

УДК 531.746

**МОБИЛЬНАЯ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ  
ДЛЯ ОПЕРАТИВНОЙ ПРИВЯЗКИ ВЗАИМНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ГРУППЫ  
ВЗРЫВНЫХ СКВАЖИН ПОДЗЕМНОЙ ВЫРАБОТКИ****Я.И. Биндер, В.М. Денисов, А.Е. Елисеенков, В.Г. Розенцвейн**

Рассматривается структура мобильной инклинометрической станции, выполняющей непрерывную инклинометрическую съемку взаимного положения траекторий стволов группы скважин подземной выработки, и ее алгоритмическое и программное обеспечение. Приводятся и анализируются новые технические решения, полученные при создании станции. Приводятся результаты испытаний станции в условиях рудных выработок.

**Ключевые слова:** геодезическая привязка, подземная выработка, инклинометрическая станция, траектория, скважина.

**Введение**

Разрушение пород с помощью энергии взрыва является универсальным и практически единственным высокоэффективным способом подготовки скальных горных пород к выемке. 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.

Ключевым фактором, определяющим производительность труда горняков и, что еще более важно, его безопасность, является правильный выбор места закладки зарядов. Эта операция требует точного знания взаимного расположения траекторий стволов взрывных скважин для обеспечения равномерного дробления породы до необходимой крупности кусков. В противном случае, в отсутствии информации о положении истинных траекторий этих скважин, придется проводить дополнительные буровзрывные работы в очень опасных условиях рудных завалов [1].

Следует отметить, что до последнего времени задача прецизионной и высокопроизводительной съемки взаимного положения стволов скважин, имеющих, как правило, длину, не превышающую 100 м и ориентацию, близкую к вертикальной, не находила достойного решения ни в России, ни за рубежом. Актуальность же задачи исчисляется, по крайней мере, уже двумя десятилетиями [2, 3]. Это обусловлено, в первую очередь, тем, что все инклинометры для непрерывной съемки, внедренные в эксплуатацию за последние пятнадцать лет в мире, принципиально не могут обеспечить необходимую производительность процесса съемки для большой группы близко расположенных скважин (современные требования – съемка не менее 20 скважин за смену). Связано это с тем, что либо необходимы значительные затраты времени на проведение начальной выставки – на каждой скважине 30–100 мин), либо схемно-конструкторское решение инклинометров не позволяет применить непрерывный режим для стволов с такой ориентацией, и возможно лишь проведение малопродуктивного точечного компасирования.

Кроме того, существуют и другие специфические требования при решении поставленной задачи. К ним относятся: обеспечение взаимной геодезической привязки измеренной траектории скважин; существенные массогабаритные ограничения аппаратуры станции, определяемые удаленностью горных выработок от вертикальных штреков до 3000 м, отсутствием возможности транспортной доставки аппаратуры и ограниченным пространством места проведения работ; инвариантность измерительной аппаратуры станции относительно воздействия магнитных полей; автономность станции, вызванная отсутствием стационарного электропитания в большинстве горных выработок.

Известно, что для решения вышеизложенной задачи использовался инклинометр ИЭМ-Ш (шахтный), который предназначался для многоточечных измерений зенитного угла и магнитного азимута буровых скважин диаметром 42 мм и более, бурящихся из подземных горных выработок в условиях немагнитной окружающей среды. Использование такого прибора при разработке полиметаллических руд невозможно.

Имеется на рынке и непрерывный гироинклинометр (ГИ) ИГН-100/80, но его массогабаритные характеристики (вес 30 кг, диаметр 73 мм и длина 2600 мм) затрудняют использование прибора, при этом данный инклинометр – низкопроизводительный при работе на коротких скважинах, учитывая требуемое время. Практически единственные зарубежные разработчики непрерывного ГИ малого диаметра (Sugodata, USA) применяют его только на участках ствола с зенитными углами  $\theta \geq 15^\circ$ , а на более близких к вертикали участках, куда укладываются практически все горные выработки, используют режим малопродуктивного точечного компасирования [4].

