второе ориентировано на минимизацию чувствительных элементов путем применения нанотехнологий и построения датчиков с использованием новых физических эффектов.

Состояние гироскопической отрасли позволяет создавать скважинные навигационные приборы на основе разнообразных гироскопических устройств: динамически настраиваемых (ДНГ); волновых твердотельных (ВТГ); волоконно-оптических (ВОГ); роторных механических (РМГ); лазерных гироскопов (ЛГ); микромеханических MEMS-гироскопов и др. [4, 6, 13, 15].

Достижимая точность инклинометрической аппаратуры с использованием гироскопов может быть выше, чем точность аппаратуры на основе магнитометрических и гравитационных датчиков. Точностные характеристики приборов скважин-

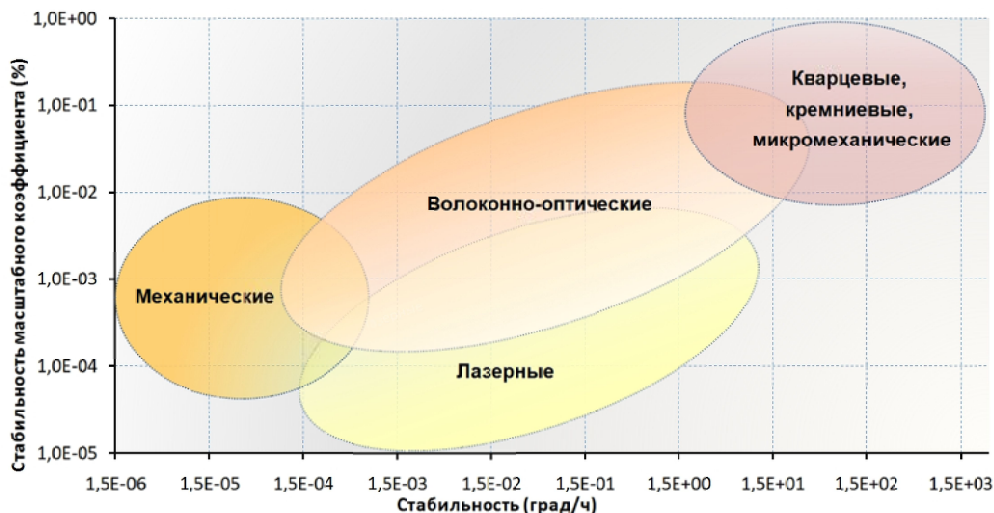


Рис. 1. Области распределения характеристик, определяющих класс точности гироскопов (по данным В. Я. Распопова)

ной геонавигации во многом зависят от конкретных типов инклинометрических преобразователей и характерных для них погрешностей. Показанные на рис. 1 области распределения значений параметров, контролируемых систематические погрешности (величины стабильности масштабного коэффициента и нулевой отметки) для разных типов гироскопических датчиков позволяют судить о соотношении их точностей. Различные факторы, совокупность действий которых приводит к неточностям в измерениях навигационных угловых параметров, по своей природе общие для перечисленных выше типов гироскопов и характеризуются технологическими несовершенствами изготовления датчиков, внешними температурными и ударно-вибрационными воздействиями [8, 12].

Наиболее существенное проявление погрешностей гироскопических датчиков — изменение показаний при дрейфе нуля прибора, компенсация которого требует включения в методику полевых исследований процедур обязательной проверки и калибровки блока инклинометрического преобразователя, а также использования систем терморегулирования и виброзащиты в составе скважинной сборки аппаратуры. Необходимость периодического метрологического контроля аппаратуры уменьшает возможное время работы инклинометра в скважине, что в некоторой степени сужает возможности гироскопической аппаратуры в области оперативного контроля траектории ствола скважины. Несмотря на присущие технологии гироскопии ограничения, это направление в инклинометрии скважин развивается особенно динамично. Среди представленных на рынке современных гироскопических приборов следует назвать аппаратуру: ИГМ-73-120/60 М, ИГМ-42-85/60 (ФГУП “Ижевский механический завод”), МИГ-42 (ООО “АНЕГА-бурение”), ИГМ 33/42 (ООО “Тренд”), УГИ-42 (ЗАО

“СКБ ПН”), ИГН-73-100/80 (ООО “Арас-Плюс”), ИГН 100-100/60-А (Томский политехнический университет) [16, 18], приборы фирмы “SperrySun” (SGR, G2, SurWel), а также аппаратуру одного из лидеров в области промышленно-геофизической гироскопии — компании “Stockholm Precision Tools AB” (приборы “GyroTracer” на основе ДНГ, “GyroLogic” с использованием ВОГ) [20]. Типичные эксплуатационные параметры для названной аппаратуры — работоспособность при скважинной температуре до $+85 \div 100$ °С и максимальном давлении 60–80 МПа, при этом обеспечиваются измерения параметров ориентации скважины с погрешностью порядка $\pm 0,1 \div 0,3^\circ$ (для зенита) и $\pm 0,3 \div 2^\circ$ (для азимута).

Несмотря на разнообразие типов инклинометрических преобразователей и аппаратурных решений на их основе, проблема создания высокоточных, универсальных, простых в конструкции и эксплуатации, недорогих средств контроля пространственного положения ствола скважины на сегодня не решена. Возрастающие требования к эксплуатационным характеристикам гироскопических приборов ставят перед учеными и инженерами задачу не только усовершенствования классических гироскопов с вращающимся ротором, но и поиска принципиально новых идей в области создания датчиков измерения угловых скоростей. Появившиеся еще 10–15 лет назад гироскопы ВТГ и ВОГ уже представлены в промышленных образцах скважинного навигационного оборудования. Наблюдается практический интерес к микромеханическим датчикам, непрерывное улучшение точностных и эксплуатационных параметров которых на фоне интенсивного снижения стоимости, дает предпосылки к созданию малогабаритных, недорогих и достаточно точных инклинометрических приборов.

Своим появлением микромеханические гироскопы (ММГ) обязаны, прежде всего, успехам в

развитии микроэлектронных технологий. Под понятием “MEMS-датчик” подразумеваются различные механико-электрические или электромеханические преобразователи, размер структурных элементов которых и их перемещения в пространстве измеряются в микрометрах [14]. Идея создания MEMS заключается в интеграции в рамках единой кремниевой подложки структуры сравнительно малого объема (0,5–10 см³), объединяющей функции датчиков, исполнительных управляющих элементов, электронных устройств сбора, анализа и контроля полученной информации.

