

А. А. РУДАНОВСКИЙ, А. Г. ВАСИЛЬЕВ, П. Я. ВЕРТЕБНЫЙ
**МЕТОД КОНТРОЛЯ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА
БИНАРНЫХ И КВАЗИБИНАРНЫХ СМЕСЕЙ**

(Представлено академиком Н. В. Мельниковым 28 IV 1972)

При разработке аппаратурных методов контроля вещественного состава основные трудности обычно возникают в связи с влиянием возмущающих факторов X_i на результат измерения Y . Наиболее распространенными способами получения требуемой точности являются жесткая стандартизация условий измерения и использование многоканальных приборов, измеряющих наряду со значением Y некоторые из значений X_i в процессе анализа. Другой подход заключается в создании при измерении конкурирующих процессов, направленных таким образом, чтобы увеличение значения определенного фактора в одном процессе увеличивало Y , а в другом — уменьшало его. При этом можно найти интервал значений X_i , в котором показания прибора Y остаются практически неизменными.

Покажем реализацию такой возможности в методе контроля зольности угля. Промышленный уголь в первом приближении можно рассматривать как квазибинарную систему, состоящую из чистого угля ($Z = 6$) и смеси минеральных веществ с усредненным зарядом ядер атомов, близким к заряду Al ($Z = 13$) (1). Одним из аппаратурных методов контроля зольности

Таблица 1

Чувствительность к зольности и возмущающим факторам

Метод	E_{γ} , кэВ	$l_{\text{опт}}$, см	Чувствительность (% к 1 % зольности) к факторам				
			A^c	l	γ	W^P (2)	FeS_2 (3)
Просвечивание (1)	60	16,0	-2,5	-2,3	-2,3	-2,7	-8,9
Рассеяние «вперед», Am^{241}	≈ 60	11,0	-1,9	0	-0,2 (4)	0	-5,8
Просвечивание (1)	220	26,0	-1,4	-2,3	-2,3	-2,8	-1,9
Рассеяние «вперед», Se^{75}	≈ 220	20,0	-0,8	0	-0,3 (4)	0	-1,6

Примечания. (1) расчет по методике, приведенной в (1) при $A^c = 20\%$; $\gamma = 0,55$; плотности угля 1,2, плотности породы 2,6 г/см³; (2) при $W^P = 5\%$; (3) при концентрации FeS_2 равной 3%; (4) расчет на ЦВМ.

является метод просвечивания слоя угля, толщиной l (см), узким пучком γ - или рентгеновского излучения (1, 2). Ослабление пучка определяется известным экспоненциальным законом

$$I = I(0) \cdot \exp(-\mu\gamma\rho l), \quad (1)$$

где I (сек⁻¹) — скорость счета квантов детектором излучения, $I(0)$ — то же при $l = 0$; γ — коэффициент заполнения объема твердыми и жидкими наполнителями (уголь, порода, влага, примеси); μ (см²/г) — массовый коэффициент ослабления излучения, зависящий от зольности A^c , выражае-

мой. в вес. %; ρ (г/см³) — средняя плотность материала заполнителя (в общем случае также зависит от A^c) (1).

Возмущающими факторами в процессе измерения A^c являются непостоянство l (колебания толщины слоя), непостоянство γ (колебания фракционного состава угля), изменение содержания примесей, особенно пирита FeS_2 (влияет на μ , ρ), и влажности W^p (влияет на γ , ρ , μ). Чувствительность S методов к A^c и к действию возмущающих факторов показывает изменение (%) сигнала при изменении A^c , W^p , содержания FeS_2 на 1 абс. % или при отклонении на 1% значения γ от $\bar{\gamma}$. В первой и третьей строках табл. 1 показана чувствительность метода просвечивания к A^c и X_i при энергиях γ -излучения $E_\gamma = 60$ и 220 кэВ и значениях толщины l_{opt} , соответствующих слоям десятикратного ослабления $(I(0)/I) = 10$. Из табл. 1 видно, что чувствительность к зольности составляет величину того же порядка, что и чувствительность к возмущающим факторам. На рис. 1, 1 приведена зависимость сигнала $Y = I/I_0$ (в относительных единицах) от толщины l . Через I_0 обозначена скорость счета при $l = l_{opt}$. Поскольку l и γ входят в формулу (1) инвариантно, эта же кривая характеризует зависимость сигнала от коэффициента заполнения γ . В табл. 1 приведены также чувствительности к влажности и содержанию пирита. Так как допустимая погрешность определения A^c не превышает 1%, то при использовании обычных методов просвечивания необходимо обеспечивать постоянство l , γ и W^p в пределах $\approx 0,1\%$, что является весьма трудной технической задачей.

