
УДК 658.652.64.622.3

А. А. Азарян, д-р техн. наук
Криворожский технический университет
(Украина, 50002, Кривой Рог, ул. Пушкина, 44,
E-mail: aza1207@ya.ru)

Модель взаимодействия гамма-излучения с горными породами

Разработана модель взаимодействия гамма-излучения с веществом в приближении однократно рассеянного гамма-излучения для изучения и выбора геометрических параметров измерения интенсивности рассеянного гамма-излучения с целью повышения точности оперативного контроля качества минерального сырья на конвейере.

Розроблено модель взаємодії гамма-випромінювання з речовиною в наближенні однократно розсіяного гамма-випромінювання для вивчення та вибору геометричних параметрів виміру інтенсивності розсіяного гамма-випромінювання з метою підвищення точності оперативного контролю якості мінеральної сировини на конвеєрі.

К л ю ч е в ы е с л о в а: моделирование, гамма-излучение, горная масса.

Проблема оперативного контроля качества минерального сырья на конвейерной ленте представляет собой достаточно сложную и многогранную задачу, так как предъявляются жесткие требования к точности измерения мгновенного значения содержания полезного компонента, что позволяет управлять процессом разделения исходной горной массы на продукты обогащения. При этом на точность контроля качества руд влияют следующие факторы: физические, химические, технические, ядернофизические, технологические, социальные, экологические и экономические.

При непрерывном контроле качества минерального сырья в потоке возможны различные параметры измерительной системы, т.е. геометрии измерения интенсивности рассеянного гамма-излучения: расстояния источник — детектор, детектор — горная масса, диаметр монокристалла детектора, угол коллиматора источника, угол облучения пробы. Выбор геометрии измерения зависит от класса крупности рудных кусков в контролируемой горной массе, так как при изменении класса крупности на конвейере изменяется расстояние между датчиком и поверхностью контролируемой горной массы, а это приводит к изменению углового распределения рассеянного гамма-излучения. Кроме того, если при классе крупности горной

массы 20 мм можно использовать различные приспособления для стабилизации воздушного зазора между источником (приемником) гамма-излучения и поверхностью горной массы, то при крупнокусковой руде применение этих приспособлений нецелесообразно.

Рассмотрим пример взаимодействия гамма-излучения с веществом в приближении однократно рассеянного гамма-излучения, когда класс крупности кусков в контролируемой горной массе не превышает 20 мм. Исследуем боковую геометрию измерения, при которой источник располагается в стороне от центра детектора. Боковая геометрия измерения с одним или двумя источниками позволяет использовать всю поверхность детектора, что обеспечивает минимальные потери вторичного излучения при достаточной контрастности сигнала и возможно меньшей активности источника.

Целью моделирования является изучение ширины зоны инверсии (изменение значения интегрального потока рассеянного гамма-излучения на противоположное) в зависимости от геометрических условий измерений, а именно: расстояния источника от детектора, угла коллиматора источника, угла облучения пробы, расстояния от детектора до пробы. Для этого на первом этапе необходимо определить плотность потока вторичного излучения точечного изотропного моноэнергетического источника гамма-излучения активностью Q и точечного изотропного детектора A , расположенных на расстоянии l один от другого и на расстоянии h от поверхности гомогенного рассеивателя (рис. 1). Этот случай представляет собой идеализацию условий измерений, однако позволяет качественно изучить требуемые зависимости, а при подборе соответствующих экспериментальных коэффициентов — и количественно.

Наибольший вклад в рассеянное гамма-излучение вносит некогерентное излучение. Строгий расчет потока вторичного излучения представляет собой трудоемкую задачу даже с применением ЭВМ. В связи с этим для решения задачи целесообразно использовать приближенные методы расчетов, из которых наиболее широкое применение нашел метод приближения однократного взаимодействия, позволяющий оценить характер зависимости потока вторичного излучения от геометрических условий измерений.

Дифференциальное уравнение для плотности потока вторичного излучения, возникающего в гомогенной среде в результате взаимодействия первичного гамма-излучения с веществом пробы, имеет вид [1, 2]

$$\frac{dn_i}{dV} = [QK_i \rho / (4\pi R_1^2 R_2^2)] \exp(-\mu_r r - \mu_i \rho r_i), \quad (1)$$

где n_i — плотность потока вторичного гамма-излучения; Q — активность источника; R_1 и R_2 — расстояние от элемента объема dV до источника и