История разработки первых интегрированных микромеханических устройств контроля угловых параметров связана с научными работами Драйперовской лаборатории (США), где с 1990-х годов велись исследования в области создания микромеханического гироскопа на основе камертона [9]. Эволюция подходов к созданию MEMS-гироскопических устройств привела к смещению принципов их построения – использованию датчиков с подвижной инерционной массой, совершающей тот или иной тип перемещений. Начало коммерческого промышленного применения микромеханических датчиков – конец 1990-х – начало 2000-х годов, когда фирмой “Bosch” был разработан и применен в автомобильной промышленности микрогироскоп с ротором в качестве чувствительного элемента. Позже компания “Analog Devices” выпустила промышленный MEMS-гироскоп, который интегрировал на единой кремниевой основе микромеханические узлы и электрические управляющие цепи.

На текущем этапе развития микромеханические гироскопы представлены разнообразными типами упругих подвесов чувствительной массы прибора. При этом общий принцип работы ММГ заключается в создании поступательного или вращательного движения чувствительного элемента вдоль перемещений одной степени свободы и измерений перемещений другой степени свободы, природа которых связана с разными физическими эффектами в поле действия угловой скорости перемещения датчика [5, 9]. Амплитуда возникающих перемещений является мерой измеряемой угловой скорости. Следует отметить фактическую идентичность построения современных MEMS-гироскопов и акселерометров, отличие заключается лишь в выходной величине, которая в гироскопическом датчике представляет значения угловой скорости по осям прибора, пересчитанные в величину углов поворота.

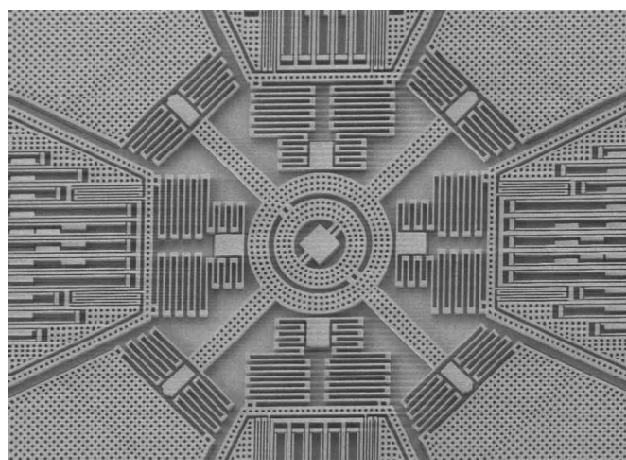
Критериями классификации микромеханических гироскопов могут быть принципы организации упругого подвеса инертной массы или способы реализации первичных и вторичных колебаний чувствительного элемента гироскопа. Общепринятая классификация ММГ в зависимости от спо-

соба реализации первичных и вторичных колебаний инерционной массы выглядит следующим образом:

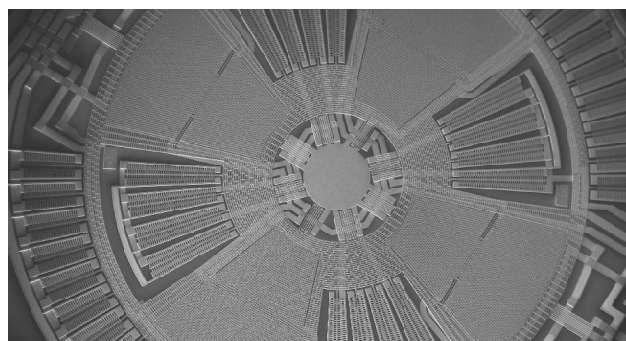
- 1) микромеханические гироскопы с поступательными движениями перемещений двух степеней свободы (LL-тип ММГ) (рис. 2, а);
- 2) микромеханические гироскопы с вращательным движением вдоль перемещений одной степени свободы, поступательным – другой (RL- и LR-тип ММГ);
- 3) микромеханические гироскопы с вращательными (угловыми) движениями перемещений двух степеней свободы (RR-тип ММГ) (рис. 2, б).

Согласно схемам построения упругого подвеса, MEMS-гироскопы разделяются на ММГ с карданным подвесом (внутренним или наружным), стержневые, кольцевые, камертонные.

Рассматривая физические основы функционирования микромеханических датчиков, следует кратко изложить теоретическую базу волновых твердотельных гироскопов кольцевого типа. Датчик угловых скоростей такого типа обладает важными свойствами, необходимыми для решения задач подземной геонавигации, – достаточно низким температурным дрейфом и уровнем шумов, расширенным диапазоном рабочих температур, высокой виброзащищенностью.



а



б

Рис. 2. Чувствительные элементы гироскопа LL- и RR-типов. Длина фрагмента на фото: а – 4 мм; б – 5 мм

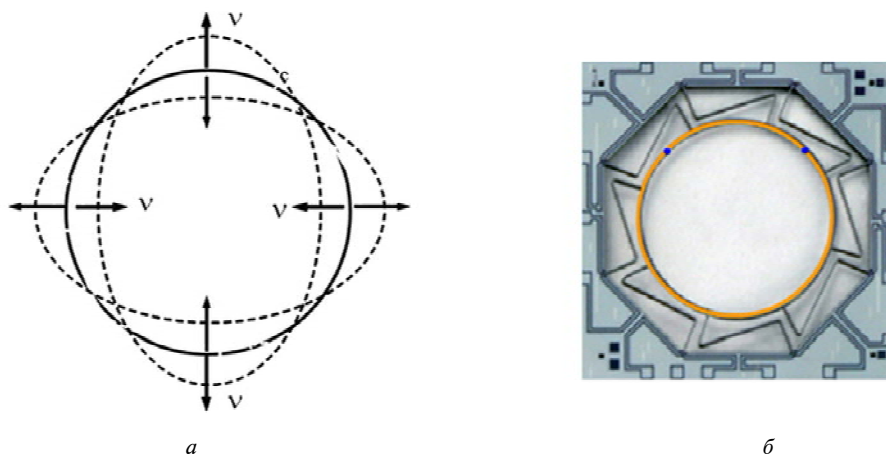


Рис. 3. Схема работы (а) и изображение (б) волнового гироскопа кольцевого типа при отсутствии угловых перемещений. Желтой линией выделен контур чувствительного элемента, синие точки – пучности стоячей волны

Эти гироскопы, изготавливаемые на базе современных кремниевых технологий, представляют собой своеобразный электронный чип с кварцевой подложкой площадью в несколько квадратных миллиметров, на которую методом фотолитографии наносится чувствительный элемент кольцевого типа, состоящий обычно из 4 приводов первичного движения и 4 вторичных снимающих преобразователей. При работе гироскопа в кольцевом резонаторе возбуждаются первичные колебания высокой частоты (единицы–десятки кГц), имеющие форму стоячей волны. При отсутствии радиальных угловых движений кольцо приобретает эллиптическую форму с симметричным положением точек пучностей (рис. 3).

