

провести буріння свердловин для подальшого встановлення в них УЗ-датчиків спеціальних типів для проведення ультразвукового обстеження земних надр для виявлення більш точної картини їх стану та наявності в них пустот.

Отримані дані про місцезнаходження пустот дозволять зробити висновок про можливість або неможливість проведення певних робіт певного роду на заданій місцевості (наприклад, проведення будь-яких досліджень, споруджування будівель, прокладання доріг і т.ін.), пов'язаних з перебуванням на території людей, обладнання тощо. Це дозволить уникнути людських жертв та матеріальних збитків.

Список літератури

1. Вилкул Ю.Г. Современное экологическое состояние Криворожского бассейна / Вилкул Ю.Г. // Сучасні технології розробки рудних родовищ: зб. наук. пр. – Кривий Ріг, 2011. – Вип. – С. 9-12.
2. Васьков И.М. Ледово-каменные обвалы и их прогнозирование. Опыт Геналдонской катастрофы, центральный Кавказ / Васьков И.М. - LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. - 238с.
3. Леонов В.Л. Обвалы и оползни на территории Корякского автономного округа, связанная с ними опасность и факторы, ее определяющие / В.Л. Леонов, О.Н. Егоров // Вопросы географии Камчатки. - 2005. - №11. - С.31-50.
4. Ryohei Misumi REALTIME FORECASTING OF SHALLOW LANDSLIDES USING RADAR-DERIVED RAINFALL / Ryohei Misumi, Masayuki Maki, Koyuru Iwanami, Ken-ichi Maruyama // World Weather Research Programme's symposium (Toulouse, France, 2005 September 5-9). - Toulouse, 2005. - P. 1-6.
5. Никольский Д.Б. Современные тенденции в радиолокационном дистанционном зондировании Земли / Д.Б. Никольский // Геопрофи. – 2008. – №4. – С. 19-24.

Рукопис подано до редакції 10.04.12

УДК 681.518.3: 658.56

А.А. АЗАРЯН, д-р техн. наук, проф., В.В. ДРИГА,
Ю.Е. ЦЫБУЛЕВСКИЙ, канд. техн. наук, доц. А.В. ШВЫДКИЙ, ст.препод.
ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

СНИЖЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ОБУСЛОВЛЕННОЙ ВАРИАЦИЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПУЛЬПЫ ПРИ ДИСКРЕТНОМ КОНТРОЛЕ СОДЕРЖАНИЯ В НЕЙ МАГНЕТИТА МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Для управления технологическим процессом обогащения магнетитовых руд в условиях рудообогатительных фабрик необходима оперативная и достоверная информация о содержании железа магнетитового ($Fe_{\text{магн}}$, магнетита) в руде на различных стадиях ее переработки. В частности, важной является оперативная информация о содержании $Fe_{\text{магн}}$ в рудной пульпе, представляющей собой водную суспензию (взвесь) тонко измельченной руды классом крупности около -0.1 мм.

Технологический контроль указанного параметра предусмотрен в *исходной руде* (пульпе), поступающей на магнитную сепарацию, а также в *концентрате* и *отвальных «хвостах»*, которые получают в результате сепарации. В настоящее время контроль осуществляется ручным отбором проб, их подготовкой (фильтрация, сушка, доизмельчение до крупности -0.016 мм) и химическим анализом, что является ресурсозатратным и не оперативным способом.

С другой стороны, получить необходимую информацию о содержании $Fe_{\text{магн}}$ в магнетитовых рудах оперативно (практически в режиме реального времени) можно на основе *магнитометрического способа*, основанного на зависимости магнитной восприимчивости руды от содержания в ней магнетита.

Анализ публикаций, посвященных применению магнитометрического способа, например [1], а также проведенные нами эксперименты, результаты которых приведены ниже, показали, что в случае с пульпой точность производимых измерений оказывается в несколько раз ниже, чем с сухой порошковой рудой, получаемой после сушки, и является недостаточной для технологического контроля.

