

Я. И. БИНДЕР, А. Е. ЕЛИСЕЕНКОВ, А. С. ЛЫСЕНКО, В. Г. РОЗЕНЦВЕЙН,
В. М. ДЕНИСОВ, Д. А. СОКОЛОВ

МОБИЛЬНАЯ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ НА ОСНОВЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ СЪЕМКИ ТРАЕКТОРИЙ СТВОЛОВ ГРУППЫ СКВАЖИН ПОДЗЕМНОЙ ВЫРАБОТКИ

Исследуется и предлагается ряд технических решений для реализации в составе мобильной инклинометрической станции принципиально нового скважинного прибора, не содержащего гироскоп навигационного класса. Выбор инерциальных MEMS чувствительных элементов осуществляется на основании сравнительного анализа их инструментальных погрешностей, методических ошибок гироскопического алгоритма и требуемых точностных характеристик изделия. Предложена процедура начальной выставки гиросинклинометра в местной системе координат. Выработаны критерии выбора базовых скважин, определяющих местную систему координат, исходя из минимизации ошибок привязки устьев скважин. Приведены результаты стендовых испытаний станции, а также сравнительная оценка результатов измерений траектории с использованием микромеханического гироскопа ADXRS150 фирмы Analog Devices и гироскопа «Эптрон» разработки ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Введение

Использование взрывных методов разрушения пород увеличило возможности горного производства в тысячи раз. Процесс дробления горной породы зависит от большого количества факторов, связанных как со свойствами источника разрушающей энергии и самой разрушаемой среды, так и с геометрией расположения зарядов во взрываемом массиве [1].

Ключевым фактором, определяющим производительность труда горняков и его безопасность, является правильный выбор места закладки зарядов, который требует точного знания взаимного расположения траекторий стволов взрывных скважин для обеспечения дробления породы до необходимых размеров [2]. Ре-

Биндер Яков Исаакович. Кандидат технических наук, главный конструктор по направлению - начальник Центра телеметрических систем ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург). Действительный член Академии навигации и управления движением.

Елисеенков Александр Евгеньевич. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Лысенко Алексей Сергеевич. Аспирант ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Розенцвейн Владимир Георгиевич. Кандидат технических наук, начальник группы ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Денисов Виктор Маевич. Доктор технических наук, заместитель генерального директора ЗАО «СКБ ПН» (С.-Петербург).

Соколов Дмитрий Александрович. Научный сотрудник ЗАО «СКБ ПН».

шить эту задачу напрямую с помощью имеющейся аппаратуры до последнего времени не удавалось ни в России, ни за рубежом. Это обусловлено рядом причин:

- близостью траекторий взрывных скважин к вертикали (до 3°);
- необходимостью обеспечения высокой производительности съемки траекторий группы близко расположенных скважин (не менее 20 скважин в смену) и их взаимной геодезической привязки;
- массогабаритными ограничениями аппаратуры, определяемыми удаленностью до 3000 м горных выработок от вертикальных штреков, отсутствием возможности транспортной доставки аппаратуры и ограниченным пространством места проведения работ;
- необходимостью обеспечения минимального воздействия магнитных полей на аппаратуру, а также автономности аппаратуры из-за отсутствия электропитания в большинстве горных выработок.

Для решения вышеизложенной задачи ранее использовался инклинометр ИЭМ-Ш (шахтный), который предназначался для многоточечных измерений зенитного угла и магнитного азимута скважин, бурящихся в подземных горных выработках в условиях немагнитной окружающей среды. Использование такого прибора при разработке полиметаллических руд невозможно [2].

В 2010–2011 годах ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» совместно с ОАО «Электромеханика» создали и внедрили в отрасль добычи твердых полезных ископаемых мобильную инклинометрическую станцию МИС-42.80, предназначенную для высокопроизводительной траекторной съемки группы скважин [2].

Эксплуатация станции МИС-42.80 в шахте рудника им. Губкина Коробковского месторождения Курской магнитной аномалии в Белгородской области подтвердила ее работоспособность и заявленные точностные характеристики, в том числе с использованием микромеханического гироскопа, полученные за счет использования особенностей условий подземной выработки [2, 3].

Дальнейший анализ показал, что для траекторной съемки стволов скважин с заданной точностью в гироазимутальном режиме допустимо использовать только микромеханические чувствительные элементы, первоначально заложенные в конструкцию в качестве резервных. При этом если начальную выставку гироинклинометра проводить в местной системе координат, то можно полностью отказаться от гироскопа навигационного класса.