При вращении гироскопического датчика относительно оси, перпендикулярной к плоскости чувствительного элемента, момент сил инерции Кориолиса вызывает вращение (прецессию) стоячей волны относительно кольцевого резонатора. Деформация кольца приводит к нарушению симметричности точек пучности и вызывает радиальное движение вторичных снимающих преобразо-

вателей (рис. 4). Определив по величине перемещений вторичных снимающих преобразователей текущее положение стоячей волны относительно кольцевого резонатора, можно получить информацию о значении угловой скорости и, соответственно, угла поворота датчика гироскопа в инерциальной системе.

Принцип волнового твердотельного гироскопа кольцевого типа широко используется многими компаниями-производителями микромеханических компонент. Одним из возможных примеров такого типа MEMS-датчика угловых параметров являются микромеханические приборы компании “Silicon Sensing” (рис. 5).

В настоящее время работы в области микромеханических гироскопов и акселерометров ведут многие научные центры в Японии, Южной Корее, США, России, Швейцарии, Швеции и других странах. Наиболее известные производители MEMS-гироскопов – фирмы “Murata”, “Silicon Sensing”, “STMicroelectronics”, “Robert Bosch GmbH”, “Tokin”, “Fujitsu”, “Futaba”, “Hobbico”, “Sensorog”. В последние несколько лет для отрас-

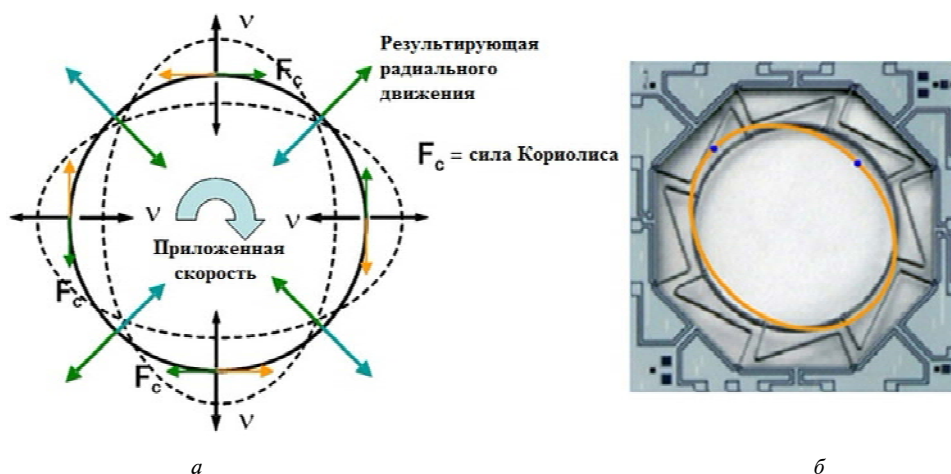
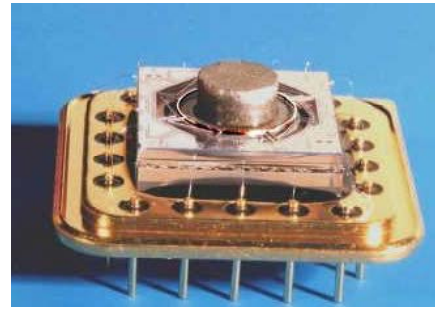


Рис. 4. Схема работы (а) и изображение (б) волнового гироскопа кольцевого типа при наличии угловых перемещений относительно оси, перпендикулярной к плоскости чувствительного элемента. Желтой линией выделен контур чувствительного элемента, синие точки – пучности стоячей волны



a



б

Рис. 5. Волновой твердотельный микромеханический гироскоп кольцевого типа CRS05 (“Silicon Sensing”): *a* – общий вид; *б* – вид чувствительного элемента при снятой защитной крышке

ли микромеханических компонент характерен интенсивный рост продаж (на уровне 9–12 % ежегодно) с объёмом рынка ~11 млрд дол. США и перспективой его увеличения в 2 раза к 2018 г., согласно аналитическим исследованиям Yole Development. Значительную часть этого сегмента микроэлектроники занимают MEMS-гироскопы (3-е место после датчиков давления и акселерометров). Новые тенденции в развитии микромеханических компонент предполагают создание интегрированных приборов, структуру которых составляет несколько разнотипных датчиков (ускорения, угловых параметров, температуры).

Интенсивные исследования в области микромеханических датчиков параллельно с расши-

рением их ассортимента приводят к улучшению эксплуатационных характеристик: точности, расширению диапазона рабочих термобарических условий и динамических ударных нагрузок, минимизации дрейфа показаний во времени [8]. Создаются датчики специализированного назначения (CRS39 (“Silicon Sensing”) для геофизических исследований) среднего и высокого класса точности, использование которых уже позволяет внедрять их в практику инклинометрического приборостроения. Приведенные в таблице характеристики новых MEMS-гироскопов подтверждают их конкурентность в сравнении с другими современными типами гироскопов при выполнении определенных видов работ.

Характеристики современных микромеханических гироскопических датчиков

Параметр, характеристика	Компания, прибор			
	“Murata”, SCR1100-D04	“Silicon Sensing”, CRS39-01	“Analog Devices”, ADIS16136	“Sensoror AS”, STIM202
Количество осей	1	1	1	от 1 до 3
Максимальная угловая скорость, град/с	±300	±25	±450	±400
Коэффициент преобразования, мВ·град. ⁻¹ ·с	18	80	71	–
Температурный коэффициент, %	±1	±0,035	±0,00125	±0,002
Линейность, %	±1	±0,006	±0,01	±0,2
Дрейф нуля, град/ч	<2,1	0,2	4	0,5
Ширина частотной полосы, Гц	50	25 ± 10	380	262
Диапазон рабочих температур, °С	–40 ... +125	–10 ... +110	–40 ... +70	–40 ... +85
Габариты, длина/ширина/высота, мм	19,71/12,1/4,6	75/42,5/21,5	66/65/–	35,9/38,6/20
Масса датчика, г	12,5	–	31	55
Уровень цен, долл. США	~70–100	~300–400	~1400–1600	~5000