**Предлагаемые решения задачи**

Накопленный за последние два года опыт при создании и выведении на рынок всезенитного, непрерывного гироинклинометра УГИ-42.03 позволил специалистам ОАО «Электромеханика» совместно с разработчиками ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» успешно решить новую задачу – разработку мобильной инклинометрической станции (МИС) для высокопроизводительной оперативной привязки

группы скважин в подземных выработках при добыче железной руды. В состав МИС вошло следующее оборудование (рис. 1): автономный скважинный прибор (СП) с центраторами, наземный прибор (НП) со встроенным компьютером, спускоподъемное устройство с датчиком глубины, устройство для геодезической привязки устьев скважин.

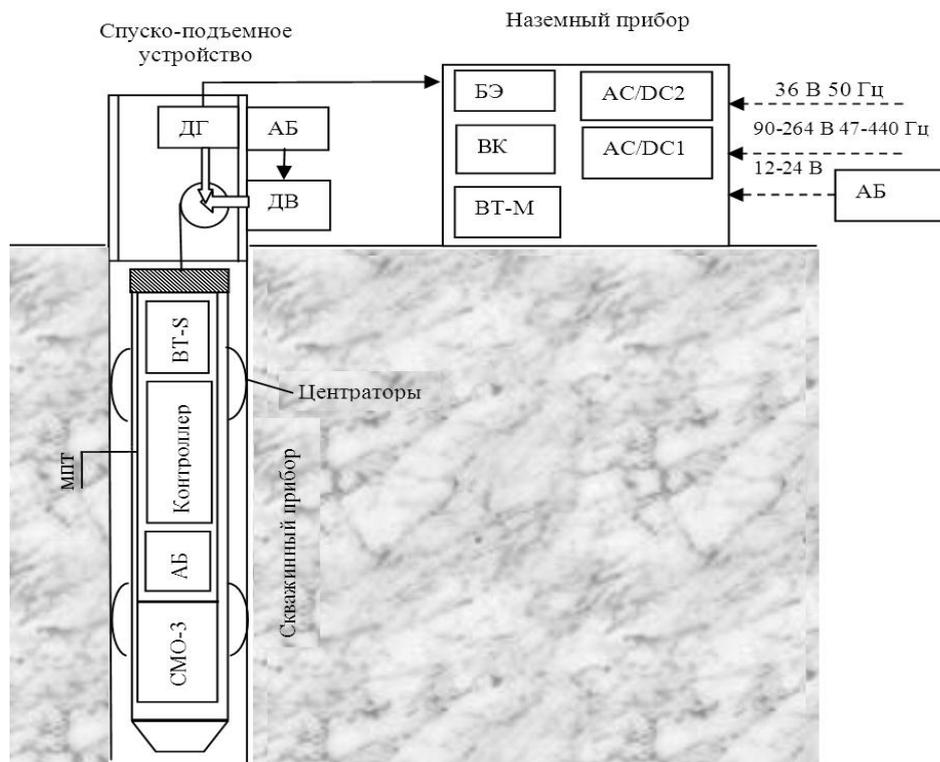


Рис. 1. Мобильная инклинометрическая станция:

АБ – аккумуляторная батарея; BT-M – Bluetooth master; BT-S – Bluetooth slave; БЭ – блок электроники; ДВ – двигатель; ДГ – датчик глубины; МПТ – модуль питания и телеметрии; ВК – встроенный компьютер; AC/DC – конвертор переменного напряжения в постоянное; СМО-3 – скважинный модуль ориентации

В ходе разработки МИС был предложен и успешно реализован целый комплекс новых алгоритмических, программных, схемно-конструктивных решений, среди которых:

- разработка автономного СП;
- использование беспроводного канала связи между СП и НП;
- создание малогабаритного спускоподъемного устройства с функциями каротажной лебедки, базирующейся на устье скважины;
- разработка единого программно-аппаратного комплекса, позволяющего оперативно обрабатывать данные непрерывных инклинометрических измерений и производить взаимную привязку группы скважин;
- разработка программного обеспечения (ПО), позволяющего анализировать проведенные измерения при спуске и подъеме СП, выбирать в зависимости от динамики прохождения ствола и характеристик скважины наиболее приемлемый алгоритм расчета ее траектории.