Такой подход и соответствующие изменения конструкции скважинного прибора (СП), а также алгоритмов и методик работы позволил поднять производительность станции за счет сокращения времени начальной выставки, составляющего треть временных затрат на проведение инклинометрической съемки скважины, увеличения скорости спускоподъемных операций, исключения операции привязки местной системы координат к географической и минимизации времени готовности станции. Использование в составе СП только микромеханических чувствительных элементов, в частности микромеханического гироскопа «Эптрон» разработки ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», позволило существенным образом повысить его надежность и уменьшить энергопотребление, что в свою очередь привело к уменьшению массогабаритных характеристик станции.

Рассмотрению всех этих, а также некоторых сопутствующих вопросов и посвящена данная статья.

Предлагаемые решения задачи

В состав мобильной инклинометрической станции модернизированной (МИСМ-42.80) вошло следующее оборудование (рис. 1): автономный скважинный прибор (СП) с центраторами, персональный компьютер (ПК), спускоподъемное устройство с датчиком глубины, интерфейсная плата для связи СП с ПК, устройство для геодезической привязки устьев скважин.

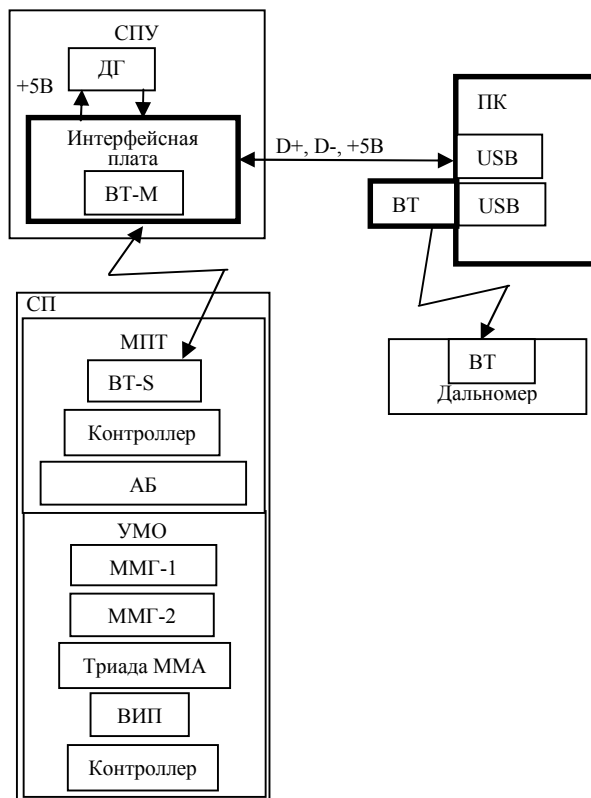


Рис. 1. Структурная схема МИСМ-42.80:

СП – скважинный прибор; МПТ – модуль питания и телеметрии; BT-S – Bluetooth slave; АБ – аккумуляторная батарея; УМО – упрощенный модуль ориентации; ММГ-1 – микромеханический гироскоп Analog Device; ММГ-2 – микромеханический гироскоп «Эптрон»; ММА – микромеханический акселерометр; ВИП – вторичный источник питания; СПУ – спускоподъемное устройство; ДГ – датчик глубины; BT-M – Bluetooth master; ПК – персональный компьютер; USB – универсальная последовательная шина; BT – Bluetooth; D+ и D- – данные

С одной стороны, разработка МИСМ-42.80 базировалась на алгоритмических, программных, схемно-конструктивных решениях, принятых в станции МИС-42.80, с другой – последние претерпели значительные изменения, связанные с отказом от гироскопического чувствительного элемента навигационного класса и с переходом на работу в местной системе координат, а также с приобретенным опытом работы в шахтах.

Кроме того, переход только на микромеханические чувствительные элементы внес определенные ограничения на параметры скважин и траектории, которых должны быть сняты с заданной точностью.

Алгоритм расчета траектории и ориентации скважин, применяемый в МИСМ-42.80, представлен уравнениями (1)–(3).

$$\Psi = \int [\omega_z - \dot{\mu} \sin v - \Omega_3 (\sin \varphi \cos \mu \cos v - \cos \varphi \cos \gamma \sin \mu \cos v + \cos \varphi \sin \gamma \sin v)] dt ; (1)$$

$$\begin{cases} \sin \mu = n_x \sin \psi + n_y \cos \psi, \\ \sin v = \frac{n_y \sin \psi - n_x \cos \psi}{\sqrt{1 - \sin^2 \mu}}, \\ \cos v = \sqrt{1 - \sin^2 v}; \end{cases} (2)$$

$$\begin{cases} X_M = \int \sin v dL, \\ Y_M = -\int \cos v \sin \mu dL, \\ Z_M = \int \cos v \cos \mu dL. \end{cases} (3)$$

Для описания ориентации стволов скважин, близких к вертикали, использовались угловые параметры μ , v , задающие положение оси Z СП относительно вертикали, угол поворота ψ корпуса СП относительно плоскости $OY_M Z_M$, развернутой в горизонте относительно меридиана на угол γ (рис. 2).