Результаты лабораторных и производственных испытаний автономного инклинометра на базе MEMS-гироскопа. Выбор аппаратуры и методики получения информации о траектории скважины во многом зависит от поставленных геологических задач, условий и технико-экономических показателей бурения. Для проводки ствола скважины к намеченной цели в условиях горизонтального бурения в пределах тонкого пласта-коллектора необходимо использовать высокоточную забойную телесистему, стоимость которой достаточно высока. В то же время применение аппаратуры такого уровня и использование услуг сервисного персонала при бурении “рядовых” скважин с достаточно простой пологой траекторией ствола могут быть необоснованны с экономической точки зрения. Проведение традиционных инклинометрических работ аппаратурой на кабеле ограничено на достаточно наклонных участках скважины и усложняет процесс оперативного управления траекторией дальнейшего углубления. Альтернативой указанным технологиям геонавигационного сопровождения процесса бурения скважин может быть методика получения инклинометрической информации с помощью забойных автономных инклинометров сбросового типа. Основные достоинства сбросовой аппаратуры следующие:

- относительная простота технологии обслуживания, что дает возможность использовать инклинометр силами буровой бригады без привлечения каротажного отряда;
- возможность проведения измерений при технологических спуско-подъемных операциях, что позволяет с небольшой временной задержкой принимать управленческие решения относительно корректировки текущего направления бурения, не создавая при этом ощутимого влияния на буровой процесс.

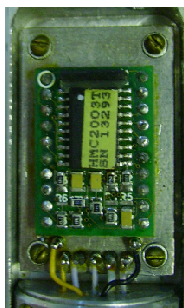
Специалисты механико-математического и геологического факультетов Киевского национального университета имени Тараса Шевченко обладают собственными разработками в области подземной геонавигации: забойной телесистемой

с электромагнитным каналом связи “Паркус”, автономным сбросовым инклинометром СИ-1 с модулем виброметрии “Вибро” [2]. Построенная на базе электромеханических гироскопов с тремя степенями свободы, феррозондов и акселерометров, аппаратура требовала дальнейшего совершенствования. Позитивный опыт создания скважинных приборов (забойного виброметрического модуля “Вибро”) с использованием микромеханических акселерометров “Analog Devices” позволил авторам предложить идею разработки экспериментального образца инклинометра на основе системы одноосных гироскопических MEMS-датчиков волнового типа.

Измерительный блок созданного прибора состоит из акселерометров, магнитометров и волновых твердотельных гироскопов (рис. 6).

Использование такой схемы датчиков при незначительном увеличении габаритов прибора и уровня потребления энергии позволяет дублировать измерения угловых параметров двумя независимыми системами регистрации. В качестве микромеханического гироскопа применены датчики типа CRS05-01 (“Silicon Sensing”) [19].

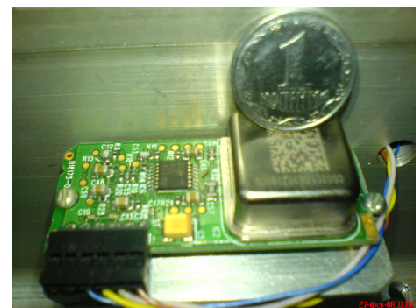
Лабораторные исследования и калибровка измерительной системы проводились на специальном гироскопическом стенде. Выполнен анализ данных контроля стабильности параметров прибора во времени и при различных температурных режимах (рис. 7). Результаты испытаний датчиков в условиях вариации температуры дали возможность проследить известную тенденцию к дрейфу показаний MEMS-устройств и выработать рекомендации относительно температурной стабилизации блока гироскопического преобразователя. Разработчиками была спроектирована и реализована в опытном образце аппаратуры схема температурной стабилизации, функцией которой стало обеспечение температуры измерительного блока в диапазоне от 60 до 90 ± 1 °С. При этом порог температурной стабилизации может устанавливаться в зависимости от реальных скважинных условий применения инклинометра.



а



б



в

Рис. 6. Внешний вид первичных преобразователей инклинометра: а – трехкомпонентный магнитометр промышленного исполнения; б – акселерометр – емкостный дифференциальный датчик оригинального исполнения; в – волновой твердотельный гироскоп – датчик угловой скорости промышленного исполнения

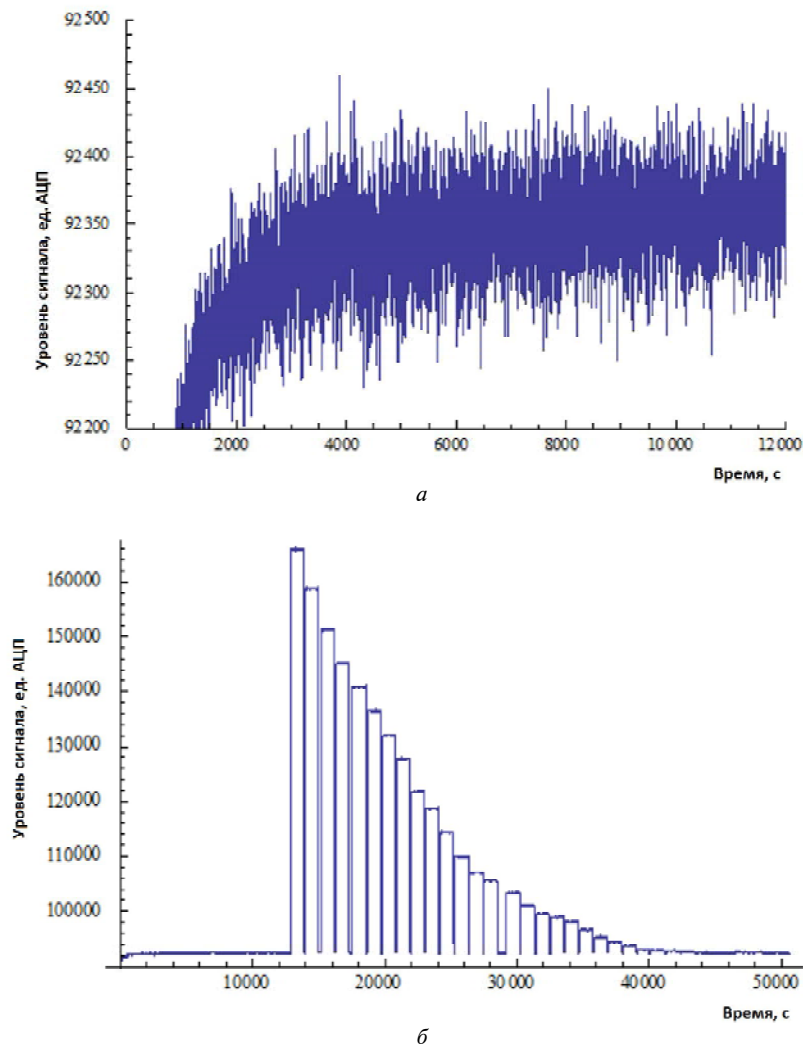


Рис. 7. Результаты лабораторных исследований микромеханического гироскопического датчика на стендовом оборудовании: *а* – график температурной стабилизации во времени; *б* – градуировочная кривая – зависимость уровня сигнала гироскопического датчика (в ед. АЦП) от установленной угловой скорости