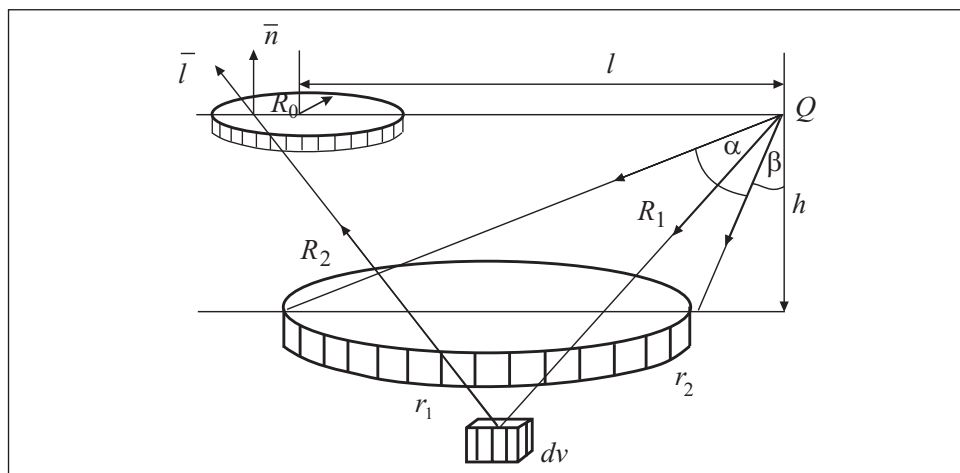


Рис. 1. К расчету потока вторичного излучения в приближении однократного расстояния при одном источнике излучения

детектора; r_2 и r_1 — расстояния, проходимые в пробе соответственно первичным и вторичным излучением; K_i — коэффициент преобразования первичного излучения в i -й вид вторичного; μ и μ_i — коэффициенты массы ослабления первичного и i -го вида вторичного излучения; ρ — плотность пробы. Индекс i в зависимости от вида вторичного излучения может принимать следующие значения: 1 — для характеристического рентгеновского излучения; 2 — для некогерентного рассеянного излучения; 3 — для когерентного рассеянного излучения.

Суммарный поток вторичного излучения N_i определяется интегрированием уравнения по объему V и по области D , занимаемой детектором [1]:

$$N_i = \frac{Q}{4\pi} \iiint_V \frac{K_i \rho}{R_1^2 R_2^2} \exp(-\mu \rho r_2) dV \iint_D \exp(-\mu \cdot \mathbf{l} \cdot \mathbf{n}) dS, \quad (2)$$

где \mathbf{l} — единичный вектор, совпадающий с направлением вторичного фотона; \mathbf{n} — единичный вектор, перпендикулярный к поверхности D .

Поскольку интеграл невозможно выразить через элементарные функции, а численное интегрирование сложно ввиду его кратности и многочисленности параметров, определяющих вторичное излучение, появились приближенные методы вычисления интеграла, основанные на допущениях, вытекающих из геометрических условий измерений.

Если расстояние от источника и детектора до поверхности пробы больше линейных размеров облучаемой площадки, с учетом коллимации

первичного излучения интегралы в формуле (2) можно упростить, и после преобразования получим

$$N = \frac{QR_0^2 h \left[1 - \cos(\alpha/2) + \frac{1}{2} \sin^2(\alpha/2) \right]}{8 \left\{ \left[l - \frac{h}{2} (\operatorname{tg}(\alpha + \beta) + \operatorname{tg}\beta) \right]^2 + h^2 \right\}^{3/2}} \varphi, \quad (3)$$

где R_0 — радиус детектора; h — расстояние от детектора до пробы; l — расстояние от источника до детектора; α — угол коллиматора источника; β — угол отклонения пучка первичного излучения от вертикальной оси; φ — функция, учитывающая зависимость интенсивности потока вторичного излучения от ядернофизических свойств исследуемой пробы.

Для удобства вычислений формулу (3) можно записать в виде

$$N = \frac{QBh}{[(l-hc)^2 + h^2]^{3/2}} \varphi,$$

где

$$B = \frac{1}{8} R_0^2 \left[1 - \cos(\alpha/2) + \frac{1}{2} \sin^2(\alpha/2) \right];$$

$$c = \frac{\operatorname{tg}(\alpha + \beta) + \operatorname{tg}\beta}{2}.$$

При исследовании зависимости потока вторичного гамма-излучения от геометрических факторов естественно рассматривать величину [3]

$$N = \frac{QBh}{[(l-hc)^2 + h^2]^{3/2}}. \quad (4)$$

Формула (4) описывает искомую математическую модель, с помощью которой исследуется область инверсии.

Точку инверсии определяем, приравняв нулю производную $\frac{\partial N}{\partial h}$. Тогда