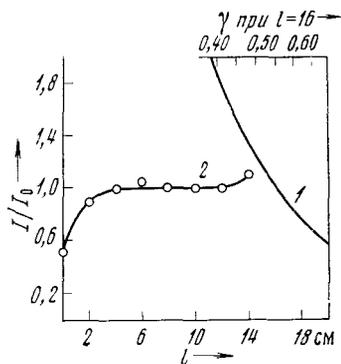


Рис. 1. Чувствительность к толщине угля l . 1 — просвечивание, $E_\gamma = 60$ кэВ, $A^c = 2,7\%$, $S_l = S_\gamma = -2,3\%$ на 1% зольности; 2 — рассеяние «вперед», Am^{241} , $S_l \approx 0$

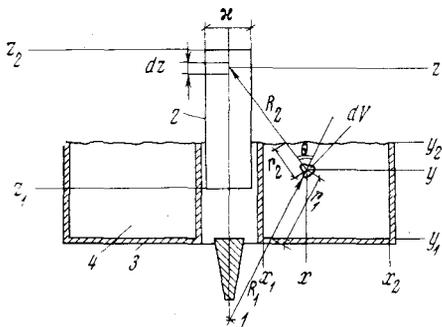


Рис. 2. Использование излучения, рассеянного «вперед»

При рассмотрении задачи в приближении однократного рассеяния можно записать формулу, определяющую скорость счета γ -квантов I :

$$I \cong \frac{1}{2} \cdot 3,7 \cdot 10^7 \text{ Qmexn} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{z_1}^{z_2} \frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta) \cdot \frac{x^2}{R_1^2 R_2^2} \times \\ \times \exp\{-\rho\gamma[\mu r_1 + \mu(\theta)r_2]\} dx dy dz = C(Z/A)\rho\gamma \cdot G, \quad (2)$$

где G — значение тройного интеграла; $C = 1,11 \cdot 10^{31} \text{ Qmex} = \text{const}$; m — среднее число γ -квантов, сопровождающих распад ядра; ϵ — эффективность регистрации γ -квантов детектором; $n = 6,02 \cdot 10^{23} (Z/A)\rho\gamma$ — число электронов в 1 см³ объема; $d\sigma/d\Omega$ (см²/электрон·стер) — сечение комптоновского рассеяния γ -кванта на угол θ , определяемое формулой Клейна — Нишины — Тамма (3); $\mu(\theta)$ (см²/г) — массовый коэффициент ослабления

γ -излучения, рассеянного на угол θ . Зависимость μ от θ при $E_\gamma \leq 300$ кэВ можно аппроксимировать формулами вида

$$\mu(\theta) = \mu + b(1 - \cos \theta), \quad (3)$$

где b — константа, определяемая значением E_γ и составом материала. Для углерода значения b составляют 0,057 при $E_\gamma = 60$ кэВ и 0,0135 при $E_\gamma = 220$ кэВ. Смысл остальных обозначений ясен из предыдущего текста и рис. 2. Выражая в явном виде зависимость входящих в подынтегральное выражение величин $R_1, R_2, \theta, r_1, r_2$ от x, y, z, x_1, y_1, y_2 , получаем выражение, пригодное для получения численных результатов. С помощью ЦВМ

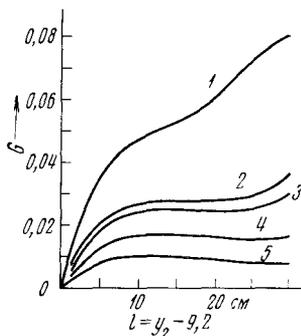


Рис. 3

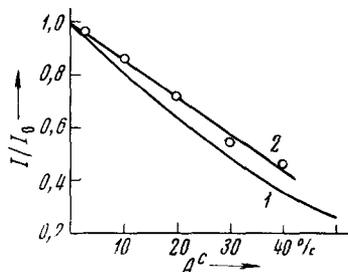


Рис. 4

Рис. 3. Чувствительность к толщине слоя, расчет $G = 4 \cdot 10^{26} \int_0^l \int_0^{7,5} \int_0^{z_1+15} f(x, y, z) dz dy dx$ при различных z_1 : 1 — 30, 2 — 40, 3 — 42, 4 — 50, 5 — 65 см; $E_\gamma = 220$ кэВ, $A^c = 20\%$

Рис. 4. Чувствительность к зольности A^c . 1 — просвечивание, $S_{A^c} = -2,5\%$ на 1% зольности, $E_\gamma = 60$ кэВ; 2 — рассеяние «вперед», $Am^{241} S_{A^c} = -1,9\%$ на 1% зольности

были найдены зависимости $(I/C) = (Z/A)\rho\gamma G$ от l, A^c , концентрации FeS_2, W^p, γ для энергий $E_\gamma = 60$ и 220 кэВ.

Экспериментально изучены зависимости скоростей счета I от l, A^c , содержания FeS_2, W^p при использовании источников γ -излучения Am^{241} ($E_\gamma \approx 60$ кэВ) и Se^{75} ($E_\gamma \approx 220$ кэВ). Зольность имитировалась добавлением к углю ($\rho = 1,2$ г/см³) породы ($\rho = 2,6$ г/см³). Коэффициент заполнения объема составлял $\gamma = 0,55$.