Основным мешающим фактором является *нестабильность концентрации пульпы* – т.е. соотношения масс ее «твердой» (руда) и «жидкой» (вода) фаз. Например, только что отобранная, т.н. «жидкая» пульпа (т.е. еще не разделившаяся на воду и осадок) представляет собой достаточно слабо концентрированную суспензию, большую часть которой составляет вода. Особенностью такой пульпы является то, что она очень быстро разделяется. Так, при ее отстаивании в течение нескольких минут образуется граница раздела между чистой водой сверху и осадком снизу в виде более концентрированной (сметанообразной) пульпы. Далее, с течением времени,

пульпа в нижней части еще более уплотняется, вытесняя из себя воду и становясь еще более концентрированной, а вода становится полностью прозрачной.

Учитывая это свойство, мы выделили следующие возможные способы измерения содержания $Fe_{\text{магн}}$ в твердой фазе пульпы:

Если использовать датчик магнитной восприимчивости, работающий в *режиме насыщения* [2], при котором производится анализ *только некоторой* части от всего объема пульпы – там, где образовался осадок, то сигнал датчика кроме магнитной восприимчивости будет зависеть также и от плотности осадка, и скомпенсировать эту зависимость не представляется возможным. Недостаток очевиден: требуется длительное отстаивание (в течение нескольких часов), чтобы плотность осадка стабилизировалась достаточно.

Если использовать датчик, работающий в *режиме без насыщения* [2], при котором производится анализ *всего* объема пульпы, то сигнал датчика кроме магнитной восприимчивости будет *пропорционален* также и общей массе рудного материала, т.е. массе твердой фазы m_T , которая помещена в измерительный объем датчика. Таким образом, для *нормирования* сигнала датчика необходимо *знать эту массу твердого*. И здесь также можно выделить несколько подходов:

Измерить m_T можно прямым методом и наиболее точно, если из общей массы пульпы полностью удалить воду ($m_T = m - m_{\text{ж}}$), однако сушка пульпы требует затрат времени и ресурсов.

Можно принять, что m_T пропорционально общей массе пульпы m и использовать в вычислениях m вместо m_T с некоторым постоянным коэффициентом. Однако для этого измерения необходимо проводить при постоянной концентрации пульпы, что возможно также только при длительном отстаивании, фильтрации или отжиме пульпы, учитывая высокую нестабильность концентрации именно в начале процесса осаждения. Очевидно, что этот способ также требует дополнительных операций и времени.

Определить m_T можно косвенно, измерив общую массу пульпы m и концентрацию твердого $C_T = m_T/m$.

Последний вариант, очевидно, является самым перспективным, поскольку дает возможность проводить измерения непосредственно на «жидкой» пульпе различной концентрации (без ее предварительной фильтрации и т.п.), а также пульпы в потоке (пульпопроводе) в дальнейшем. Однако простого и достоверного способа определения соотношения масс руды и воды в пульпе нам известно не было. Поэтому сначала мы решили попробовать более простой способ с фильтрацией (вариант 2b). Итак, идея состояла в том, чтобы избавиться от необходимости измерения и учета концентрации пульпы, для чего выдерживать концентрацию (влажность) отфильтрованного остатка (фильтрата) примерно постоянной и, тем самым, получить корреляцию между его общей массой m и массой твердого m_T в нем.

Экспериментальные исследования на фильтрате проводились в условиях рудообогатительных фабрик ГОКа ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» с использованием ранее разработанного нами устройства ДЖМ (аббр. «датчик железа магнетитового») [3-6], которое в настоящее время применяется в промышленных условиях для дискретного оперативного контроля содержания $Fe_{\text{магн}}$ в сухой дробленой и порошковой магнетитовой руде.

В течение 5 суток с интервалом около часа с помощью устройства ДЖМ анализировались пробы пульпы исходной руды ($Fe_{\text{магн}}$ равно 24–28 %) и хвостов (0,5–2 %), которые отбирались на фабрике, причем хвосты уже представляли собой фильтрат, а исходную руду – отстаивали. Анализ проб на ДЖМ проводился в штатном режиме работы данного устройства. Масса проб фильтрата составляла несколько сотен грамм.

При сопоставлении данных, полученных с помощью ДЖМ и данных химических анализов получены большие расхождения, особенно на исходной руде: до $\pm 6\%$ абс. ед., среднеквадратичное отклонение (СКО) составило 2% абс. ед. Таким образом, на исходной руде результат был явно неудовлетворительным, предположительно, из-за того, что этот материал не фильтровался, следовательно, не имел достаточно постоянной влажности.

