

8. Проведение и крепление горных выработок/ В.В. Орлов, А.М. Янчур, Н.С. Бабичев, А.М. [и др.] – М.: Недра, 1965. – 496 с.

9. Тарасов Л.Я. Проведение и крепление горных выработок./ Л.Я. Тарасов. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1957. – 516 с.

10. Гиленко В.А., Федотов В.Н., Цветков В.К. Способы и средства возведения временной крепи в подземных горизонтальных выработках. – М., 1989. – 28 с.

Рукопис подано до редакції 16.04.2018

УДК 622.013:622.34

А. А. АЗАРЯН, д-р техн. наук, проф., В. Ю. ЗУБКЕВИЧ, канд. техн. наук,
ст. преподаватель, Д. В. ШВЕЦ, ассистент
Криворожский национальный университет

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОЙ РУДЫ

Цель. Разработка методов и средств снижения потери руд и засорения взорванной горной массы путем оперативного контроля положения наклонной скважины в массиве горных пород с использованием современных средств определения пространственной ориентации.

Метод. Предложена функциональная схема и принцип работы универсального комбинированного устройства - инклинометра в сочетании с каротажным зондом, что дает возможность оперативно получать и передавать содержание полезного компонента, в соответствии с положением и ориентацией зонда в скважине.

Научная новизна. Впервые предложено объединить в единую систему каротажный зонд и инклинометр, что позволяет создать объемную модель обрабатываемого массива горных пород, позволяющая минимизировать потери и засорение взорванной горной массы.

Практическая значимость. В разработанной системе реализованы функции контроля текущей ориентации инклинометра, контроля пройденного пути вдоль перемещения инклинометра, синхронного накопления данных, подачи аварийной сигнализации через канал связи, а также предложены функции магнитометрического, радиометрического контроля и визуализации положения скважины в массиве горных пород. Суммарная информация, получа-емая от инклинометров и каротажного зонда, позволяет разрабатывать трехмерные модели рудного массива, что дает возможность прогнозировать качественно-количественные параметры взорванной рудной массы и определить количество эксплуатационных скважин, отклоненных за контактную зону в область «пустых пород».

Результаты. Разработан универсальный модульный каротажный зонд наклонных скважин. Определена архитектура инклинометра, позволяющая получить необходимые основные данные по инклинометрии скважины и дополнительные каротажные данные скважины в зависимости от конкретной конфигурации инклинометра. Использование инклинометра данной конструкции позволит точно совмещать пространственные параметры наклонной скважины с ее техническими, физическими, минералогическими и химическими параметрами. Точное определение ориентации оси наклонной скважины в каждой точке пространства позволит оптимизировать процессы добычи полезных ископаемых в технологиях, использующих наклонные скважины для буровзрывных работ. Согласно прогнозным данным, использование разработанной системы, сочетающей методы каротажа скважин и инклинометрии, позволит снизить потери руд более, чем на 12 процентов, а засорение руд - на 9 процентов.

Ключевые слова: каротаж, инклинометр, скважина, железная руда, потери руд, засорение руд, оперативный контроль.

doi: 10.31721/2306-5451-2018-1-47-68-76

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Доля Украины в мировом производстве железной руды составляет около 6%. На территории Украины располагается 20% мировых запасов железной руды. По запасам железорудного сырья Украина занимает первое место в мире, а по объемам производства — седьмое.

Кривбасс является центром горнометаллургического комплекса Украины. Экономический потенциал нашего государства в значительной степени зависит от состояния горнометаллургической промышленности.

Годовой объем открытой и подземной добычи железорудного сырья в Кривбассе составляет более 60 млн тонн. Вместе с тем, высокие темпы развития промышленности требуют увеличения объемов добычи руд. Балансные запасы богатой руды Кривбасса со средней массовой долей железа 56,7% составляют 1,5 млрд тонн, а железистых кварцитов со средней массовой долей железа 34,3% - 18 млрд тонн.

Обеспечение металлургического производства сырьем с заданными показателями качества является актуальной проблемой.

Одной из важнейших характеристик качества добытой руды является содержание металла в горной массе. Диапазон допустимых значений содержания металла довольно широк, но чем больше содержание полезного компонента, тем выше экономическая эффективность металлургического передела. Так, например, повышение содержания металла в руде только на 1% увеличивает производительность доменного производства на 4...5%, снижает расход кокса на 1...3% и расход известняка на 6...8% [1].