### Конструктивные решения

За основу МИС был взят скважинный модуль ориентации УГИ-42.03 [2]. Уменьшение массогабаритных характеристик СП произведено за счет разработки нового модуля связи – модуля питания и телеметрии, обеспечивающего обмен информацией между СП и НП (длина и вес СП УГИ-42.03 – 1900 мм и 9 кг соответственно, длина и вес СП МИС – 1690 мм и 6 кг). Отличительные особенности модуля питания и телеметрии – автономное питание и беспроводная связь с НП по каналу Bluetooth – позволили:

- исключить из состава МИС грузонесущий кабель, обладающий повышенными весовыми характеристиками, заменив его на фал, совмещающий в себе максимальные разрывные нагрузки, практически нулевое удлинение под нагрузкой и минимальные диаметр и вес;
- повысить технологичность съемки траекторий скважин, операций по их привязке и определению ориентации местной системы координат относительно географической;
- повысить надежность СП и спуско-подъемного устройства.

С целью уменьшения массо-габаритных характеристик МИС было разработано специальное спуско-подъемное устройство с датчиком глубины. Особенности такого устройства – базирование непосредственно на устье скважины, как показано на рис. 1, и автономное аккумуляторное питание с быстрозъемными батареями.

Принципиальной особенностью МИС является обеспечение съемки траекторий групп скважин, для чего в его состав введено устройство геодезической привязки устьев скважин и разработано специальное алгоритмическое и программное обеспечение, состоящее из трех программ, выполняющих различные функции, но идеологически связанных в единое целое. Это программы привязки скважин, работы с инклинометром и постобработки результатов измерений.

Привязка устьев скважин производится методом триангуляции [5]. Для этого выбираются две базовые скважины и производятся замеры расстояний между осями базовых и остальных скважин (рис. 2), физически реализуемых с помощью СП со светоотражающей пластиной и центрирующего устройства с дальномером. Информация о расстояниях между скважинами автоматически заносится по каналу Bluetooth в НП. По полученным измерениям определяются координаты всех скважин в прямоугольной системе координат, одна из осей которой направлена горизонтально между осями базовых скважин, другая вертикально вниз и строится план их расположения (рис. 2). Затем с помощью точечного измерения ГИ осуществляется привязка местной системы координат к географической.