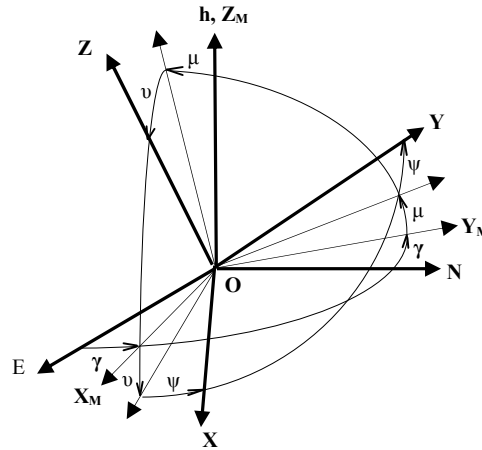


Рис. 2. Параметры ориентации стволов скважин

В этом алгоритме используются измерения ω_z и n_x , n_y – ускорения СП, полученные по данным акселерометров. Применение алгоритма базируется на том, что параметры большинства взрывных скважин таковы, что угол разворота СП относительно его продольной оси вычисляется интегрированием ω_z . Тогда искомые параметры ориентации могут быть вычислены простым перепроектированием относительных показаний акселерометров n_x и n_y на соответствующие плоскости. Принципиальным является то, что в данном алгоритме не используются показания гироскопического ЧЭ навигационного класса.

Рассмотрим в уравнении (1) алгоритма расчета траектории и ориентации скважины члены: $\dot{\mu} \sin v$ и $\Omega_3 \cos \varphi (-\cos \gamma \sin \mu \cos v + \sin \gamma \sin v)$, где Ω_3 – угловая скорость вращения Земли. Первый член определяется угловой скоростью СП $\dot{\mu}$, которую определить с имеющейся структурой микромеханических чув-

ствительных элементов практически невозможно. Второй член представляет собой проекцию горизонтальной составляющей угловой скорости вращения Земли на продольную ось скважинного прибора и в силу неопределенности γ – угла разворота в плоскости горизонта местной системы координат относительно географической – из-за отсутствия в составе СП гироскопического чувствительного элемента навигационного класса также не определяется. Рассмотрим их вклад в определение угла разворота СП ψ относительно продольной оси. При скорости движения СП 0,3 м/с (такая скорость используется при работе МИС-42.80), учитывая, что интенсивность искривления скважины не превышает 0,3°/м, получим $\dot{\mu} = 0,09$ град/с, а при максимальной скорости 1 м/с $\dot{\mu} = 0,3$ град/с. Поскольку скорость ухода микромеханического гироскопа фирмы Analog Devices составляет $\delta\omega_z = 0,05^\circ/\text{с}$, то при работе в скважинах с углом наклона до 9° членом $\dot{\mu} \sin v$ (по сравнению с $\delta\omega_z$) можно пренебречь. Значение второго члена в любых скважинах, на любой широте как минимум на порядок меньше скорости ухода микромеханического гироскопа.

Таким образом, уравнение (1) алгоритма расчета траектории и ориентации скважин может быть записано в следующем виде:

$$\psi = \int (\omega_z - \Omega_3 \sin \varphi \cos \mu \cos v) dt \quad (4)$$

или

$$\psi = \int \omega_z dt, \quad (5)$$

поскольку членом $\Omega_3 \sin \varphi \cos \mu \cos v$ также можно пренебречь.

Структура изложенного алгоритма представлена на рис. 3.