Чтобы исключить возможность ошибок в данных химического анализа, мы провели аналогичный эксперимент на этих же пробах, но высушенных. При этом установлено, что на сухом порошке дисперсия показаний ДЖМ резко уменьшилась, и получено хорошее совпадение с данными химического анализа. СКО показаний ДЖМ от данных химического анализа на исходной руде составило 0.47% абс. ед., абсолютные отклонения не превышали $\pm 1.1\%$ абс. ед., что соответствует параметрам работоспособного устройства.

Проведенные эксперименты показали, что без учета концентрации пульпы можно работать только на фильтрате и только на хвостах, где значения содержания $Fe_{\text{магн}}$ низкие, поэтому абсолютная погрешность не высока. Без фильтрации и при высоких значениях содержания $Fe_{\text{магн}}$ в твердом точно измерить его не возможно: полученная при этом погрешность превышает получаемую на сухих порошках в 4-5 раз.

Рассматривая принцип действия ДЖМ, это можно объяснить тем, что содержание $Fe_{\text{магн}}$ рассчитывается по величине сигнала датчика магнитной восприимчивости (SX), которая нормируется по величине сигнала общей массы пробы (m): SX/m , при этом вариация содержания воды в пульпе вызывает вариацию m , SX/m и, следовательно, расчетного содержания $Fe_{\text{магн}}$.

Постановка задачи. Необходимо провести экспериментальные исследования и разработать математическую модель взаимодействия пульпы с датчиками магнитной восприимчивости и массы, адекватно описывающую взаимосвязь измеряемых параметров с содержанием $Fe_{\text{магн}}$ и позволяющую определять массовое содержание $Fe_{\text{магн}}$ в твердой фазе пульпы вне зависимости ее концентрации в некоторых допустимых пределах.

Изложение материала и результаты. В лабораторных условиях проведены эксперименты с последовательным разбавлением водой трех стандартных образцов (СОП) порошковой руды класса крупности $-0,016$ мм с содержанием $Fe_{\text{магн}}$ равным 2,26 %, 15,63 % и 24,0 %. На 50 г сухого порошка последовательно добавлялось 5 г воды, начиная с 15 г и последовательно доводя до 40 г воды. Каждый раз полученная суспензия тщательно перемешивалась и заливалась в кювету объемом 20 см^3 , при этом объем материала был строго фиксированным (по верхний край кюветы), и далее на устройстве ДЖМ (рис. 1) измерялись магнитная восприимчивость SX и общая масса пробы m . Результаты эксперимента приведены на рис. 2.

Из графика видно, что все три полученные совокупности точек хорошо аппроксимируются линейными функциями, причем с очень высокими коэффициентами детерминации (R^2 равно 0,99 для всех трех функций). Интересно отметить также то, что все три функции исходят из одной точки, где масса пробы (обозначим ее m_0) равна приблизительно 20,5 г, а магнитная восприимчивость равна нулю. Эта граничная точка ($m_0, 0$) получена при измерении чистой воды, без твердой фазы.

Возникла следующая идея предварительно измерить значение этой т.н. массы «тары с водой» m_0 и при последующих измерениях (уже на пульпе) вычитать из общей массы пульпы m вычитать m_0 .



Рис. 1. Фото лабораторной установки

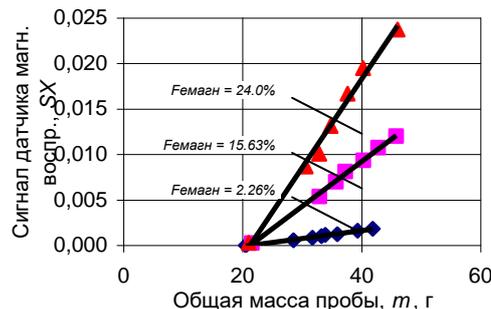


Рис. 2. Связь сигнала магнитной восприимчивости с сигналом массы пробы пульпы при изменении концентрации пульпы в пробе в широких пределах (при фиксированном объеме пробы)

При этом все три функции на графике смещаются влево в начало координат, и сигнал магнитной восприимчивости SX становится пропорционален разнице $m - m_0$, причем величина отношения $SX/(m - m_0)$, представляющая в данном случае коэффициент наклона для прямо пропорциональной функции, для различных значений содержания $Fe_{\text{магн}}$ будет различной, и в то же время – постоянной вне зависимости от концентрации пульпы. Это позволяет использовать отношение $SX/(m - m_0)$ в качестве информативного сигнала для вычисления содержания $Fe_{\text{магн}}$.