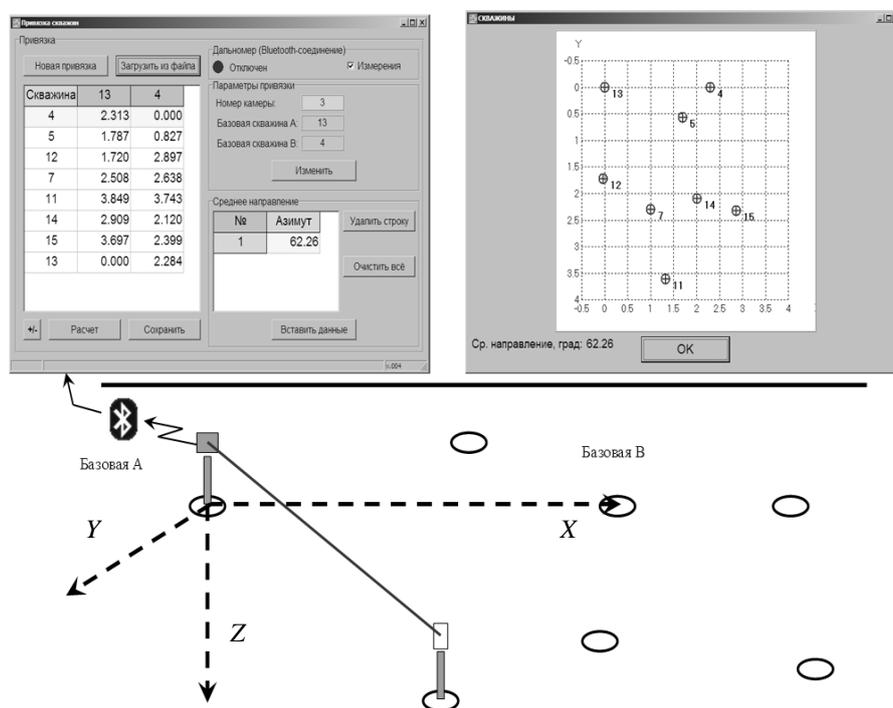


Рис. 2. Привязка устьев скважин

Управление работой ГИ осуществляется программой, позволяющей производить как точечные измерения, так и непрерывную съемку. При непрерывной съемке на устье скважины производится определение начальной ориентации СП по командам, поступающим с НП по каналу Bluetooth. При работе СП в скважине связь с прибором прерывается, и все измерения производятся автономно с записью во флэш-память. После возврата прибора на устье связь восстанавливается, и осуществляется операция завершения измерений и считывания записанных данных.

**Алгоритмическое обеспечение станции**

Для МИС разработаны алгоритмы и ПО, направленные на повышение точности и достоверности полученных результатов и решающие следующие задачи: контроль динамики движения СП; сведение траекторий при измерениях на спуске и подъеме; выбор алгоритма расчета траектории (рис. 3).

В СП установлены три типа чувствительных элементов (ЧЭ) – динамически настраиваемый гироскоп (ДНГ), микромеханический гироскоп и триада микромеханических акселерометров, что позволяет с учетом съемок траектории на спуске и подъеме комплексировать полученные измерения [2].

В процессе работы над МИС были проведены экспериментальные исследования по динамике движения СП. Выявлено значительное превышение допустимых динамических диапазонов ЧЭ, что привело к необходимости разработки специальных центраторов и определению оптимальной скорости дви-

жения прибора по стволу рудной скважины. Для дополнительного повышения достоверности и точности результатов измерений, осуществляется анализ динамики при каждом считывании данных, записанных во флэш-память прибора. Данный анализ позволяет отдать предпочтение тем или иным алгоритмам обработки полученных данных.

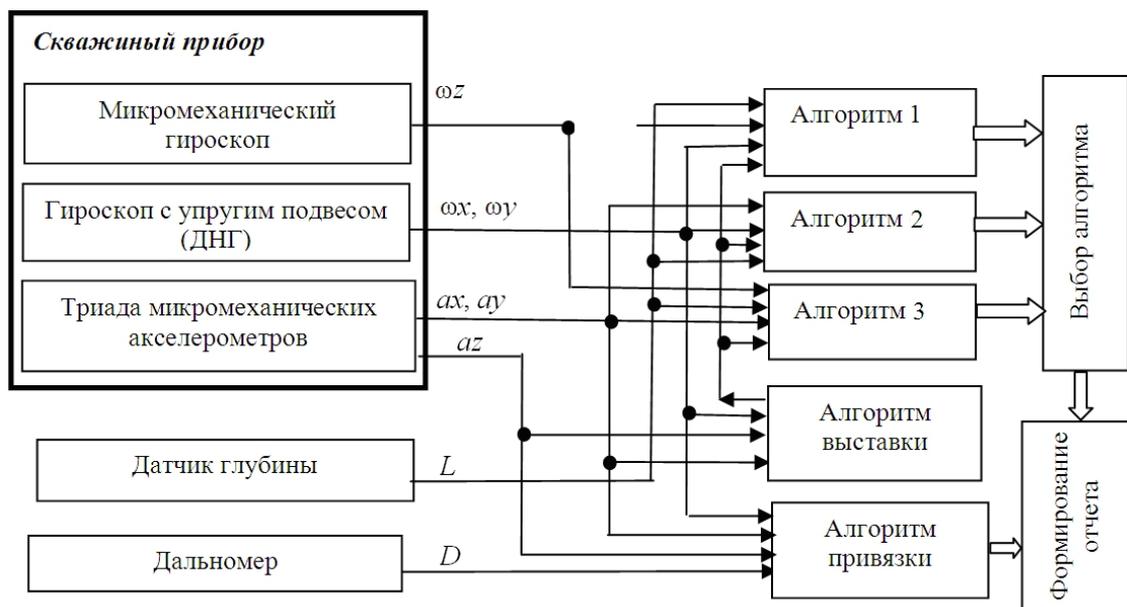


Рис. 3. Алгоритмическое обеспечение МИС

Так как при съемке во флэш-память СП записываются данные спуска и подъема, то при расчете по данным подъема уточняются данные на спуске, при этом учитывается, что ошибка определения координат ствола скважины, а также угла азимута, растет с течением времени.