В настоящее время при добыче железорудного сырья потери руд со средним содержанием железа до 57% составляют седьмую часть от общего объема, а засорение вмещающими породами с содержанием железа 37,5% составляет шестую часть от общего объема добычи руд.

Анализ исследований и публикаций. При контроле содержания железа в рудных массивах с применением каротажных зондов в скважинах в ряде случаев не уделяется должного внимания вопросам точности измерений [2]. Ядернофизические способы определения содержания полезного компонента в руде рассмотрены в работах [3, 4], где осуществлены попытки повышения точности измерений в зависимости от количества гамма-квантов, отражающихся от поверхности поглотителя. В труде [5] рассмотрены параметры сцинтилляционных датчиков для регистрации рассеянных гамма-квантов. Также в [6] разработана математическая модель определения содержания железа в руде посредством регистрации рассеянных гамма-квантов. В работе [7] предложен учет поглощенного гамма-излучения в облучаемой горной массе.

Помимо ядернофизических методов определения содержания железа известны магнитометрический [8-10] и ультразвуковой методы [11, 12]. Однако магнитометрический метод позволяет определять содержание только магнитного железа в исследуемой горной массе, а ультразвуковой контроль затруднительно использовать при каротаже взрывных скважин.

Опыт Запорожского железорудного комбината показал, что отработка месторождения с закладкой позволяет значительно снизить потери руд и засорение взорванной горной массы. Кроме того, исключаются провалы отработанных месторождений, что улучшает экологию и позволяет рекультивировать и восстановить плодородные земли.

В Кривбассе не используется система разработки месторождения с закладкой, следовательно, изменить установившуюся систему разработки месторождения является чрезвычайно трудоемкой и затратной процедурой.

Одним из основных источников потери руд и засорения взорванной горной массы является выпуск руды из дучек. Существует различные способы повышения эффективности процесса выпуска.

На стадии подготовительных работ для добычи руд потери и разубоживание составляют 3-5% [13]. Однако, после буровзрывных работ эти цифры увеличиваются в разы и составляют 13-25 процентов. Опыт работы показывает, что наиболее рациональными и эффективными методами снижения как потери руд, так и засорения взорванной горной массы пустыми породами, являются каротаж скважин и инклинометрия.

Постановка задания. Разработать методы снижения потерь руд и засорения взорванной горной массы на основе дистанционного измерения пространственного положения наклонной скважины с использованием современных средств определения пространственной ориентации.

Изложение материала и результаты. Существующие методы и способы снижения потери руд можно объединить в комплекс организационно-технических мероприятий, состоящий из:

- выбора системы отработки месторождения;
- буровзрывных работ;
- выпуска руды из дучек;
- каротажа взрывных скважин;
- инклинометрии.

Инклинометры по праву считаются основными средствами производства измерений в скважинах. Электронный инклинометр предназначен для контроля положения взрывных скважин в рудном массиве, что позволяет определять зенитный и азимутальные углы и оперативно контролировать положение скважины в массиве. Инклинометрия предотвращает переход скважин в контактную зону «руда-порода», что в конечном итоге снижает потери. При этом фикси-

руется искривление скважины, что по данным статистики составляет до 15% от глубины скважины.

Суммарная информация, получаемая от инклинометров и каротажного зонда, позволяет разрабатывать трехмерные модели рудного массива, что дает возможность прогнозировать качественно-количественные параметры взорванной рудной массы и определить количество эксплуатационных скважин, отклоненных за контактную зону в область «пустых пород». Кроме того, при большом расстоянии между скважинами, определяется необходимость бурения дополнительной скважины, для исключения потери руд и сверхнормативного выхода негабаритов.

Ниже приведены функциональная схема, алгоритм и принцип работы инклинометра в сочетании с каротажным зондом.

Основным достоинством такого совмещения является получение каротажных данных в соответствии с положением и ориентацией каротажного зонда в каждый момент времени.

В данном инклинометре предусматриваются следующие основные функции:

- задание начальных значений положения инклинометра;
- контроль текущей ориентации инклинометра;
- контроль пройденного пути вдоль перемещения инклинометра;
- синхронное накопление данных;
- канал связи для диагностики и аварийной сигнализации.

Дополнительные функции:

- магнитометрический контроль;
- радиометрический контроль;
- видеометрический контроль.

Дополнительные функции могут использоваться в зависимости от целей каротажа наклонных скважин.