Вид формулы (2) уже сам по себе качественно объясняет характер зависимости сигнала от l и других факторов.

При увеличении толщины слоя угля $l = y_2 - y_1$ происходит ослабление и плотности потока γ -квантов в точке z за счет увеличения (в среднем) R_1, r_1, r_2, θ и одновременное увеличение плотности потока за счет уменьшения (в среднем) R_2 .

На рис. 1, 2 представлена зависимость скорости счета I (в относительных единицах) от l , использовался источник Am^{241} . Отчетливо виден участок «плато», в пределах которого скорость счета не зависит от толщины слоя угля. На рис. 3 в качестве примера приведен результат расчета зависимости $G \sim I$ от l при $E_\gamma = 220$ кэВ (Se^{75}). Отчетливое «плато» наблюдается для $z_1 = 42$ см, $l_{opt} = 20$ см. При использовании Se^{75} ($z_1 - y_1$) $> l_{opt}$ и частичное погружение детектора в слой угля не требуется.

Излучение, рассеянное «вперед»*, ранее успешно использовалось для контроля массы в потоке (4). При этом отыскивались такие условия, когда

* Это условное наименование показывает отличие от метода обратного рассеяния.

скорость счета I была приблизительно пропорциональна $l: I \sim l$. Нами найдены условия, при которых скорость счета в определенных пределах не зависит от l .

Самокомпенсация возмущающих факторов, определяемая использованной геометрией измерения, приводит к существенно более низкой чувствительности к коэффициенту заполнения объема γ , чем в методе просвечивания, и обеспечивает практически полную независимость показаний от влажности W^p (табл. 1). В то же время в методе просвечивания влажность является весьма сильным возмущающим фактором. Радиометриче-

Таблица 2

Характеристика методов контроля зольности

Метод	Чувствительность к зольности при $A^c = 20\%$		Чувствительность к возмущающим факторам
	$E_\gamma = 60$ кэВ	$E_\gamma = 220$ кэВ	
Просвечивание (1)	-2,3	-1,2	Чувствителен к l, γ, FeS_2, W^p
Двухлучевой (1)	-0,5	0,0	Нечувствителен к $\rho\gamma l$
Обратного рассеяния (1)	-0,6	0,0	Нечувствителен к $l \geq l_n$
Рассеяния «вперед»	-1,9	-0,8	Нечувствителен к l, γ, W^p

Примечание. l_n — слой насыщения.

ские методы определения A^c в пробах обычно предусматривают сушку образцов перед измерением.

При использовании достаточно мягкого излучения (например, Am^{241}) увеличение A^c или концентрации тяжелых примесей (FeS_2) действует главным образом в одном направлении: уменьшает плотность потока в точке z за счет роста ослабления излучения в угле (увеличение $\mu, \mu(\theta)$). Многократное рассеивание усиливает этот процесс. На рис. 4 представлена экспериментальная зависимость величины сигнала от зольности для Am^{241} . Чувствительность к зольности близка к таковой для метода просвечивания — самого чувствительного радиометрического метода контроля A^c (табл. 2).

Естественным свойством предлагаемого метода является высокая чувствительность к тяжелым примесям. В этом отношении обсуждаемый метод не имеет существенных преимуществ перед методом просвечивания. Экспериментальные значения чувствительности к FeS_2 представлены в табл. 1. Чувствительность к FeS_2 у нас несколько ниже, чем в методе просвечивания, за счет меньших значений оптимальных толщин слоя.

При сравнении метрологических характеристик предлагаемого метода с другими радиометрическими методами (табл. 2) мы видим, что он сочетает в себе преимущество метода просвечивания — высокую чувствительность к A^c — с нечувствительностью одновременно к нескольким возмущающим факторам (толщине слоя, фракционному составу, влажности), обычно сильно ограничивающим применимость аппаратных методов контроля зольности. Это же относится к анализу других бинарных и квазибинарных смесей. Рассматриваемый подход можно распространить на контроль в потоке.

В заключение авторы выражают искреннюю признательность К. С. Клемпнеру за полезные советы и А. И. Кузнецовой за проведение вычислений на ЦВМ.

Институт горного дела им. А. А. Скочинского
г. Люберцы Моск. обл.

Поступило
5 IV 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ К. С. Клемпнер, О. Б. Крамарев, Зав. лаб., 36, № 10, 1213 (1970). ² А. А. Рудановский, Радиоактивные изотопы в горном деле и обогащении полезных ископаемых, М., 1965. ³ Альфа-, бета- и гамма-спектроскопия, Под ред. К. Зигбана, в. 1, М., 1969. ⁴ S. Probulski, A. Wukpisz, Nucleonika, 12, № 9, 849 (1967).