Анализ возможных погрешностей градуировки (как следствие нелинейной зависимости выходного сигнала датчика от угла наклона) и временной стабильности показаний гиродатчика при воздействии температурных вариаций и динамических ударных нагрузок показал принципиальную возможность обеспечения точности определения азимутальной ориентации скважины на уровне $\pm 15^\circ$ в течение одного часа измерений после выхода прибора в рабочий режим. Точность определения зенитного угла составляет $\pm 0,2^\circ$ во всем диапазоне его измерений. Точность определения угла апсидальной ориентации (визирного угла) зависит от значения зенитного угла и колеблется в пределах $10 \pm 2^\circ$. Итогом лабораторных испытаний и калибровок инклинометра на основе гироскопов микромеханического типа и специализированного программного обеспечения стали работы по определению угловых параметров пространственной ориентации учебной инженерно-геологической скважины глубиной 18 м.

В производственных условиях образец созданной автономной инклинометрической аппаратуры

был опробован при бурении глубокой разведочной нефтегазовой скважины в центральной части Днепровско-Донецкой впадины. Текущий контроль траектории скважины проводился как обычно, в режиме точечных измерений серийной аппаратурой типа КИТ на каротажном кабеле.

Проводка ствола скважины в районе соляного диапира привела к значительному искривлению профиля в приштоковой зоне и усложнила возможности дальнейшего контроля ее траектории. Увеличение средних значений зенитного угла с $\sim 3^\circ$ на глубине 2000 м до $\sim 40^\circ$ на глубине 2800 м ограничило продвижение скважинного прибора на кабеле на данном интервале ствола скважины (рис. 8). Необходимость обсадки колонной труб искривленного участка ствола скважины для предотвращения возможных аварийных ситуаций в дальнейшем стала причиной неэффективности инклинометрической аппаратуры на магнитометрических датчиках. Возникшая производственная необходимость использования гироскопических датчиков контроля угловых параметров подтверждает целесообразность применения разработан-

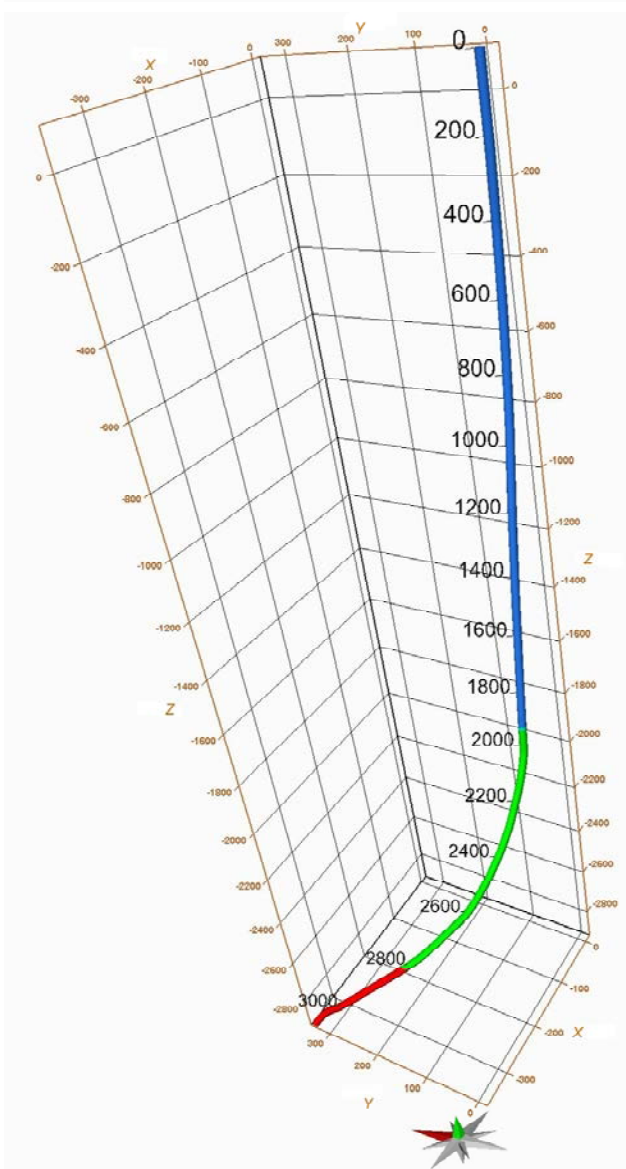


Рис. 8. Траектория ствола исследуемой скважины (соотношение горизонтального и вертикального масштабов 2:1). Синим цветом выделен интервал проведения инклинометрии только прибором КИТ, красным – исследования только аппаратурой на микромеханических гироскопах, зеленым – участок перекрытия работ приборов КИТ и MEMS-гироскопа

ного авторами автономного инклинометра. Основной задачей проведенных инклинометрических исследований было получение траектории скважины в процессе бурения от точки набора существенной кривизны (на глубине приблизительно 2000 м) до отметки текущего забоя.

Методика проведения измерений MEMS-инклинометром в исследуемой скважине была следующей:

- предварительная калибровка и проверка прибора перед спуском в скважину;
- выбор и установка необходимых программных параметров функционирования аппаратуры в автономном режиме;
- спуск прибора под давлением промывочной жидкости на забой скважины перед плановым подъемом колонны буровых труб;
- запись угловых параметров траектории скважины в непрерывном режиме в интервале 1962–3138 м во внутреннюю флэш-память при подъеме бурового инструмента;
- считывание и обработка на поверхности данных с прибора.