Расчет траектории и ориентации скважины производится параллельно по трем алгоритмам [7]. В результате выбирается алгоритм, обеспечивающий минимальную невязку по координатам для прямого и обратного ходов. Для определения невязки вычисляется интегральный критерий, характеризующий степень различия траекторий на спуске и подъеме. На рис. 4 приведен пример зависимости одной из координат скважины от глубины на спуске и подъеме скважинного прибора.

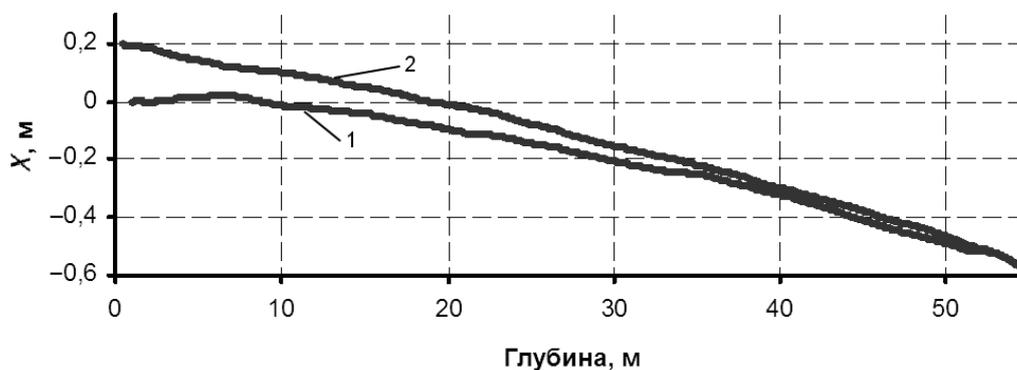


Рис. 4. Зависимость координаты X скважины от глубины на спуске (1) и подъеме (2)

**Алгоритм 1.** При его применении используются измерения угловых скоростей СП  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$  (рис. 3), на основании которых составляются уравнения, известные из теоретической механики, как уравнения Пуассона. Для получения углов ориентации производится интегрирование уравнений. Вследствие того, что значение  $\omega_z$ , получаемое от микромеханического гироскопа, имеет невысокую точность (существенно меньшую, чем точности  $\omega_x$  и  $\omega_y$ ) на устье и забое скважины проводится коррекция показаний гироскопа на 10 секундных остановках, аналогичная ZUPT-коррекции. Данный алгоритм используется на зенитных углах меньше  $1,2^\circ$ .

**Алгоритм 2.** При его применении используются измерения  $\omega_x$  и  $\omega_y$  (для определения азимута). При этом зенитный угол и угол отклонителя вычисляются по показаниям акселерометров  $a_x$  и  $a_y$  (рис. 3). Данный алгоритм используется на зенитных углах, превышающих  $1,2^\circ$ . Потенциально данный алгоритм является самым точным, поскольку расчет производится без использования неточного значения  $\omega_z$ .

Алгоритмы 1 и 2 применяются при условии отсутствия превышений динамического диапазона  $\omega_x$  и  $\omega_y$ .

**Алгоритм 3.** При его применении используются  $\omega_z$  и  $a_x$ ,  $a_y$  – ускорения СП, полученные по данным с акселерометров (рис. 3). Применение алгоритма базируется на том, что параметры большинства взрывных скважин таковы, что азимут угла отклонителя вычисляется интегрированием  $\omega_z$ . Тогда искомые параметры ориентации могут быть вычислены простым перепроектированием показаний акселерометров  $a_x$  и  $a_y$  на соответствующие плоскости. Принципиальным является то, что в данном алгоритме не используются показания гироскопа с упругим подвесом. Данный алгоритм имеет меньшую точность, чем два предыдущих, и используется в случае превышений динамического диапазона  $\omega_x$  и  $\omega_y$ , тем не менее, возможности третьего алгоритма удовлетворяют требуемой точности.