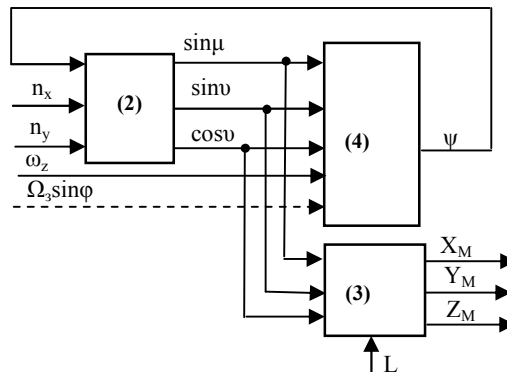


Рис. 3. Структура алгоритма расчета траектории и ориентации скважины

Рассмотрим ограничения, налагаемые на параметры скважины, при использовании в качестве чувствительного элемента СП микромеханического гироскопа. Ошибка определения координат траектории скважины δR в плоскости горизонта определяется следующим образом:

$$\delta R = \frac{L \cos v \delta \psi}{\cos \mu} \sqrt{\sin^2 \mu + \sin^2 v \cos^2 \mu}. \quad (6)$$

Если принять, что СП имеет одинаковый наклон, относительно вертикали в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, т.е. $\mu = v$, то

$$\mu = \arcsin \sqrt{1 - \sqrt{1 - \frac{\delta R^2}{L^2(\delta\omega_z)^2 t^2}}} . \quad (7)$$

На рис. 4 представлена зависимость допустимого угла наклона скважины μ для разных времен ее съемки от скорости ухода микромеханического гироскопа при условии обеспечения точности съемки 0,4% от длины скважины L .

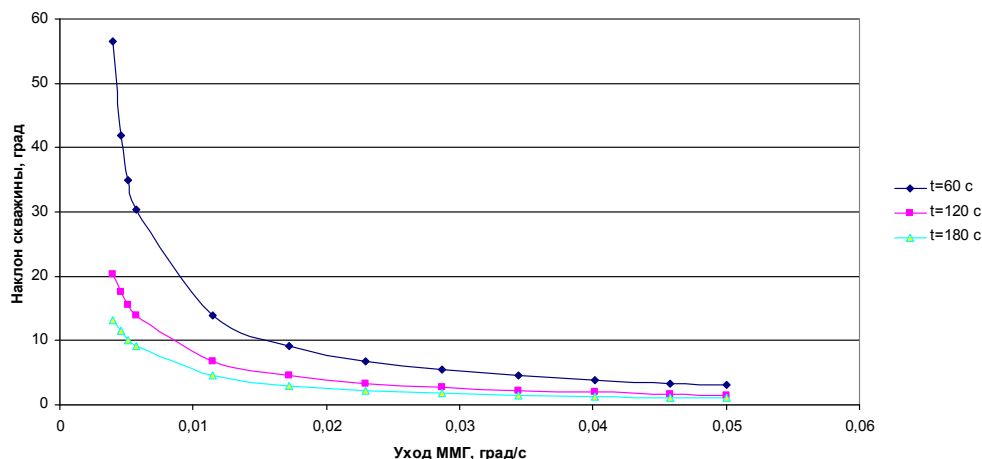


Рис. 4. Зависимость допустимого угла наклона скважины от скорости ухода ММГ

Видно, что наклон скважины при использовании ММГ фирмы Analog Devices не должен превышать 3° , а при использовании ММГ «Эптрон» ($\delta\omega_z=0,016^\circ/\text{с}$) – 9° , при этом время съемки должно быть не более 60 с. При увеличении времени съемки допустимый угол наклона скважины уменьшается.

В процессе работы над МИС-42.80 были проведены экспериментальные исследования динамики движения СП. Выявлено, что при скорости движения СП 0,3-0,4 м/с превышения допустимого динамического диапазона гироскопического ЧЭ навигационного класса составляли 30-40% от общего количества замеров, в то время как превышений динамического диапазона ММГ не наблюдалось [2].

Таким образом, с исключением из состава СП гироскопа навигационного класса возникает возможность значительного увеличения скорости спускоподъемных операций, которую нельзя достигнуть из-за ограниченного динамического диапазона работы гироскопического ЧЭ. Однако для данных условий работы повышение скорости движения СП более 1 м/с недопустимо из-за увеличения требуемой мощности лебедки и, следовательно, увеличения веса ее аккумуляторных батарей.

Определим ограничения по глубине исследуемых скважин, обусловленные заданной точностью траекторной съемки. Очевидно, что глубина скважин при заданной точности съемки зависит от наклона скважины, скорости ухода ММГ и скорости движения СП. Как показано на рис. 4, при наклоне скважины до 3° , $\delta\omega_z=0,05$ град/с и скорости спуска СП 1 м/с глубина может составить 60 м, при наклоне 1° – до 180 м.