Использование такой схемы получения данных позволило не только осуществить инклинометрические измерения с минимальным влиянием на буровой процесс, но и замерить траекторию ствола скважины от забоя к устью, а также провести измерения интересующего текущего призабойного участка скважины в начальное время работы прибора с незначительными погрешностями дрейфа показаний. Дублирование измерений угловых параметров автономным гироскопом и прибором КИТ в интервале 1962–2925 м дало возможность сравнить результаты опытного прибора с данными серийной аппаратуры. Значения зенитного угла, зарегистрированные автономной сбросовой аппаратурой и прибором на кабеле в области набора кривизны траектории скважины (рис. 9), в целом имеют хорошую повторяемость результатов с максимальными расхождениями значений

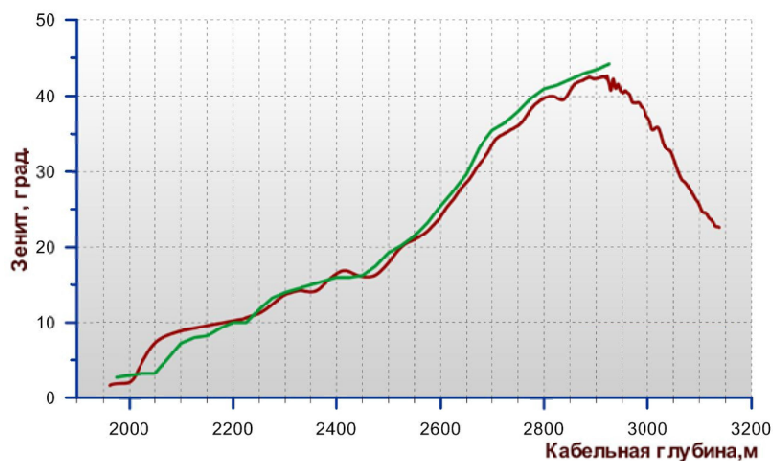


Рис. 9. Сравнение значений зенитного угла в интервале глубин 1960–3140 м по данным прибора КИТ (зеленая кривая) и аппаратуры с использованием MEMS-датчиков (красная кривая)

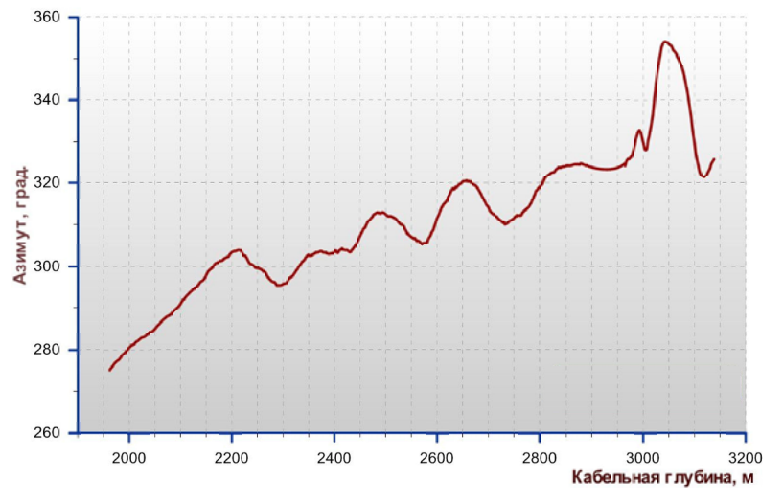


Рис. 10. Фрагмент результатов измерений азимутального угла в интервале глубин 1960–3140 м по данным MEMS-гироскопа

зенита $1,5-2^\circ$ (в области значений углов $30-45^\circ$) до 4° (в области от 0° до 10°). Информация об изменении азимутального угла в интервале глубин 1960–3140 м представлена на рис. 10. Резкое изменение величины азимута на отметке 3050–3100 м связано с посадкой прибора в районе долота. Сравнение с результатами измерений серийной аппаратурой не проводилось по причинам, рассмотренным выше.

В итоге данные гироскопического инклинометра позволили не только определить траекторию ствола обсаженной скважины в исследуемом проблемном интервале, но и обосновать необходимость использования забойной телеметрической системы для дальнейшего углубления забоя скважины и его выхода на проектную глубину. Полученные положительные результаты испытаний инклинометра на основе одноосных MEMS-гироскопов подтвердили перспективность использования микромеханических датчиков в качестве измерительной системы аппаратуры подземной геонавигации.

Выводы. Навигация нефтегазовых скважин как составная часть геолого-геофизического сопровождения бурения играет огромную роль в структуре геолого-разведочного процесса, определяя в значительной степени его успешность. Возрастающие требования к точности и оперативности инклинометрической информации в условиях проводки наклонных и горизонтальных участков реализуются за счет привлечения новых методик получения данных о пространственной ориентации ствола скважины и внедрения современной аппаратуры. Однако все типы инклинометрических преобразователей, используемые в практике, наряду с достоинствами имеют недостатки, связанные с условиями и особенностями применения.

Таким образом, проблема выбора оптимального датчика измерения угловых параметров достаточно непростая. Развитие современных техно-

логий позволяет использовать инструментальные микромеханические приборы в качестве инклинометрического датчика. Существующие недостатки MEMS-датчиков (невысокие термо-, виброустойчивость, точность, существенный дрейф нулевой отметки во времени) в значительной степени устранены за последние несколько лет как в приборах “массового” применения, так и в узкоспециализированном сегменте MEMS-компонент. Очевидные преимущества (небольшая масса, малые габариты, низкий уровень потребления энергии) на фоне снижения цен открывают перспективы создания компактных, энергоэффективных, недорогих и достаточно точных образцов инклинометрической аппаратуры. Малые массогабаритные параметры позволяют использовать MEMS-датчики в комплексе с аппаратурой на основе магнитометров и акселерометров, что существенно расширяет ее точность и область использования.

Опыт создания автономной аппаратуры сбросового типа позволил разработчикам включить измерительный блок MEMS-гироскопа в состав имеющегося автономного прибора с акселерометрическими и магнитными датчиками. Разработанный авторами образец инклинометрической аппаратуры на базе микромеханических гироскопов волнового типа успешно прошел лабораторные стендовые испытания. Полученные экспериментальные данные на участке ствола скважины с большой кривизной достаточно хорошо коррелируются с измерениями, проведенными серийной инклинометрической аппаратурой.

Итогом проведенных работ по разработке, созданию и испытанию образца скважинного прибора стало подтверждение перспектив внедрения микромеханических датчиков в современную инклинометрическую аппаратуру и возможность, в некоторых случаях, выполнять возникающие нестандартные технологические задачи в области подземной скважинной геонавигации.