Таким образом, инклинометр представляет собой универсальный модульный каротажный зонд наклонных скважин.

Функциональная схема универсального инклинометра представлена на рис. 1.

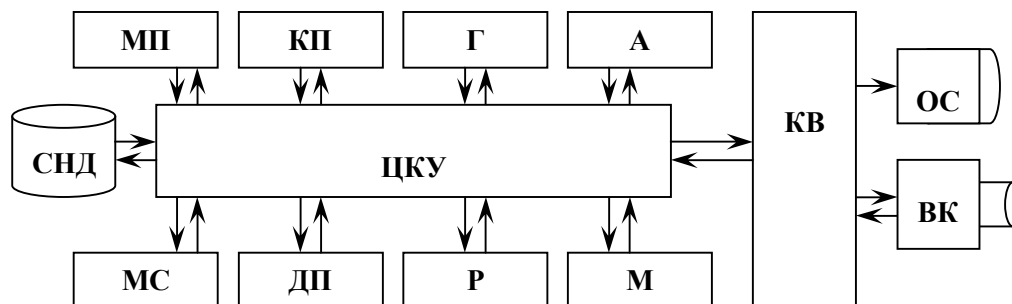


Рис 1. Функциональная схема универсального инклинометра

Модули основных функций универсального инклинометра: МП-модуль питания, КП - контроллер питания, Г - гироскоп, А – акселерометр, СНД - съемный накопитель данных, ЦКУ- центральный контроллер управления, МС - модуль связи для диагностики и аварийной сигнализации, ДП - датчик пути.

Модули дополнительных функций: Р – радиометр, М – магнитометр, КВ – контроллер видео канала, ОС – осветитель, ВК - видео камера.

Без дополнительных функций универсальный инклинометр выполняет только инклинометрию наклонных скважин, т.е. контроль пространственного положения оси скважины.

Порядок работы инклинометра заключается в следующем:

- определение и установка начальных значений;
- прямая инклинометрия наклонной скважины;
- обратная инклинометрия наклонной скважины (опционально);
- непрерывная диагностика и сигнализация состояния инклинометра;
- обработка накопленных данных.

При инклинометрии наклонной скважины используются две системы координат: неподвижная базисная система координат OZYX, которая должна быть привязана к некоторой известной начальной ориентации (например, к глобальной географической системе координат Земли

или к известной геодезической системе координат из проектной документации) и подвижная локальная система координат $Ozyx$, жестко связанная с универсальным каротажным зондом инклинометра.

Ориентацию инклинометра в пространстве скважины определяем изменением углов Эйлера аэрокосмической последовательности [14-16], а именно:

курс инклинометра (азимут скважины) – угол ϑ (вращение вокруг оси Oz локальной системы координат);

тангаж инклинометра (угол наклона скважины со знаком минус) – угол ψ (вращение вокруг оси Oy локальной системы координат);

крен инклинометра – угол φ (вращение вокруг оси Ox локальной системы координат, являющейся направлением перемещения инклинометра).

Для определения пространственной ориентации инклинометра вдоль оси скважины необходимо решить дифференциальное уравнение Пуассона [14, 15, 17] в кватернионном виде, которое будет иметь вид

$$P'(t) = \frac{1}{2} P(t) \otimes \bar{\omega}(t),$$

где $P'(t)$ - производная по времени кватерниона ориентации; $P(t)$ - кватернион ориентации; $\bar{\omega}(t)$ - вектор угловой скорости локальной системы координат.

Перед началом работы инклинометра необходимо задать начальные установки. Численное решение (интегрирование) уравнения Пуассона дает текущую ориентацию инклинометра, совпадающую с пространственным положением оси скважины в данной точке.

Для получения значений текущей ориентации необходимо определить начальные установки [18, 19] инклинометра, в которые входят:

начальная ориентация базисной системы координат;

систематическая аддитивная составляющая погрешности по осям гироскопа (Γ , см. рис. 1), как среднее значение осей гироскопа за время определения и установка начальных значений;

усредненные данные значений по каждой из осей акселерометра (A , см. рис. 1) за время определения и установка начальных значений.

При определении начальных установок инклинометра его положение должно быть неподвижным с фиксированной ориентацией локальной системы координат, совпадающей с базисной системой координат.