Определим требуемую точность акселерометрических чувствительных элементов для работы по предложенному алгоритму в скважинах, близких к вертикали, исходя из требуемой точности съемки траектории. Варьируя уравнения (2) и (3) и принимая, что $\delta n_x = \delta n_y = \delta n$, можно получить следующую оценку:

$$\delta n = \frac{\delta R \cos v \cos^2 \mu}{L \sqrt{\cos^2 \mu \cos^2 v (\cos^2 \mu + \cos^2 v) + \sin^2 v \sin^2 \mu}}. \quad (8)$$

Из выражения (8) следует, что для работы в скважинах, близких к вертикали ($\mu < 15^\circ$ и $v < 15^\circ$), и обеспечения заданной точности съемки $(\delta R/L) = 0,004$ необходимы акселерометры с погрешностью, не превышающей 9 угл. мин.

Так как станция МИСМ-42.80 предназначена для съемки траекторий группы скважин, в ее составе осталось устройство геодезической привязки устьев скважин станции МИС-42.80 [2]. При этом потребовалось изменение ПО в связи с проведением съемки в местной системе координат и возможностью повышения точности взаимной привязки (а значит, и съемки траекторий) устьев скважин. Повышение точности определения координат устьев скважин может быть достигнуто правильным выбором базовых скважин, задающих направление OX местной системы координат. Можно показать, что точность определения координат устьев скважин зависит от расстояния между двумя базовыми скважинами и расположения других устьев скважин относительно направления OX .

Координаты устьев скважин определяются методом трилатерации [4]. Для этого выбираются две базовые скважины А и В (рис. 5) и определяются расстояния от них до каждой скважины.

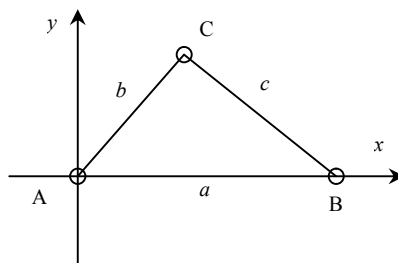


Рис. 5. Метод трилатерации:

А, В – первая и вторая базовые скважины; С – скважина, координаты которой необходимо определить; a, b, c – измеряемые расстояния

Если считать, что погрешности измерений равны между собой $\Delta a = \Delta b = \Delta c = \delta$, то ошибки вычисления координат Δx , Δy и ошибка определения отстояния устья скважины Δ относительно начала координат могут быть записаны в виде:

$$\Delta x = \frac{\delta}{2a^2} \sqrt{(a^2 + b^2 + c^2)^2 + 4c^2(a^2 - b^2)}, \quad (9)$$

$$\Delta y = \frac{\delta}{2a^2} \sqrt{\frac{(a^4 - b^4 - c^4 + 2b^2c^2)^2 + 2a^2[b^2(a^2 - b^2 - c^2)^2 + c^2(a^2 + b^2 - c^2)^2]}{(a + b + c)(b + c - a)(a + c - b)(a + b - c)}}, \quad (10)$$

$$\Delta = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}. \quad (11)$$

Используя выражения (9)–(11), можно определить, в зависимости от расстояния между базовыми скважинами, области расположения устьев скважин, координаты которых определяются с точностью не хуже 0,05 м, при условии, что измерение расстояний между устьями произведено с точностью 0,01 м (рис. 6).

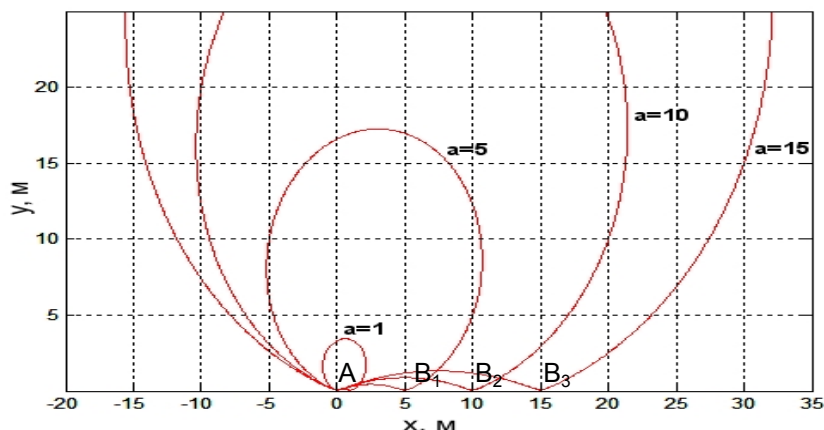


Рис. 6. Области расположения устьев скважин, определяемых с точностью 0,05 м, в зависимости от a – расстояния между базовыми скважинами

Видно, что чем больше расстояние между базовыми скважинами, тем шире область, внутри которой погрешность определения координат устья скважины остается в заданных пределах. Можно сформулировать основные рекомендации относительно выбора базовых скважин при проведении операции привязки по методу трилатерации:

- расстояние между базовыми скважинами должно быть не менее 1 м в зависимости от размеров выработки, в которой осуществляется съемка;
- базовые скважины должны выбираться таким образом, чтобы на линии OX не было других скважин; желательно, чтобы они располагались не менее чем в 0,5 м от оси OX .