1. *Аксельрод С.М.* Методы опережающей навигации при бурении горизонтальных скважин (по материалам зарубежной литературы) // НТВ “Каротажник”. – 2012. – Вып. 9 (219). – С. 87–127.
2. *Андрущенко В.А.* Сбросовый инклинометр – средство постоянного оперативного контроля траектории ствола скважины в процессе бурения / В.А. Андрущенко, В.Н. Курганский, И.В. Тишаев, Н.В. Петрук, В.Н. Петрук, М.И. Ширманов, А.И. Удовиченко // Там же. – 2008. – Вып. 3. – С. 35–41.
3. *Заико А.И.* Интегрированная измерительная система для подземной навигации на базе феррозондов, акселерометров и гироскопов. – [Электрон. ресурс] / А.И. Заико, Г.А. Иванова // Нефтегаз. дело. – 2012. – № 6. – С. 285–292. – Режим доступа: http://www.ogbus.ru/authors/ZaikoAI/ZaikoAI_1.pdf. – Заглавие с экрана.
4. *Ковшов Г.Н.* Приборы контроля пространственной ориентации скважин при бурении. – Уфа: УГНТУ, 2001. – 228 с.
5. *Конюшев Б.Г.* Компоненты микросистемной техники. Ч. 1. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 117 с.
6. *Лобимцев А.И.* Инклинометры на основе неподвижных датчиков: Аппаратное и математическое обеспечение: Дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2004. – 194 с.
7. *Малюга А.Г.* Инклинометры для исследования глубоких и сверхглубоких скважин. – Тверь: НТП “Фактор”, 2002. – 520 с.
8. *Мусалимов В.М.* Расчёт надёжности упругих элементов микромеханических гироскопов: Учеб. пособие / В.М. Мусалимов, Ю.А. Ротц, С.А. Астафьев, А.В. Амвросьева. – СПб.: НИУ ИТМО, 2012. – 127 с.
9. *Некрасов Я.А.* Методы повышения точности съема информации в микромеханических гироскопах: Дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2007. – 126 с.
10. *НПП “Азимут”* – Продукция. – [Электрон. ресурс] // Режим доступа: <http://www.azimuth.org.ua/product.html>. – Название с домашней страницы Интернета.
11. *Овчинникова Н.А.* Исследование динамики и информационных характеристик двумерного микромеханического гироскопа роторного типа: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2011. – 19 с.
12. *Пат.* 2387828 RU, МПК E21B47/022, G01C19/00. Способ определения угловой ориентации скважин гироскопическим инклинометром / Белов Е.Ф., Белов М.Е. (RU); ООО “Тренд” (RU). – № 2008141502/03; заяв. 22.10.2008; опубл. 27.04.2010. – 4 с.
13. *Плотников П.К.* Элементы теории работы одной разновидности бесплатформенных инерциальных систем ориентации // Гироскопия и навигация. – 1999. – № 3 (26). – С. 23–35.
14. *Распопов В.Я.* Микромеханические приборы. – М.: Машиностроение, 2007. – 399 с.
15. *Терешин В.Г.* К вопросу выбора динамически настраиваемых и волоконно-оптических гироскопов для инклинометрической системы / В.Г. Терешин, Г.А. Иванова // Вестн. УГАТУ. – 2012. – № 1(46). – С. 62–69.
16. *Чичинадзе М.В.* Подземная навигация проблемы и пути решения / М.В. Чичинадзе, Г.В. Попов, Ю.Б. Люсин // Материалы VII С.-Петербур. междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. – М., 2000. – С. 97–99.
17. *Шапошников А.М.* Исследование инклинометрических преобразователей с трехкомпонентными магнитометрами в программно управляемых магнитных полях: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Уфа, 2011. – 16 с.
18. *Шервашидзе В.В.* Автономный бесплатформенный гироскопический инклинометрический комплекс ИГМН-73-120/100 / В.В. Шервашидзе, В.П. Шкляр, В.В. Кармазенко, В.Ф. Макаручук, С.Н. Леоненко // НТВ “Каротажник”. – 2005. – Вып. 3–4. – С. 176–186.
19. *CRS05 Angular Rate Sensor* [Electronic resource] // Mode of access: http://www.siliconsensing.com/wp-content/uploads/2010/04/CRS05_Datasheet.pdf. – Title from the screen.
20. *Stockholm Precision Tools AB* [Electronic resource] // Mode of access: <http://www.stockholmprecisiontools.com/ru/>. – Title from the screen.
21. *SureShot™ Measurement-While-Drilling (MWD) System* [Electronic resource] // Mode of access: <http://www.apstech.com/products/mwd-lwd/sureshot-mwd-system.php>. – Title from the screen.

УДК 550.8.08

ПРАКТИЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ ЛАБОРАТОРНИХ ТА СВЕРДЛОВИНИХ ВИПРОБУВАНЬ АВТОНОМНОГО ІНКЛІНОМЕТРА НА ОСНОВІ МІКРОМЕХАНІЧНИХ ГІРОСКОПІВ ХВИЛЬОВОГО ТИПУ

В.О. Андрущенко¹, В.М. Курганський¹, Г.М. Зражевський¹, І.В. Тишаєв¹, В.Г. Бугрій², В.М. Петрук³

¹*Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Васильківська, 90, Київ 03022, Україна*

²*ООО “Інтегровані рішення Надра”, вул. Дубровицька, 28, Київ 04114, Україна, e-mail: _bvg_@ukr.net*

³*НТ ВАТ БК “Букрос СЕРВІС”, вул. Половки 88/1; вул. Монастирська 12, Полтава 36034, Україна*

Наведено інформацію про поточний стан у сфері інклинометричних вимірювань, відмічено сучасні тенденції розвитку техніко-методичної бази просторового контролю траєкторії глибоких нафтогазових свердловин. Проаналізовано особливості застосування різних типів інклинометричних перетворювачів, обґрунтовано актуальність розробки свердловинної апаратури з використанням сучасних мікромеханічних датчиків (MEMS) кутових параметрів. Подано результати стендових досліджень автономного гіроскопічного MEMS-інклинометра та матеріали інклинометричної зйомки в умовах буріння свердловини зі складним профілем стовбура.

Ключові слова: гіроскопічні інклинометричні перетворювачі, інклинометр скидного типу, параметри просторової орієнтації свердловини, мікромеханічні датчики.

PRACTICAL RESULTS OF LABORATORY AND BOREHOLE TESTS OF AUTONOMOUS INCLINOMETER ON THE BASIS OF WAVE TYPE MICROMECHANICAL GYROSCOPE

V.A. Andrushenko¹, V.N. Kurgansky¹, G.M. Zrazhevsky¹, I.V. Tishaev¹, V.G. Bugriy², V.N. Petruk³

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Vasilkovskaya St, 90, Kiev 03022, Ukraine

²JSC "NADRA Integrated Solutions", Dubrovitskaya St, 28, Kyiv 04114, Ukraine, e-mail: _bvg_@ukr.net

³PubJSC "BUKROS Drilling Company", Polovki 88/1 St, Monastirskaya St, 12, Poltava 36034, Ukraine

The article presents information on the state-of-the art in the field of directional survey, as well as modern development tendencies of the technological and methodological basis of spatial control of deep oil-and-gas well trajectory. Application peculiarities of different types of directional transformers are analyzed, and urgency in designing borehole equipment constructed with the use of modern micromechanical (MEMS) sensors of angular parameter, is grounded. Test bench laboratory examination results of autonomous gyroscopic MEMS-inclinometer and directional fieldwork materials in terms of well drilling with a complex well profile are given.