Принимаем начальное значение угла курса $\vartheta_0 = 0$. Тогда, учитывая то, что $\cos(0)=1$, а $\sin(0)=0$, получим матрицу поворота [20-23]:

$$M_{ZYX}(0) = \begin{bmatrix} \cos(\psi_0) & \sin(\psi_0)\sin(\varphi_0) & \sin(\psi_0)\cos(\varphi_0) \\ 0 & \cos(\varphi_0) & -\sin(\varphi_0) \\ -\sin(\psi_0) & \cos(\psi_0)\sin(\varphi_0) & \cos(\psi_0)\cos(\varphi_0) \end{bmatrix}.$$

Умножим вектор ускорения свободного падения в неподвижной системе координат на $MZYX(0)$ и получим показания акселерометра при неподвижной локальной системе координат

$$\begin{bmatrix} A_x(0) \\ A_y(0) \\ A_z(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} \otimes M_{ZYX}(0) = \begin{bmatrix} g \cdot \sin(\psi_0) \\ -g \cdot \cos(\psi_0)\sin(\varphi_0) \\ -g \cdot \cos(\psi_0)\cos(\varphi_0) \end{bmatrix}.$$

Значения показаний акселерометра по осям локальной системы координат в неподвижном (калибровочном) состоянии составят

$$A_x(0) = g \cdot \sin(\psi_0); A_y(0) = -g \cdot \cos(\psi_0)\sin(\varphi_0); A_z(0) = -g \cdot \cos(\psi_0)\cos(\varphi_0).$$

$A_x(0)$, $A_y(0)$ и $A_z(0)$ получены, как усредненные данные ряда измерений акселерометра при неподвижной локальной системе координат, но предварительно ориентированной по курсу в заданном направлении некоторой известной ориентации, которую и принимаем за начальный угол курса $\vartheta_0 = 0$.

Тогда, начальное значение тангажа можно определить, как

$$\psi_0 = \operatorname{Arctg} \frac{A_X}{\sqrt{A_Y^2 + A_Z^2}}.$$

Начальное значение крена можно определить, как

$$\varphi_0 = \operatorname{Arctg} \frac{A_Y}{A_Z}.$$

Начальный кватернион ориентации составит

$$P_{ZYX}(0) = \{q_w(0) + i \cdot q_x(0) + j \cdot q_y(0) + k \cdot q_z(0)\},$$

где

$$q_w(0) = \cos\left(\frac{\psi_0}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\varphi_0}{2}\right),$$

$$q_x(0) = \cos\left(\frac{\psi_0}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\varphi_0}{2}\right),$$

$$q_y(0) = \sin\left(\frac{\psi_0}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\varphi_0}{2}\right),$$

$$q_z(0) = -\sin\left(\frac{\psi_0}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\varphi_0}{2}\right).$$

Окончательно, в развернутом виде начальный кватернион ориентации будет равен

$$P_{ZYX}(0) = \left\{ \cos\left(\frac{\psi_0}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) + i \cdot \cos\left(\frac{\psi_0}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) + j \cdot \sin\left(\frac{\psi_0}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) - k \cdot \sin\left(\frac{\psi_0}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) \right\}.$$

Для заданного кватерниона $P_{ZYX} = \{q_w + i \cdot q_x + j \cdot q_y + k \cdot q_z\}$ матрица поворота может быть записана [24], как

$$M_{(qi)} = \begin{bmatrix} 2q_w^2 - 1 + 2q_x^2 & 2q_x q_y + 2q_w q_z & 2q_x q_z - 2q_w q_y \\ 2q_x q_y - 2q_w q_z & 2q_w^2 - 1 + 2q_y^2 & 2q_y q_z + 2q_w q_x \\ 2q_x q_z + 2q_w q_y & 2q_y q_z - 2q_w q_x & 2q_w^2 - 1 + 2q_z^2 \end{bmatrix}$$

или

$$M_{ZYX} = \begin{bmatrix} \cos(\vartheta) \cos(\psi) & \cos(\vartheta) \sin(\psi) \sin(\varphi) - \sin(\vartheta) \cos(\varphi) & \cos(\vartheta) \sin(\psi) \cos(\varphi) + \sin(\vartheta) \sin(\varphi) \\ \sin(\vartheta) \cos(\psi) & \sin(\vartheta) \sin(\psi) \sin(\varphi) + \cos(\vartheta) \cos(\varphi) & \sin(\vartheta) \sin(\psi) \cos(\varphi) - \cos(\vartheta) \sin(\varphi) \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) \sin(\varphi) & \cos(\psi) \cos(\varphi) \end{bmatrix}.$$