Обычно при проведении работ по привязке скважин имеется приблизительный план их расположения. Поэтому следующим логичным шагом представляется реализация автоматизированной процедуры выбора оптимального расположения базовых скважин. Для этого приблизительный план скважин заносится в компьютер (возможен как графический ввод, так и ввод координат), а затем производится перебор всех возможных вариантов расположения базовых скважин. При этом для каждого варианта вычисляется погрешность в определении координат каждой скважины по выражениям (9)–(11) и формируется значение целевой функции. В результате выбираются базовые скважины, при которых значение целевой функции минимально. Можно предложить несколько вариантов формирования целевой функции. Самый простой вариант – средневзвешенное значение погрешности по всем скважинам. Недостаток данного варианта – возможность выбора базовых скважин, при котором погрешность привязки некоторых скважин больше заданной при допустимом среднем значении. В данном случае можно наложить дополнительное условие – допустимый уровень погрешности для одной скважины.

В качестве целевой функции также можно принять максимальную погрешность вычисления координат одной скважины для каждого варианта расположения базовых скважин. Возможны вычисление нескольких целевых функций и выбор по их комплексному анализу.

Построение СП только на микромеханических чувствительных элементах, позволяет получить ряд преимуществ, которые существенным образом скажут-

ся на потребительской ценности станции. Главное преимущество – значительное увеличение производительности съемки, что очень важно для работы в удаленных выработках шахт, так как значительное время тратится на доставку оборудования и персонала на место работы, за счет чего уменьшается время непосредственно съемки (в среднем до 4 ч). Увеличение производительности достигается за счет значительного сокращения времени подготовительных работ, включающих в себя выход на заданный тепловой режим, определение поправки на угол установки зеркала, закрепленного на СП, и определение ориентации местной системы координат относительно географической. Кроме того, с новым СП уменьшается время его начальной выставки на каждом устье скважины, и за счет использования микромеханических ЧЭ с большим динамическим диапазоном возможно увеличение скорости спуска и подъема СП. В табл. 1 представлены временные затраты для станций МИС-42.80 и МИСМ-42.80 на проводимые операции при съемке траекторий 20 скважин.

Таблица 1

Производительность съемки траекторий 20 скважин

Операция	Временные затраты, мин	
	МИС-42.80	МИСМ-42.80
Выход на тепловой режим	15	3
Определение поправки	5	5
Привязка систем координат	10	0
Установка СП на устье скважины	3×20	3×20
Начальная выставка	6×20	2×20
Спуск СП (60 м)	3,4×20	2×20
Подъем СП (60 м)	3,4×20	2×20
Итого:	346	188

Мобильная инклинометрическая станция МИСМ-42.80 прошла многократные стендовые испытания, в которых отрабатывалась методика съемки траекторий скважин и проводились сравнительные испытания двух микромеханических гироскопических чувствительных элементов, установленных в СП с одинаковой ориентацией осей чувствительности: ММГ ADXRS150 производства фирмы Analog Devices и «Эптрон» разработки ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон»». СП устанавливался на специальный стенд, производилась его привязка к местной системе координат, ориентированной в стендовом зале производственным образом, задавался наклон прибора на зенитные углы от 0,5 до 2°, запускался режим съемки. Испытания проводились как при неподвижном приборе, так и при вращении вокруг продольной оси, имитирующем движение прибора по скважине. Фрагменты результатов испытаний приведены на рис. 7-9.

Из рис. 7 и 8 видно, что уход угла поворота корпуса СП, определяемый с помощью ММГ ADXRS150 за 360 с съемки, составил 5°, в то время как ММГ «Эптрон» дал уход в пределах 0,5°, аналогичный уход наблюдается и на фрагментах съемки при вращении корпуса вокруг продольной оси. Величина такого ухода в соответствии с выражением (6) соответствует определению координат забоя по данным ММГ ADXRS150 с погрешностью 4,5 см, по данным ММГ «Эптрон» – 0,5 см.