Keywords: gyroscopic directional transformers, shift type inclinometer, parameters of spatial orientation, micromechanical sensors.

References:

1. Aksel'rod S.M. *Metody operezhayushchey navigatsii pri burenii gorizontol'nykh skvazhin (po materialam zarubezhnoy literatury)* [Advance navigation in horizontal drilling (based on foreign publications)]. *Karotazhnik* [Logger], 2012, no. 9, pp. 87-127.
2. Andrushchenko V.A., Kurganskiy V.N., Tishaev I.V., Petruk N.V., Petruk V.N., Shirmanov M.I., Udovichenko A.I. *Sbrosovyiy inklinometr - sredstvo postoyannogo operativnogo kontrolya traektorii stvola skvazhiny v protsesse bureniya* [Shift inclinometer – tool of constant operational control of borehole trajectory during the drilling]. *Karotazhnik* [Logger], 2008, no. 3, pp. 35-41.
3. Zaiko A.I., Ivanova G.A. *Integrirovannaya izmeritel'naya sistema dlya podzemnoy navigatsii na baze ferrozondov, akselerometrov i giroskopov* [The integrated measuring system for underground navigation based on flux-gates meters, accelerometers and gyroscopes]. *Neftegazovoe delo* [Oil and Gas Business], 2012, issue 6, pp. 285-292. Available at: http://www.ogbus.ru/authors/ZaikoAI/ZaikoAI_1.pdf
4. Kovshov G.N. *Pribory kontrolya prostranstvennoy orientatsii skvazhin pri burenii* [Devices for Control of Spatial Orientation of Borehole during Drilling]. Ufa, *State Petroleum Technological University*, 2001, 228 p.
5. Konoplev B.G. *Komponenty mikrosistemnoy tekhniki. Chast' I* [Components of Microsystem Techniques. Part I]. Taganrog, *Southern Federal University*, 2009, 117 p.
6. Lyubimtsev A.I. *Inklinometry na osnove nepodvizhnykh datchikov: Apparatoe i matematicheskoe obespechenie. Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Inclinometers on the basis of fixed sensors. Hardware and mathematical support. D-r Philosophy (technical sci.) diss.]. Ufa, 2004, 194 p.
7. Malyuga A.G. *Inklinometry dlya issledovaniya glubokikh i sverkhglubokikh skvazhin* [Inclinometers for exploration of deep and ultra-deep boreholes]. Tver, *Faktor*, 2002, 520 p.
8. Musalimov V.M., Rotts Yu.A., Astaf'ev S.A., Amvros'eva A.V. *Raschet nadezhnosti uprugikh elementov mikromekhanicheskikh giroskopov* [Reliability calculation of elastic elements of micromechanical gyroscopes]. St. Petersburg, *National research university of information technologies, mechanics and optics*, 2012, 126 p.
9. Nekrasov Ya.A. *Metody povysheniya tochnosti s'ema informatsii v mikromekhanicheskikh giroskopakh. Dis. kand. tekhn. nauk* [Accuracy enhancement methods of information retrieval in micromechanical gyroscopes. Doctor of Philosophy (technical sci.) diss.]. St. Petersburg, 2007, 126 p.
10. *NPP "Azimut". Produktsiya* [SPO "Azimuth". Production]. Available at: <http://www.azmth.ru/production.html>
11. Ovchinnikova N.A. *Issledovanie dinamiki i informatsionnykh kharakteristik dvumernogo mikromekhanicheskogo giroskopa rotornogo tipa. Avtoref. Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Investigation of dynamics and data characteristics of RR-type gyroscope. D-r Philosophy (technical sci.) published dissertation summary]. St. Petersburg, 2011. 19 p.
12. Patent 2387828. *Sposob opredeleniya uglovooy orientatsii skvazhin giroskopicheskim inklinometrom* [The method of determine well angular orientation by gyroscopic inclinometer]. Belov Ye.F., Belov M.Ye. – Priority from 22.10.2008, kl. E21B 47/022, G01C 19/00.
13. Plotnikov P.K. *Elementy teorii raboty odnoy raznovidnosti besplatformennykh inertsiyal'nykh sistem orientatsii* [Components of Theory of Strapdown inertial system orientation of one variety]. *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and Navigation], 1999, no.3, pp.23-25.
14. Raspopov V.Ya. *Mikromekhanicheskie pribory* [Micromechanical devices]. Moscow, *Mashinostroenie*, 2007, 399 p.
15. Tereshin V.G., Ivanova G.A. *K voprosu vybora dinamicheskii nastraivaemykh i volokonno-opticheskikh giroskopov dlya inklinometricheskoy sistemy* [The choice of dynamically tuned and fiber-optic gyroscopes for directional survey], *Vestnik gosudarstvennogo aviacionnogo universiteta*, Ufa, 2012, vol.16, no. 1(46), pp.62-69.
16. Chichinadze M.V., Popov G.V., Lyusin Yu.B. *Podzemnaya navigatsiya: problemy i puti resheniya* [Underground navigation: problems and solutions] *Materialy VII S.-Peterb. mezhdunar. konf. po integrirovannym navigatsionnym sistemam* [Materials of 7th St. Petersburg international conference on integrated Navigation Systems]. Moscow, 2000, pp. 97-99.
17. Shaposhnikov A.M. *Issledovanie inklinometricheskikh preobrazovateley s trekhkomponentnymi magnitometrami v programmno upravlyaemykh magnitnykh polyakh. Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Investigation of inclinometric transformers with ternary

magnetometers in programmatically guided magnetic fields. D-r Philosophy (technical sci.) published dissertation summary]. Ufa, 2011, 16 p.

18. Shervashidze V.V., Shklyar V.P., Karmazenko V.V., Makarchuk V.F., Leonenko S.N. *Avtonomnyy besplatformennyy giroskopicheskiy inklinometricheskii kompleks IGMN-73-120/100* [Autonomous strapdown gyroscopic inclinometric complex IGMN-73-120/100]. *Karotazhnik* [Logger], 2005, no. 3-4, pp. 176-186.
19. CRS05 Angular Rate Sensor. Available at: <http://www.willow.co.uk/CRS05.pdf>
20. Stockholm Precision Tools AB. Available at: <http://www.stockholmprecisiontools.com/ru/>
21. SureShot™ Measurement-While-Drilling (MWD) System. Available at: <http://www.aps-tech.com/products/mwd-lwd/sureshot-mwd-system.php>

*Поступила в редакцию 17.10.2013 г.
Received 17/10/2013*