Контроль ориентации осуществляется следующим образом: в каждый момент времени, считывая показания гироскопа, получаем значения угловых скоростей относительно осей локальной (подвижной) системы координат:

$$\omega_z(t_z, \Delta t_z); \omega_y(t_y, \Delta t_y); \omega_x(t_x, \Delta t_x),$$

где t_z - момент времени измерения (считывания) угловой скорости вокруг оси Oz; Δt_z - интервал времени следующего измерения угловой скорости вокруг оси Oz; t_y - момент времени измерения (считывания) угловой скорости вокруг оси Oy; Δt_y - интервал времени следующего измерения угловой скорости вокруг оси Oy; t_x - момент времени измерения (считывания) угловой скорости вокруг оси Ox; Δt_x - интервал времени следующего измерения угловой скорости вокруг оси Ox.

Интегрируя (численно) по времени угловые скорости по каждой оси координат за интервал измерения, получаем соответствующие углы поворота (курса, тангажа и крена). В качестве численного интегрирования применим метод трапеций.

Тогда изменение курса будет равно

$$\Delta \vartheta(t_z, \Delta t_z) = \frac{1}{2} \langle \omega_z(t_z) + \omega_z(t_z + \Delta t_z) \rangle \cdot \Delta t_z,$$

изменение тангажа

$$\Delta \psi(t_y, \Delta t_y) = \frac{1}{2} \langle \omega_y(t_y) + \omega_y(t_y + \Delta t_y) \rangle \cdot \Delta t_y,$$

изменение крена

$$\Delta\varphi(t_x, \Delta t_x) = \frac{1}{2} \langle \omega_x(t_x) + \omega_x(t_x + \Delta t_x) \rangle \cdot \Delta t_x.$$

Определяем кватернионы поворотов вокруг осей.

Кватернион поворота вокруг оси Oz на угол $\Delta\vartheta(t_z, \Delta t_z)$

$$p_z(t_z, \Delta t_z) = \left\{ \cos\left(\frac{\Delta\vartheta(t_z, \Delta t_z)}{2}\right) \quad i \cdot 0 \quad j \cdot 0 \quad k \cdot \sin\left(\frac{\Delta\vartheta(t_z, \Delta t_z)}{2}\right) \right\}.$$

Кватернион поворота вокруг оси Oy на угол $\Delta\psi(t_y, \Delta t_y)$

$$p_y(t_y, \Delta t_y) = \left\{ \cos\left(\frac{\Delta\psi(t_y, \Delta t_y)}{2}\right) \quad i \cdot 0 \quad j \cdot \sin\left(\frac{\Delta\psi(t_y, \Delta t_y)}{2}\right) \quad k \cdot 0 \right\}.$$

Кватернион поворота вокруг оси Ox на угол $\Delta\varphi(t_x, \Delta t_x)$

$$p_x(t_x, \Delta t_x) = \left\{ \cos\left(\frac{\Delta\varphi(t_x, \Delta t_x)}{2}\right) \quad i \cdot \sin\left(\frac{\Delta\varphi(t_x, \Delta t_x)}{2}\right) \quad j \cdot 0 \quad k \cdot 0 \right\}.$$

Кватернион «мгновенного» поворота

$$\Delta P_{ZYX}(t_z, \Delta t_z, t_y, \Delta t_y, t_x, \Delta t_x) = p_x(t_x, \Delta t_x) \otimes p_y(t_y, \Delta t_y) \otimes p_z(t_z, \Delta t_z).$$

Текущая ориентация является композицией кватернионов мгновенных поворотов, включая кватернион начальной ориентации

$$P_{ZYX}\left(t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i\right) = \Delta P_{ZYX}(t=0, \Delta t_1) \otimes \Delta P_{ZYX}(t=\Delta t_1, \Delta t_2) \otimes \Delta P_{ZYX}(t=\Delta t_1 + \Delta t_2, \Delta t_3) \otimes \dots \otimes \Delta P_{ZYX}\left(t = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta t_i, \Delta t_n\right).$$

Запишем его в виде

$$P_{ZYX}(t) = \{P_1(t) + i \cdot P_2(t) + j \cdot P_3(t) + k \cdot P_4(t)\}.$$

Тогда углы Эйлера аэрокосмической последовательности будут выглядеть следующим образом:

угол курса

$$\vartheta(t) = \text{Arctg} \frac{2P_2(t) \cdot P_3(t) - 2P_1(t) \cdot P_4(t)}{2P_1^2(t) - 1 + 2P_2^2(t)};$$

угол тангажа

$$\psi(t) = -\text{Arc} \sin \langle 2P_2(t) \cdot P_4(t) + 2P_1(t) \cdot P_3(t) \rangle;$$

угол крена

$$\varphi(t) = \text{Arctg} \frac{2P_3(t) \cdot P_4(t) - 2P_1(t) \cdot P_2(t)}{2P_1^2(t) - 1 + 2P_4^2(t)}.$$

Если в качестве оси перемещения выбрать ось Ox локальной (подвижной) системы координат, то, очевидно, что вектор приращения перемещения в этой системе координат на каждом шаге составит

$$\Delta \bar{S}_{xyz}(t) = [\Delta s_x(t) \quad 0 \quad 0].$$

Тогда в базисной системе координат вектор пути будет

$$\Delta \bar{S}_{XYZ}(t) = [\Delta S_X(t) \quad \Delta S_Y(t) \quad \Delta S_Z(t)].$$

Для определения вектора приращения перемещения в базисной системе координат необходимо вектор приращения перемещения в локальной системе координат $\Delta \bar{S}_{x'y'z'}$ умножить на матрицу поворота $M_{ZYX}(t)$ или на матрицу поворота $M_{(Pi)}(t)$.

Таким образом

$$\Delta \bar{S}_{XYZ}(t) = \Delta \bar{S}_{xyz}(t) \otimes [M_{ZYX}(t)]^T,$$

$$\Delta \bar{S}_{XYZ}(t) = \begin{bmatrix} \Delta s_x(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} \cos\vartheta(t) \cdot \cos\psi(t) & \cos\vartheta(t) \cdot \sin\psi(t) \cdot \sin\varphi(t) - \sin\vartheta(t) \cdot \cos\varphi(t) & \cos\vartheta(t) \cdot \sin\psi(t) \cdot \cos\varphi(t) + \sin\vartheta(t) \cdot \sin\varphi(t) \\ \sin\vartheta(t) \cdot \cos\psi(t) & \sin\vartheta(t) \cdot \sin\psi(t) \cdot \sin\varphi(t) + \cos\vartheta(t) \cdot \cos\varphi(t) & \sin\vartheta(t) \cdot \sin\psi(t) \cdot \cos\varphi(t) - \cos\vartheta(t) \cdot \sin\varphi(t) \\ -\sin\psi(t) & \cos\psi(t) \cdot \sin\varphi(t) & \cos\psi(t) \cdot \cos\varphi(t) \end{bmatrix}^T,$$

откуда

$$\Delta S_X(t) = \cos\vartheta(t) \cdot \cos\psi(t) \cdot \Delta s_x(t),$$

$$\Delta S_Y(t) = \sin \vartheta(t) \cdot \cos \psi(t) \cdot \Delta s_x(t),$$

$$\Delta S_Z(t) = -\sin \psi(t) \cdot \Delta s_x(t)$$

или

$$\Delta \bar{S}_{XYZ} = \Delta \bar{S}_{x'y'z'}(t) \otimes [M_{(P_i)}(t)]^T,$$

$$\Delta \bar{S}_{XYZ}(t) = \begin{bmatrix} \Delta s_x(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 2P_1^2(t)-1+2P_2^2(t) & 2P_2(t) \cdot P_3(t)+2P_1(t) \cdot P_4(t) & 2P_2(t) \cdot P_4(t)-2P_1(t) \cdot P_3(t) \\ 2P_2(t) \cdot P_3(t)-2P_1(t) \cdot P_4(t) & 2P_1^2(t)-1+2P_3^2(t) & 2P_3(t) \cdot P_4(t)+2P_1(t) \cdot P_2(t) \\ 2P_2(t) \cdot P_4(t)+2P_1(t) \cdot P_3(t) & 2P_3(t) \cdot P_4(t)-2P_1(t) \cdot P_2(t) & 2P_1^2(t)-1+2P_4^2(t) \end{bmatrix}^T,$$

откуда

$$\Delta S_X(t) = \langle 2P_1^2(t)-1+2P_2^2(t) \rangle \cdot \Delta s_x(t),$$

$$\Delta S_Y(t) = \langle 2P_2(t) \cdot P_3(t)-2P_1(t) \cdot P_4(t) \rangle \cdot \Delta s_x(t),$$

$$\Delta S_Z(t) = \langle 2P_2(t) \cdot P_4(t)+2P_1(t) \cdot P_3(t) \rangle \cdot \Delta s_x(t).$$

Согласно прогнозных данных, сочетание этих двух методов каротажа скважин и инклинометрии позволит снизить потери руд более 12 процентов, а засорение - на 9 процентов.