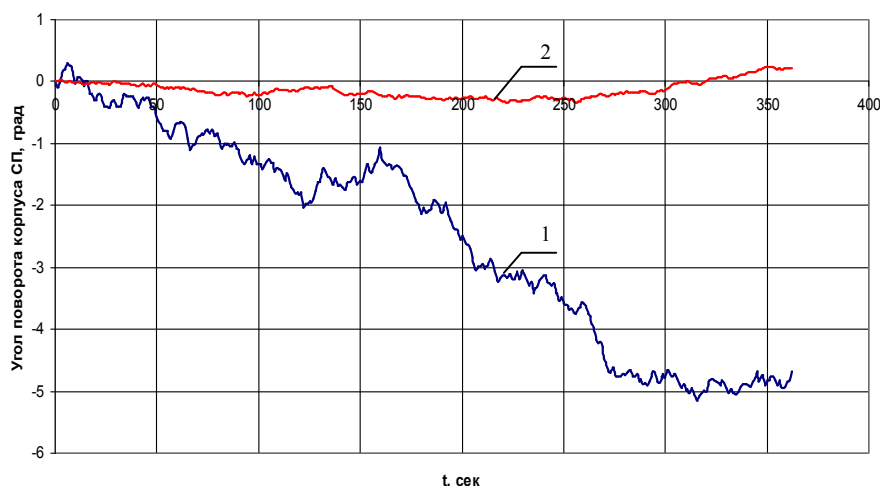


Рис. 7. Уход угла поворота неподвижного корпуса СП, наклоненного от вертикали на 1° , за время съемки: 1 – ММГ ADXRS150; 2 – ММГ «Эптрон»

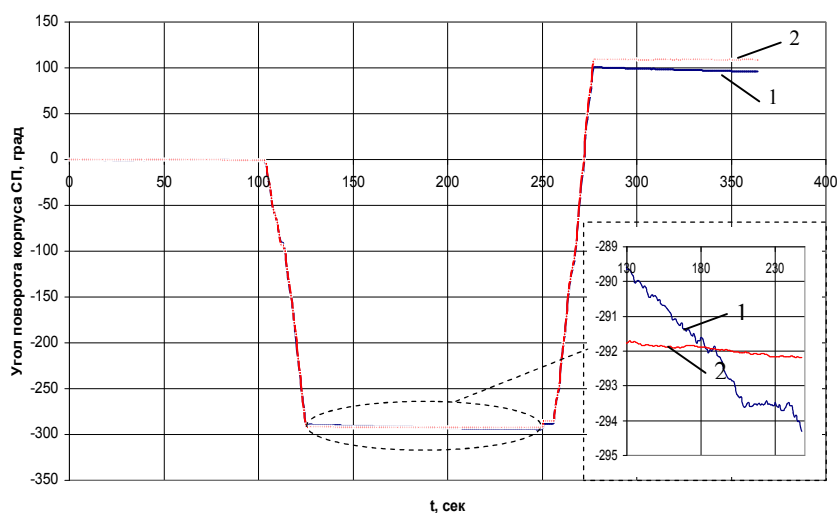


Рис. 8. Уход угла поворота корпуса СП, наклоненного от вертикали на 1° , за время съемки, при вращении СП вокруг продольной оси:
1 – ММГ ADXRS150; 2 – ММГ «Эптрон»

На рис. 9 представлены проекции траекторий имитируемых скважин на плоскость горизонта, определенные с использованием разных ММГ. «Скважины» 1, 2, 4, 5 направлены в сторону «скважины» 3, «скважина» 3 направлена в сторону «скважины» 1. Отклонения измеренных траекторий «скважин» от заданного направления представлены в табл. 2.

Из рис. 9 и табл. 2 видно, что погрешность выработки координат забоя «скважин» растет с увеличением зенитного угла. Применение ММГ «Эптрон» позволяет снизить погрешность выработки координат забоя в среднем в 3,5 раза по сравнению с ММГ ADXRS150. С ростом зенитного угла эффективность применения ММГ «Эптрон» увеличивается.