По результатам проведения съемки траекторий группы скважин и проведенной постобработки полученных данных для потребителя выдается отчет, содержащий информацию о времени и месте проведения съемки, о взаимном расположении устьев скважин, о координатах траекторий срезов скважин с заранее выбранным шагом. Приводятся проекции траекторий скважин на горизонтальную плоскость (рис. 5) и расстояния между забоями скважин. Кроме того, ПО постобработки измеренных данных позволяет построить различные варианты зависимостей тех или иных параметров скважин от времени, глубины и т.д.

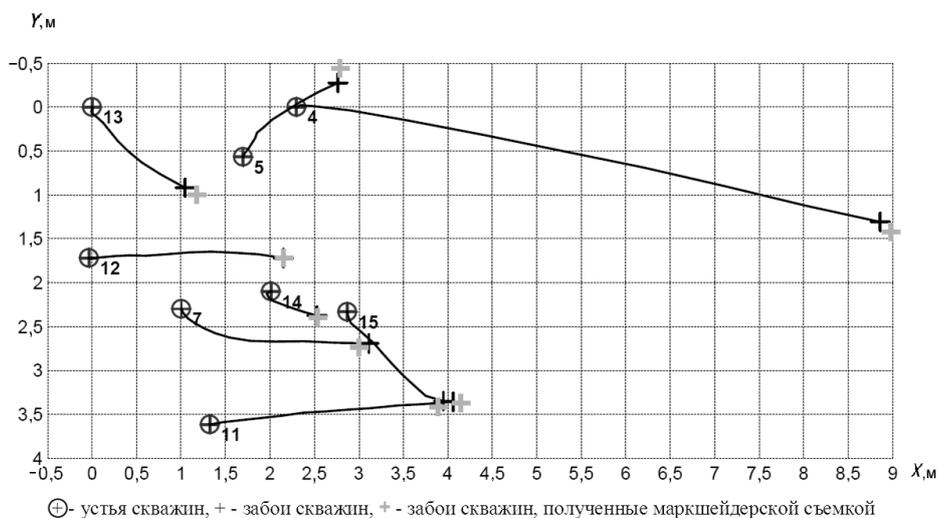


Рис. 5. Проекция траекторий скважин на горизонтальную плоскость

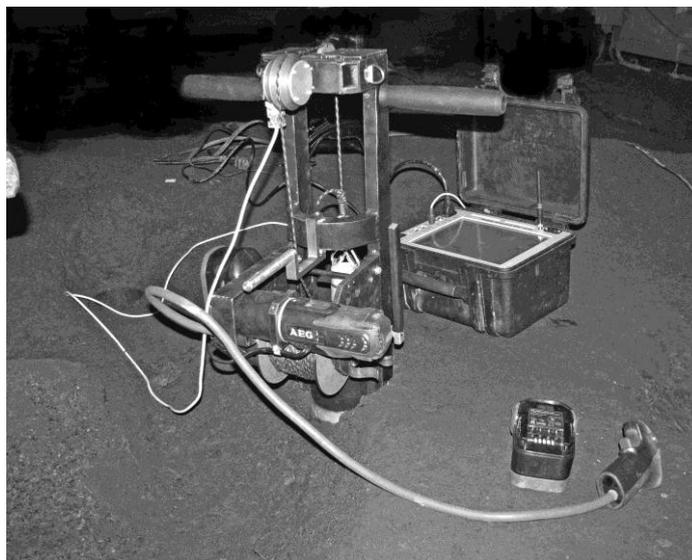


Рис. 6. Мобильная инклинометрическая станция в процессе работы

Мобильная инклинометрическая станция МИС-42.80 прошла многократные испытания в шахте рудника им. Губкина на Коробковском месторождении Курской магнитной аномалии в Белгородской области (рис. 6) и подтвердила не только свою работоспособность, но и заявленные точностные характеристики. Фрагменты результатов испытаний приведены на рис. 5 и в таблице. Измерения проводились на глубине 320 м на подрезанных на горизонте 370 м скважинах. Сравнительный анализ координат сква-

жин, полученных путем измерений и маркшейдерской съемки, показал максимальную невязку 17 см. Заявленная точность измерений 0,7% от глубины скважины (на 50 м – 35 см).