На рис. 2 приведены гистограммы общего объема добычи, потери руд и засорения горной массы до (а) и после (б) внедрения комбинированного каротажного устройства, состоящего из каротажного зонда, инклинометра и видеокамеры.

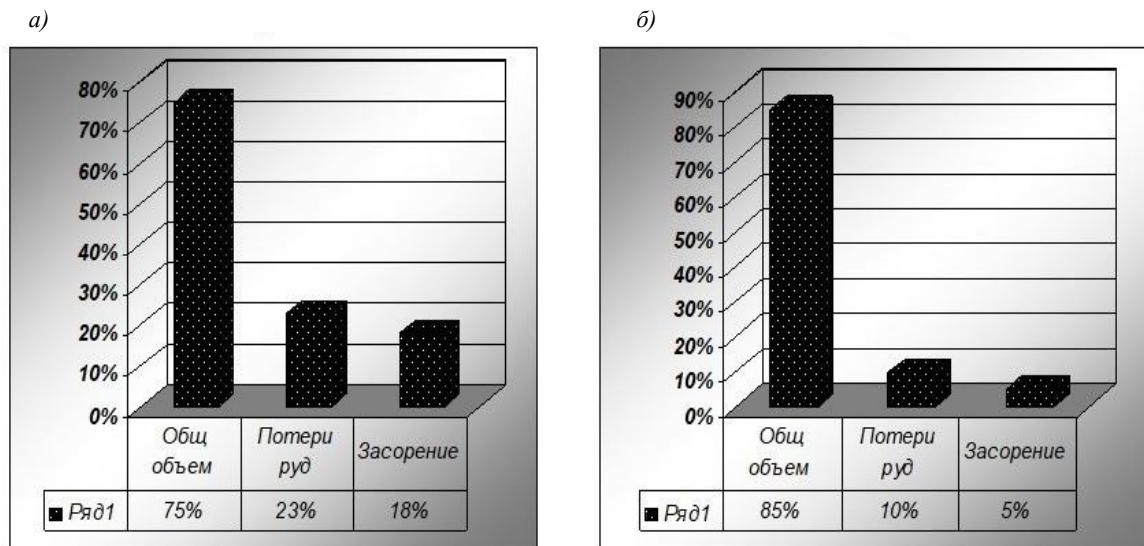


Рис. 2. Гистограммы общего объема добычи, потери руд и засорения горной массы до (а) и после (б) внедрения комбинированного каротажного устройства

Выводы и направления дальнейших исследований. Точное определение ориентации оси наклонной скважины в каждой точке пространстве играет важную роль для оптимизации процессов добычи полезных ископаемых в технологиях, использующих наклонные скважины для буровзрывных работ.

В данной статье рассмотрены принципиальные возможности дистанционного измерения пространственного положения наклонной скважины с использованием современных средств определения пространственной ориентации. Определены основные и дополнительные задачи и функции инклинометра, представляющего собой универсальный модульный каротажный зонд наклонных скважин. Определена архитектура инклинометра, позволяющая получить необходимые основные данные по инклинометрии скважины и дополнительные каротажные данные скважины в зависимости от конкретной конфигурации инклинометра. Таким образом, использование такого инклинометра позволит точно совмещать пространственные параметры наклонной скважины с ее техническими, физическими, минералогическими и химическими параметрами.