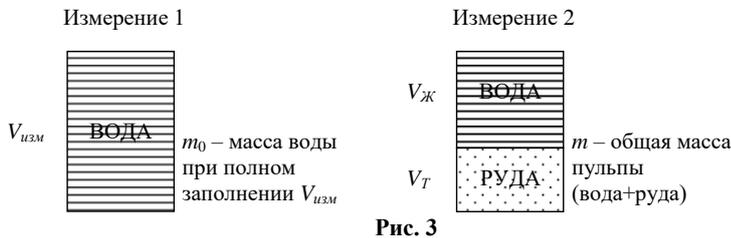
Описанный метод измерения получил название «метод вычитания тары с водой». Рассмотрим его основы теоретически. Введем следующие обозначения: $V_{\text{изм}}$ - измерительный объем кюветы, $m_{\text{ж}}$, $V_{\text{ж}}$, $\rho_{\text{ж}}$ - масса, объем и плотность жидкой фазы пульпы (воды), $m_{\text{т}}$, $V_{\text{т}}$, $\rho_{\text{т}}$ - масса, объем и плотность твердой фазы пульпы (руды). На основе данных двух измерений, первое - с водой, второе - с пульпой, как показано на рис. 3, можно составить следующую систему урав-

нений

$$\begin{cases} m_o = \rho_{ж} V_{изм}; \\ m = m_T + m_{ж}; \\ V_T + V_{ж} = V_{изм}. \end{cases}$$

Учитывая формулу для плотности $\rho = m/V$, решив систему относительно неизвестных m_T , $m_{ж}$, мы получили выражение для определения массы твердого в пульпе

$$m_T = (m - m_o) \frac{\rho_T}{\rho_T - \rho_{ж}}.$$



Таким образом, при постоянных $V_{изм}$, ρ_T , $\rho_{ж}$ массу твердого можно определить по измеренной разнице m и m_o . Основное условие при этом – достаточное различие плотностей ρ_T и $\rho_{ж}$. При $\rho_T \approx 3 \text{ г/см}^3$, $\rho_{ж} \approx 1 \text{ г/см}^3$

$$m_T \approx 1,5(m - m_o).$$

Зная массу твердого, можно определить массовое содержание $Fe_{магн}$ в твердой фазе пульпы

$$Fe_{магн} = \frac{m_m}{m_T} \cdot 100\%,$$

где m_m – масса магнетита $Fe_{магн}$, которая тесно связана с величиной сигнала датчика магнитной восприимчивости SX .

Окончательно получаем следующую математическую модель

$$Fe_{магн} = k \frac{SX}{m - m_{ц}},$$

где k – постоянный коэффициент (г·%), учитывающий значения плотностей ρ_T , $\rho_{ж}$ и чувствительность датчика магнитной восприимчивости, и определяемый эмпирически при градуировке устройства.

Применение полученной модели для расчета содержания $Fe_{магн}$ по экспериментальным значениям SX и m , полученным ранее при разбавлении трех СОП (см. рис. 2) дало хороший результат (рис. 4).

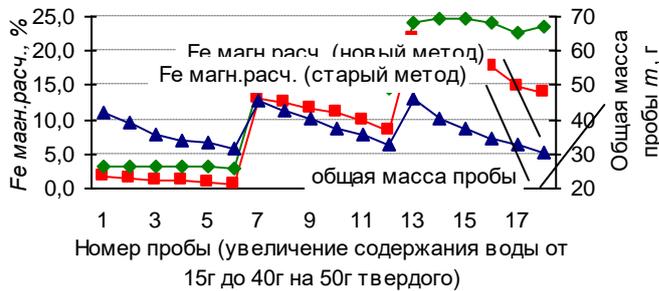


Рис. 4. Сравнение показаний содержания $Fe_{магн}$ по старому методу и по новому при вариации содержания воды в пульпе в широких пределах

Из графика видно, что расчетное значение содержания $Fe_{магн}$ по новому методу остается практически постоянным, несмотря на значительное изменение концентрации пульпы.

Далее были проведены повторные испытания устройства ДЖМ, работающего с использованием нового метода на пульпе (исходная руда и хвосты) рудообогатительных фабрик ГОКа ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Особенностью было то, что пульпа в этот раз не фильтровалась, а даже наоборот, выполнялись по три измерения одной и той же пробы с различной концентрацией (плотный осадок, сметанообразная и очень жидкая консистенции). Все точки вынесены на график в виде сопоставления с результатами химического анализа (рис. 5,6).