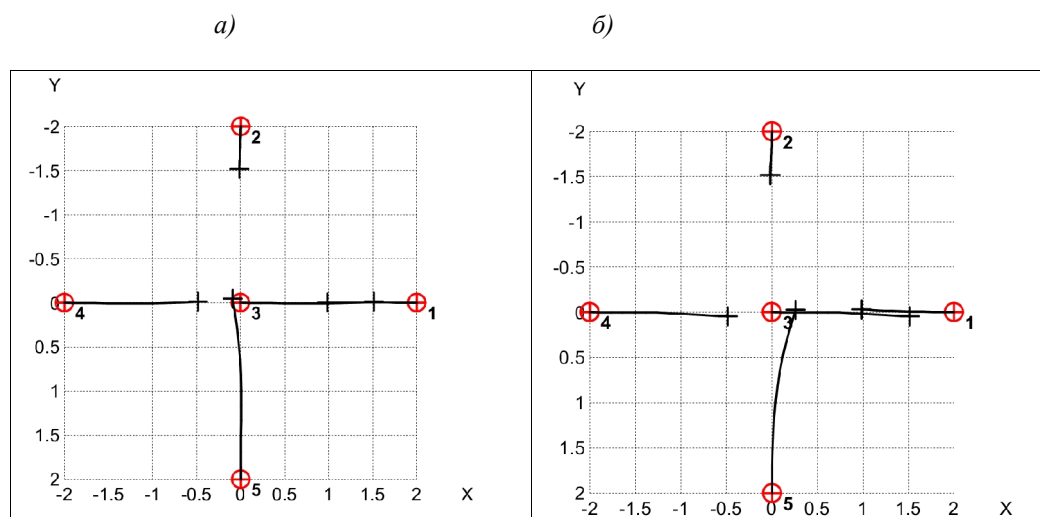


Рис. 9. Проекция траекторий скважин, определенные с использованием ММГ «Эптрон» (а) и ADXRS 150 (б):
+ – забой; ⊕ – устье

Т а б л и ц а 2

Отклонения траекторий «скважин»

«Скважина»	Зенитный угол, °	Δ, см	
		ADXRS150	«Эптрон»
1	1,0	3	1
2	0,5	2	2
3	1,5	5	1
4	1,5	5	1
5	2,0	26	9

Заключение

1. Создан скважинный прибор на базе микромеханических чувствительных элементов для непрерывной съемки траекторий скважин, близких к вертикали.
2. СП на базе микромеханических ЧЭ, по отношению к СП с гироскопическим ЧЭ навигационного класса, позволил почти вдвое поднять производительность мобильной инклинометрической станции (см. табл. 1), уменьшить энергопотребление станции и увеличить ее надежность.
3. Получена зависимость параметров исследуемых скважин (глубины и отклонения от вертикали) от скорости ухода ММГ при заданной точности съемки траекторий с учетом скорости спускоподъемных операций (7).
4. Показана область применимости СП с ММГ «Эптрон» разработки ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»: допустимая глубина скважины до 60 м при наклоне до 9° и до 180 м при наклоне до 3°.
5. Получена зависимость требуемой точности ММА от угла наклона исследуемых скважин и заданной точности съемки ее траектории (8).
6. Выработаны рекомендации по выбору базовых скважин, определяющих местную систему координат, в целях повышения точности определения координат устьев группы исследуемых скважин.

7. Проведены стендовые испытания СП на микромеханических ЧЭ, которые подтвердили его работоспособность и показали преимущества ММГ «Эптрон» относительно ММГ ADXRS150 в составе разработанного СП.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Таранов, П.Я.** Разрушение горных пород взрывом /П.Я.Таранов, А.Г.Гудзь. - М.: Недра, 2003.
2. **Мобильная** инклинометрическая станция для непрерывной съемки и совместной привязки траекторий стволов группы скважин подземной выработки Я.И.Биндер [и др.] // Гироскопия и навигация. - 2011. - № 2. – С. 27-38.
3. **Создание** и первые результаты освоения мобильной инклинометрической станции для промеров взрывных скважин / М.Ф.Мюнх [и др.]. //Горный журнал. - 2011. - № 10.
4. **Киселев, М.И.** Геодезия / М.И. Киселев, Д.Ш. Михелев. - М.: Издательский центр «Академия», 2009. - 384с.

Abstract. The paper proposes and analyzes the technical solutions developed for a principally new downhole tool not containing navigation grade gyros to be used within a mobile inclinometric station. MEMS inertial sensors are selected using comparative analysis of their instrumental errors, methodical errors of the proposed gyroscopic algorithm, and desired accuracies. The key advantage of a new downhole tool is that gyroinclinometer needs no initial alignment by gyrocompassing. The procedure of gyroinclinometer initial alignment in local frame is proposed. Criteria to select the reference frame are elaborated by minimizing the errors of relative positioning of well tops. Results from the station bed tests are presented. Wellbore trajectory measurements using ADXRS150 MEMS gyros by Analog Devices and Eptron gyros by Elektropribor are comparatively estimated.

Key words: geodetic relative positioning, underground mine, inclinometric station, wellbore, MEMS gyro, MEMS accelerometer