Список литературы

1. Азарян А. А., Колосов В. А., Ломовцев Л. А., Учитель А. Д. Качество минерального сырья. – Кривой Рог: Минерал, 2001 –201 с
2. Azaryan, A. A., Gritsenko A. N. Mobile station for logging of blast holes // *Novi tehnologii*. 2011. №4. P. 52–55.
3. Azaryan, A. Use of Bourger Lambert Bera law for the operative control and quality management of mineral raw materials // *A. Azaryan, V. Azaryan. Metallurgical and Mining Industry*. 2015. No. 1. P. 4-9.
4. Necati Çelik, Uğur Çevik, Ahmet Çelik. Effect of detector collimation on the measured mass attenuation coefficients of some elements for 59.5–661.6 keV gamma-rays / *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. Volume 281, 15 June 2012, Pages 8-14.
5. Azaryan, A. Research of influence single crystal thickness NaI (TL) on the intensity of the integrated flux of scattered gamma radiation // *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. №2. P. 43–46.
6. Azaryan, A. Use of Bourger Lambert Bera law for the operative control and quality management of mineral raw materials // *A. Azaryan, V. Azaryan. Metallurgical and Mining Industry*. 2015. No. 1. P. 4-9.
7. Development of a method for operational control over quality of the iron ore raw materials during open and underground extraction / *A. Azaryan, A. Gritsenko, A. Trachuk, D. Shvets* // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Issue 5 (95). P. 13-19. doi: 10.15587/1729-4061.2018.144003
8. Azaryan A., Pikilnyak A., Shvets D. Complex automation system of iron ore preparation for beneficiation / *Metallurgical and mining industry*. No.8. 2015. p.p. 64 66. https://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2015_8/011Azaryan.pdf
9. Азарян А. А., Дрыга В. В., Цыбулевский Ю. Е. Исследование автогенераторного метода контроля содержания железа магнитного в продуктах обогащения // *Качество минерального сырья: сб. науч. трудов. Академия горных наук Украины, КТУ, Укррудпром; гл. ред. В. Ф. Бызов. Кривой Рог. 2005. С. 117-123.*
10. Швец Д. В. Автоматическое управление процессом измельчения магнетитовых руд на основе определения их прочности. / *Сборник научных трудов "Качество минерального сырья", том 2. Кривой Рог. 2018.*
11. Morkun, V., Morkun, N., Pikilnyak, A. The study of volume ultrasonic waves propagation in the gas-containing iron ore pulp // *Ultrasonics*. Volume 56. 2015. p.p.340-343. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X14002443>
12. Поркуян О. В., Сотникова Т. Г. Комбинированный метод определения относительного содержания магнетита в твердой фазе железорудной пульпы / *Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ"*. № 12. Харьков. НТУ "ХПИ". 2010. С. 29-36.
13. Система управления качеством руд с применением радиометрических методов на действующих горнодобывающих предприятиях / *В. И. Ревнивцев, Е. И. Крапивский, Е. П. Леман и др. //Тезисы докладов Всесоюзного семинара Электронные методы обогащения. -М., 1985. -С. 10-11.*
14. Бранец В. Н., Шмыглевский И. П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. — М.: Наука. 1973. — 320 с.
15. Челноков Ю. Н. Кватернионные и бикватернионные модели и методы механики твердого тела и их приложения. — М.: Физматлит, 2006. — 512 с.
16. J. В. Kuipers. Quaternions and Rotation Sequences: A Primer with Applications to Orbits, Aerospace and Virtual Reality. Princeton University Press, 1999.
17. Журавлев В. Ф. Основы теоретической механики. Изд. 2-е, перераб. — М.: Физматлит, 2001. — 320 с.
18. Липтон Н. Начальная выставка инерциальной системы на подвижном основании / *Н. Липтон* // М. : Наука, 1971. – 167 с.
19. Збруцький О.В. Розробка структури та алгоритму функціонування інтегрованої навігаційної системи визначення координат і курсу рухомого об'єкта / *О.В. Збруцький, О.І. Нестеренко, О.В. Прохорчук* // *Вісник ТАУ, УТУ*. – 1999. – №3. – С. 233–236.
20. Красовский А. А. Теоретические основы пилотажно-навигационных комплексов / *А. А. Красовский, А. В. Лебедев, В. В. Невструев* // М.: ВВИА им. Жуковского, 1980. – 372 с.
21. Алёшин Б. С. Ориентация и навигация подвижных объектов. – М.: Физматлит, 2006. – 422 с.
22. Бранец В.Н. Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем / *В. Н. Бранец, И. П. Шмыглевский* // М.: Наука, 1992. – 280 с.
23. Дмитриев С. П. Инерциальные методы в инженерной геодезии / *С. П. Дмитриев* // С.-Петербург: ГНЦ РФ - ЦНИИ "Электроприбор", 1997. – 208 с.
24. J. В. Kuipers. Quaternions and Rotation Sequences: A Primer with Applications to Orbits, Aerospace and Virtual Reality. Princeton University Press, 1999.

Рукопись поступила в редакцию 05.04.2018