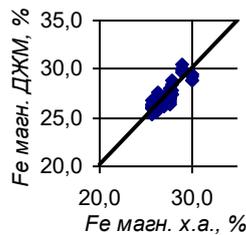


Рис. 5. Сопоставление показаний ДЖМ с данными хим.анализа. **Исходная руда**

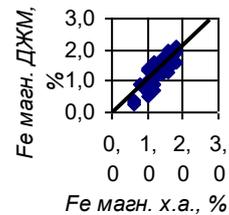


Рис. 6. Сопоставление показаний ДЖМ с данными хим.анализа. **Хвосты**

Сравнивая полученные результаты с полученными в самом начале исследований, можно отметить, что дисперсия показаний резко снизилась, и получено достаточно хорошее совпадение с данными химического анализа. Коэффициент детерминации в обоих случаях составил 0,76 (не достаточно высокий из-за узкого диапазона, если аппроксимировать не двумя отдельными функциями, а одной - и исходную руду, и хвосты - то R^2 составляет 0,998).

СКО показаний ДЖМ от данных химического анализа составило 0,63 % и 0,23 % абс. ед. на исходной руде и хвостах соответственно, что позволяет сделать вывод, что на пульпе, благодаря использованию нового метода измерения и математической модели, достигнута практически та же точность, что и на сухой руде, где СКО обычно составляет 0,3...0,8% абс. ед. в зависимости от крупности материала и вариации магнитных свойств руд.

Выводы и направление для дальнейших исследований. Разработана математическая модель и найден простой метод, позволяющие в значительной мере исключить влияние переменного содержания воды в пульпе на точность контроля содержания $Fe_{\text{магн}}$ в ее твердой фазе.

Получены показатели, характеризующие точность контроля содержания $Fe_{\text{магн}}$, сопоставимые с аналогичными, полученными на ДЖМ, работающих на сухих пробах.

Как показали дополнительно проведенные исследования при многократном измерении одного и того же материала, но при различной степени его осаждения (например, сразу после перемешивания или по мере осаждения твердого в пульпе) магнитная восприимчивость незначительно варьируется (в пределах 5-10 % относительно), что снижает точность, если использовать пробы с различной степенью осаждения (например, только что перемешанные и хорошо осажденные). Поэтому следующей задачей является поиск такого метода измерения либо конфигурации магнитного поля датчика, которые позволят стабилизировать измеряемое значение магнитной восприимчивости независимо от степени осаждения пульпы.

Список литературы

1. **Марюта А.Н.** Контроль качества минерального сырья / **А.Н. Марюта, П.К. Младецкий, П.А. Новицкий.** – К. : Техніка, 1976. – 220 с.
2. **Дрига В.В.** Исследование и классификация факторов снижающих точность непрерывного контроля качества магнетитовых руд // Разраб. рудн.месторожд. / Кривой Рог. - КТУ, 2011.
3. Пристрій для оперативного контролю масової частки заліза магнітного у гірській масі : патент 80694 / **Азарян А.А., Дрига В.В., Цибулевський Ю.Є.** ; власник патенту ТОВ «Рудпромгеофізика». – №20040806896 ; заявл. 17.08.04 ; опубл. 25.10.07, Бюл. №17.
4. **Азарян А.А.** Исследование автогенераторного метода контроля содержания железа магнитного в продуктах обогащения / **А.А. Азарян, В.В. Дрига, Ю.Е. Цибулевский** // Качество минерального сырья : сб. науч. тр. / Криворожский техн. ун-т. – Кривой Рог : КТУ, 2005. – С. 117-123.
5. **Дрига В.В.** Результаты промышленных испытаний устройства ДЖМ-3 // Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій: зб. наук. пр. / Дніпропетровський нац. ун-т. – Дніпропетровськ : ДНУ, 2006. – Том 10. – С. 159-165.
6. **Дрига В.В.** Исследование и классификация факторов, влияющих на геофизический мониторинг массовой доли магнетита в горной массе / Вісник Криворізького технічного університету // . – Кривий Ріг, 2006. – Вип. 14. – С. 150-153.

Рукопис подано до редакції 10.04.12