$$h_0 = l \frac{2}{\sqrt{8+9c^2} - c}.$$

Границы области инверсии определяем из соотношения

$$N(h_1) = N(h_0)(1-\delta), \quad (5)$$

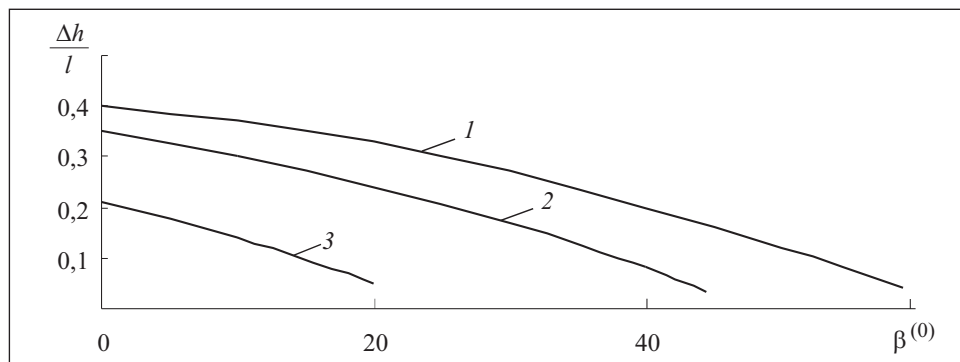


Рис. 2. Зависимость относительной величины области инверсии от геометрических условий измерения: 1 — $\alpha = 0^\circ$; 2 — $\alpha = 30^\circ$; 3 — $\alpha = 60^\circ$

где δ — требуемая точность измерения. Подставляя в (5) значения потока, получаем

$$\frac{h_1}{[(l-h_1c)^2 + h_1^2]^{3/2}} = \frac{h_0(1-\delta)}{[(l-h_0c)^2 + h_0^2]^{3/2}}. \quad (6)$$

Уравнение (6) позволяет исследовать зависимость величины области инверсии от геометрических условий измерений. Поскольку оно является нелинейным, его решение выполнено численно. На рис. 2 показана зависимость ширины области инверсии от параметров α и β . Из графика видно, что при наличии одного источника гамма-излучения и погрешности измерения 5 % наибольшая ширина области инверсии составляет $\frac{\Delta h}{l} = 0,4$ при $\alpha = 0$ и $\beta = 0$.

Для повышения точности оперативного контроля качества минерального сырья при увеличении ширины инверсионной зоны разработана модель на основе суммарного эффекта инверсии от двух источников излучения:

$$N = \sum_{i=1,2} \frac{Q_i B_i h}{[(l_i - hc_i)^2 + h^2]^{3/2}}, \quad (7)$$

где Q_i — активность источников;

$$B_i = \frac{1}{8} R_0^2 \left[1 - \cos(\alpha_i / 2) + \frac{1}{2} \sin^2(\alpha_i / 2) \right];$$

l_i — расстояние от источника Q_i до оси детектора.

По результатам моделирования получены основные технические параметры микропроцессорной системы оперативного контроля качества и

веса аглоруды на конвейере. Относительная погрешность контроля качества составила 2,1 %.

Выводы. При увеличении расстояния источник — датчик точка инверсии смещается к началу координат, и чем больше ширина области инверсии, тем выше точность контроля качества минерального сырья.

Модель, разработанная на основе суммарного эффекта инверсии (7) позволила получить следующие технические параметры системы оперативного контроля качества и веса аглоруды на конвейере: $h = 45$ мм, $l_1 = 60$ мм, $l_2 = 120$ мм, $R_0 = 32$ мм, $\alpha_1 = 90^\circ$, $\alpha_2 = 45^\circ$ при $Q_1 = 3,7 \cdot 10^8$, $Q_2 = 3,7 \cdot 10^9$ Бк Am-241 и диаметре коллимационного канала защитного контейнера 5 мм.

Относительная погрешность оперативного контроля содержания железа в горной массе при использовании микропроцессорной системы оперативного контроля качества и веса аглоруды на конвейере шахты «Гвардейская» (см. сайт www.rpg.com.ua) составила 2,1 %.

A model of gamma-radiation interaction with substance in the approximation of singly scattered gamma-radiation has been developed for studying and choosing geometrical parameters modeling of measuring the intensity of scattered gamma-radiation with the purpose of increasing the accuracy of operational control of mineral raw-material quality on the conveyor.

1. Азарян А. А. Разработка методов и средств физико-технического контроля и управления качеством руд черных металлов при добыче и переработке: Дис. ... докт. техн. наук. — Киев, 1993. — 470 с.
2. Филиппов З. М. Прикладная ядерная геофизика. — М.: Изд-во АН СССР, 1962. — 580 с.
3. Азарян А. А. Выбор параметров блока регистрации рассеянного гамма-излучения // Материалы II Межд. симпозиума «Оперативный контроль и управление качеством минерального сырья при добыче и переработке» (Качество-99) — Ялта: АГНУ. — 1999. — С. 202—206.
4. Мейер В. А., Ваганов Я. А. Основы ядерной геофизики. — Л.: ЛГУ. — 1978. — 360 с.

Поступила 26.02.10;
после доработки 18.05.10

АЗАРЯН Альберт Арамаисович, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Моделирование и программное обеспечение», руководитель проблемно-отраслевой научно-исследовательской лаборатории Министерства промышленной политики Украины при Криворожском техническом университете. В 1967 г. окончил Одесский электротехнический ин-т связи. Область научных исследований — оперативный контроль и управление качеством минерального сырья с использованием геофизических (ядернофизических) методов.