№ скважин	Координаты забоев скважин, м				Погрешности определения координат забоев, м	
	измеренные		контрольные		$\Delta X$	$\Delta Y$
	X	Y	X	Y		
4	8,86	1,31	9,00	1,43	-0,14	-0,12
5	2,76	-0,28	2,80	-0,45	-0,04	0,17
7	3,11	2,69	3,00	2,75	0,11	-0,06
11	4,06	3,36	4,15	3,35	-0,09	0,01
12	2,15	1,72	2,14	1,72	0,01	0,00
13	1,04	0,92	1,15	1,00	-0,11	-0,08
14	2,53	2,37	2,53	2,37	0,00	0,00
15	3,95	3,35	3,90	3,40	0,05	-0,05

Таблица. Результаты испытаний

Проведенный анализ результатов испытаний показал, что дальнейшее уменьшение массогабаритных характеристик и энергопотребления станции, повышение ее производительности и надежности возможно за счет упрощенной выставки СП перед измерениями и использования на коротких скважинах, близких к вертикали, информации только от микромеханических ЧЭ.

#### Заключение

1. Состоялось внедрение в область добычи твердых полезных ископаемых метода непрерывной гиринонклинометрической съемки.
2. Разработан программный комплекс, позволяющий рассматривать при измерениях совокупность отдельных скважин как единое целое, комплексировать информацию различных измерителей с целью выбора наилучшего алгоритма обработки, оперативно формировать отчет по результатам измерений.
3. Создана мобильная инклинометрическая станция, позволяющая осуществить высокопроизводительную траекторную съемку группы скважин, при этом особые условия работы во взрывных скважинах подземной выработки позволили достичь минимальных абсолютных значений погрешностей и времени замера.
4. Накопленный опыт работы с мобильной инклинометрической станцией в условиях подземной выработки позволил наметить дальнейшие пути ее модернизации, направленные на повышение производительности и технологичности при проведении траекторной съемки группы скважин.

#### Литература

1. Таранов П.Я., Гудзь А.Г. Разрушение горных пород взрывом. – М.: Недра, 2003. – 254 с.
2. Биндер Я.И., Падерина Т.В., Розенцвейн В.Г. Высокопроизводительная прецизионная инклинометрическая съемка скважин малого диаметра. Результаты практического внедрения // Гироскопия и навигация. – 2009. – № 1. – С. 52–62.
3. Фрейман Э.В., Кривошеев С.В., Лосев В.В. Особенности построения алгоритмов ориентации гироскопических инклинометров на базе одноосного гиросtabilизатора // Гироскопия и навигация. 2001. – № 1. – С. 36–47.
4. Биндер Я.И. Инклинометр непрерывного действия на основе бесплатформенного гироскопа направления. Ч. I // Изв. вузов. Приборостроение. – 2003. – № 12. – С. 49–53.
5. Киселев М.И., Михелев Д.Ш. Геодезия. – М.: Академия, 2009. – 384 с.
6. Лочехин А.В., Емельянцева Г.И. Начальная выставка и калибровка бескарданного гирогоризонткомпаса на электростатическом гироскопе и микромеханических датчиках // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 5. – С. 62–69.
7. Биндер Я.И., Падерина Т.В., Лысенко А.С., Федорович А.Н. Об использовании различных схем гиринонклинометров для непрерывной съемки скважин произвольной ориентации // Гироскопия и навигация. – 2010. – № 4. – С. 53–72.

- Биндер Яков Исаакович** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, vrozentsvein@eprib.ru
- Денисов Виктор Маевич** – ОАО «Электромеханика», доктор технических наук, доцент, зам. генерального директора, denvm@elmech.ru
- Елисеенков Александр Евгеньевич** – ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», кандидат технических наук, доцент, sasha0103@mail.ru
- Розенцвейн Владимир Георгиевич** – ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», кандидат технических наук, нач. группы, vrozentsvein@eprib.ru